

Conception d'un outil d'aide à la planification de changements d'ingénierie en milieu aéronautique

Par

Léo MOUGEL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE
AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE CONCENTRATION : PERSONNALISÉE
M. Sc. A.

MONTRÉAL, LE 20 FÉVRIER

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Léo Mougel, 2017



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE RAPPORT MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Yvan Beauregard, directeur de mémoire
Département de génie de la mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Marc Paquet, codirecteur de mémoire
Département de génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

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

M. Mickaël Gardoni, membre du jury
Département de génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

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

LE 14 FÉVRIER, 2017

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je souhaite avant tout remercier mes directeurs de recherche Yvan Beauregard et Marc Paquet qui m'ont soutenu et dirigés tout au long de ce travail. Leur accompagnement a été précieux et déterminant dans la réalisation de ce projet. Je les remercie de leur patience et de leur présence qui m'ont permis de me mettre en confiance.

Je souhaite également remercier Paul Goyer ainsi que toutes les personnes qui m'ont consacré du temps au sein de l'entreprise partenaire. Je les remercie de leur disponibilité ainsi que de leurs commentaires précieux qui sont au cœur de l'aboutissement de ce projet.

Enfin je tiens particulièrement à remercier mes parents, mes frères ainsi que mes amis dont le soutien a été crucial dans les moments de doute et de remise en question. Une mention pour Léa, qui a également toujours été là pour moi. Ils m'ont donné le courage de mener ce projet au bout, de ne pas baisser les bras.

CONCEPTION D'UN OUTIL D'AIDE À LA PLANIFICATION DE CHANGEMENTS D'INGÉNIERIE EN MILIEU AÉRONAUTIQUE

Léo MOUGEL

RÉSUMÉ

L'obsolescence est un phénomène qui touche de plus en plus le secteur aéronautique. De par l'augmentation du nombre de composants électroniques dans les appareils, il arrive de plus en plus souvent qu'un fournisseur annonce la fin de production ou la modification du composant. Il existe diverses manières pour répondre à un cas d'obsolescence mais la solution à long terme la plus répandue consiste à remplacer ou modifier le composant obsolète, autrement dit, de faire un changement d'ingénierie. Dans le cas de l'aéronautique, les contraintes de certification ainsi que la complexité des composants, font que les projets de changement d'ingénierie sont souvent conséquents laissant peu de marge de manœuvre avant la rupture de stock si la notification n'arrive pas assez tôt. La notion de planification est donc centrale et permet d'anticiper les retards potentiels qui peuvent induire des ruptures de production. En raison du nombre important de contraintes de certification auquel est soumise l'industrie l'aéronautique, ces processus doivent être formalisés.

L'objectif de ce travail est de concevoir un outil d'aide à la planification de changements d'ingénierie en aéronautique. L'outil permet, à partir des caractéristiques du changement, d'identifier les livrables à fournir. Deux (2) sous-objectifs ont été identifiés. Le premier est celui de modéliser le processus de changement d'ingénierie dans le cas d'obsolescence. Le deuxième sous-objectif est de construire un outil d'aide à la planification de ces projets.

La méthodologie adoptée pour répondre à cette problématique est celle dictée par la science de la conception, où les objectifs sont traduits en livrables et ces livrables sont conçus au travers de cycles de conception. Un choix de langage de modélisation du processus a été fait pour répondre aux besoins identifiés lors d'une analyse du besoin. A partir de cette représentation du processus de changement d'ingénierie, les critères d'applicabilité des livrables de projet ont été analysés et intégrés dans un outil d'aide à la planification.

L'outil final est évalué par les utilisateurs ainsi que par une étude de cas. Les résultats de ces évaluations montrent la pertinence de l'outil face à la problématique de planification des changements d'ingénierie ainsi qu'une bonne fiabilité de l'identification des livrables de projet. Ce travail permet de tracer le lien entre les changements d'ingénierie et leur processus.

Mots-clés : Obsolescence, aéronautique, processus de changement d'ingénierie, caractérisation de changements d'ingénierie, planification.

ENGINEERING CHANGE PLANING TOOL DESIGN FOR THE AVIATION INDUSTRY

Léo MOUGEL

ABSTRACT

Obsolescence is a phenomenon that is increasingly affecting the aeronautic sector. By increasing the concentration of electronic components, it is becoming increasingly common for a supplier to announce the end of the production or the modification of the supplied product. There are various ways to respond to an obsolescence case but the modification or replacement of the obsolete component, in other words an engineering change, is the most widespread as a long-term solution. In the case of aeronautics, certification constraints and component complexity tend to make engineering change projects substantial, leaving little room for maneuver before stock-out if the notification does not arrive sufficiently early. The concept of planning is thus central as it allows anticipating the potential delays which can induce production disruptions. Due to the large number of certification constraints imposed on the aeronautics industry, these processes must be formalized. The deliverables to be realized during this process depend on the considered engineering change.

This work objective is to design planning assisting tool for engineering change in the aeronautic industry. Using the characteristics of the change, the tool identifies the deliverables to be supplied during the process. Two (2) sub-objectives have been identified. The first is to model the engineering change process in the case of obsolescence. The second is to build a tool to assist in the planning of these projects.

The methodology adopted to address this problem is that dictated by design science, where objectives are translated into artifacts and these artifacts are designed through design cycles. A choice of modeling language of the process was made to meet the needs identified in a need analysis and to take into account the specificities of this process in the context of obsolescence in the aeronautics industry. From this representation of the engineering change process, the applicability criteria of the project deliverables were analyzed and integrated into a planning aid tool.

The final tool is evaluated by future users as well as a case study. The results show the relevance of the tool in the engineering change planning activity as well as the reliability of the identification of project deliverables. This work contributes to identification of the link between the engineering changes and their process.

Key-words: Obsolescence, aviation, engineering change process, planning

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE	5
1.1 Introduction de la revue de la littérature	5
1.2 L'obsolescence dans l'aéronautique	5
1.2.1 Définition de l'obsolescence	7
1.2.2 Sources d'obsolescence	7
1.2.3 Techniques et modes de gestion de l'obsolescence	8
1.2.4 Conclusion sur l'obsolescence	15
1.3 Changements d'ingénierie dans l'aéronautique	16
1.3.1 Généralités	16
1.3.2 Processus de changement d'ingénierie (PCI)	17
1.3.3 Types de changements d'ingénierie (CI)	19
1.3.4 Contrainte principale du processus de changement d'ingénierie : la certification de navigabilité	21
1.3.5 Conclusion sur les changements d'ingénierie dans l'aéronautique	25
1.4 Modélisation de processus d'affaires	25
1.4.1 Généralités	25
1.4.2 Méthodes de modélisation de processus d'affaire	27
1.4.3 Cadre Conceptuel de Qualité du modèle	32
1.5 Conclusion et analyse critique de la littérature à la lumière du projet	34
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE	37
2.1 Méthodologie générale de l'étude	37
2.1.1 Principes généraux de la science de la conception	37
2.1.2 Méthodologie générale de la science de la conception	39
2.1.3 Justification de l'adoption de la science de la conception : critères d'application	39
2.2 Stratégie de recherche	42
2.2.1 Stratégie générale	42
2.2.2 Stratégie détaillée	42
2.3 Méthodes appliquées dans les phases	44
2.3.1 Analyse des spécifications techniques des livrables de recherche	44
2.3.2 Modélisation du processus de changement d'ingénierie	46
2.3.2.1 Choix de la méthode de modélisation	46
2.3.2.2 Modélisation du processus par cycle auteur-lecteur	47
2.3.3 Développement de l'outil d'aide à la planification	49
2.3.3.1 Collecte de données	50
2.3.3.2 Traitement des données	51
2.3.3.3 Critère de saturation empirique	51
2.3.4 Évaluation de l'outil	51

2.3.4.1	Évaluation qualitative	52
2.3.4.2	Évaluation quantitative	52
CHAPITRE 3	PRÉSENTATION DES RÉSULTATS.....	57
3.1	Phase de Suggestion : sélection de l'objectif de recherche.....	57
3.2	Spécification du livrable final.....	59
3.3	Modélisation du processus.....	62
3.3.1	Choix de la méthode de modélisation de processus.....	62
3.3.2	Modèle préliminaire du processus de changement d'ingénierie.....	63
3.3.3	Modèle du processus d'implémentation de changement d'ingénierie.....	66
3.3.3.1	Analyse du processus.....	66
3.3.3.2	Présentation du modèle.....	69
3.3.4	Critère de saturation empirique.....	70
3.4	Développement de l'outil.....	73
3.4.1	Caractéristiques des changements d'ingénierie (collecte et traitement des données).....	73
3.4.2	Critère de saturation empirique.....	74
3.4.3	Présentation de l'outil.....	75
3.5	Résultats de l'évaluation qualitative.....	79
3.6	Résultats de l'évaluation quantitative.....	80
CHAPITRE 4	DISCUSSION.....	85
4.1	Contributions et limitations du modèle de PCI.....	85
4.2	Contribution et limitations de l'outil d'aide à la planification.....	86
CONCLUSION	89
ANNEXE I	QUALITÉS DU MODÈLE CMQF	91
ANNEXE II	SONDAGE DE VALIDATION.....	93
ANNEXE III	RÉSULTATS DU SONDEGE DE VALIDATION.....	95
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		97

LISTE DES TABLEAUX

		Page
Tableau 1.1	Techniques de résolution de l'obsolescence, Source : Rojo, Roy et Shehab (2010).....	12
Tableau 1.2	Techniques de mitigation de l'obsolescence, Source : Rojo, Roy et Shehab (2010).....	13
Tableau 1.3	Technique et mode de gestion de l'obsolescence, Source : Rojo, Roy et Shehab (2010).....	14
Tableau 1.4	Classification par urgence des changements d'ingénierie Source : Jarratt <i>et al.</i> , 2011	20
Tableau 1.5	Classification par état de la conception des changements d'ingénierie Source : Jarratt <i>et al.</i> , 2011	20
Tableau 1.6	Classes de changement et processus de certification	23
Tableau 1.7	Objectifs à atteindre selon le niveau de criticité de l'équipement (RTCA, 2011).....	25
Tableau 2.1	Application des critères de la science de la conception dans le cadre de ce projet. Source : Von Alan <i>et al.</i> (2004).....	41
Tableau 2.2	Stratégie de recherche	43
Tableau 3.1	Besoins clients	59
Tableau 3.2	Spécifications techniques de l'outil.....	60
Tableau 3.3	Évaluation des méthodes de modélisation	63
Tableau 3.4	Lien entre le processus NP&SI, le PCI générique et le processus de certification	67
Tableau 3.5	Différences de contexte entre le CI volontaire et le CI en situation d'obsolescence.....	69
Tableau 3.6	Diagramme d'affinités des 21 caractéristiques des changements d'ingénierie	73
Tableau 3.7	Exemple de liste de livrable: CI majeur 1, 2 ou 3.....	76

Tableau 3.8	Résultats concernant le modèle de processus	79
Tableau 3.9	Résultats concernant l'outil d'aide à la planification.....	80
Tableau 3.10	Caractéristiques du CI de l'évaluation quantitative (gras)	81

LISTE DES FIGURES

		Page
Figure 0.1	Contexte de recherche.....	3
Figure 0.2	Nécessité de la maîtrise du PCI	3
Figure 1.1	Étendue de la revue de la littérature.....	6
Figure 1.2	Définition de l'obsolescence, Source : Bartels <i>et al.</i> (2012a).....	7
Figure 1.3	Stratégies de gestion de l'obsolescence, Source : Bartels <i>et al.</i> (2012a).....	9
Figure 1.4	Politique de résolution de l'obsolescence.....	15
Figure 1.5	Processus de changement d'ingénierie Source : Jarratt, Clarkson et Eckert (2005).....	17
Figure 1.6	Processus de certification du DAPM de l'EP	22
Figure 1.7	Processus de détermination de la classe du CI, Source : TCCA (2015a)	23
Figure 1.8	Méta modèle du processus Source : Mili <i>et al.</i> (2010)	27
Figure 1.9	Diagramme SIPOC	28
Figure 1.10	Exemple de diagramme à flux croisés	29
Figure 1.11	Exemple de DSM.....	30
Figure 1.12	Exemple de RID.....	32
Figure 1.13	Exemple de RAD	32
Figure 1.14	Cadre conceptuel de qualité du modèle CMQF Source : Nelson <i>et al.</i> (2012)	34
Figure 2.1	Illustration de la science de la conception Source : Von Alan <i>et al.</i> (2004).....	38
Figure 2.2	Méthodologie de la science de la conception, Source : Vaishnavi et Kuechler (2015).....	40

Figure 2.3	Stratégie générale de recherche	42
Figure 2.4	Maison de la qualité Source : Bernal <i>et al.</i> , 2009	45
Figure 2.5	Méthodologie de la modélisation de processus	46
Figure 2.6	Méthodologie de conception de l’outil	50
Figure 2.7	Mesures de performances de l'outil	54
Figure 3.1	Piste 1 : Étude de la propagation de changement d'ingénierie pour les pièces sujettes à l'obsolescence	58
Figure 3.2	Piste 2 : Étude du lien entre les caractéristiques du CI (du point de vue de l’entreprise) et les livrables du PCI.....	58
Figure 3.3	Maison de la qualité	61
Figure 3.4	Modèle SIPOC du PCI.....	65
Figure 3.5	Modèle du PCI (22 blocs).....	71
Figure 3.6	Évolution du nombre de blocs du modèle de processus	72
Figure 3.7	Évolution du nombre de livrables identifiés	72
Figure 3.8	Évolution du nombre de critères au cours des cycles de conception.....	74
Figure 3.9	Interface utilisateur de l’outil.....	75
Figure 3.10	Processus de caractérisation du CI - Certification	77
Figure 3.11	Processus de caractérisation du CI – Ingénierie et Projet.....	78
Figure 3.12	Résultats de l'évaluation quantitative de la performance de l'outil.....	82
Figure 3.13	Résultat de l'évaluation quantitative pour la cohérence	83

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

BWW	Bunge Wand Weber (BWW) framework
CA	Chaîne d'Approvisionnement
CI	Changement d'ingénierie
CMQF	Conceptual Modeling Quality Framework
COTS	Commercial Off The Shelf
DAPM	Design Approval Procedures Manual
DC	Délégué de Certification
DMSMS	Diminishing manufacturing sources and material shortages
DSM	Design Structure Matrix
EP	Entreprise Partenaire
IDEF	Integrated DEFinition Methods
LSS	Lindland, Sindre et Solvberg (LSS) framework
LTB	Last Time Buy
PCI	Processus de changement d'ingénierie
RAD	Role Activity Diagrams
RID	Role Interaction Diagrams
RTCA	Radio Technical Commission for Aeronautics
TCCA	Transport Canada Civil Aviation
TSO	Technical Standard Order

INTRODUCTION

Contexte de recherche

Le monde aéronautique impose un niveau de qualité et de fiabilité toujours plus élevé pour ses technologies embarquées. Les produits livrés par ce secteur ont de longs cycles de vie et doivent être soutenus pendant des dizaines d'années. Mais l'usage de plus en plus large de composants électroniques à durée de vie très réduite ainsi que l'utilisation croissante de composants commerciaux soumis aux contraintes commerciales des fournisseurs rendent inévitable des situations critiques de perte d'approvisionnement. Ce phénomène d'obsolescence est au centre de la problématique de ce travail.

Le phénomène est complexe car beaucoup de facteurs entrent en ligne de compte : la complexité des systèmes et leur inter-connectivité, la masse importante de données et de composants à surveiller *etc.* Les causes de l'obsolescence sont variées. Elles peuvent aussi bien provenir d'une crise sur des matières premières à l'autre bout du globe, que de l'évolution technologique dictée par le marché ou un fournisseur.

Ce travail s'effectue dans le contexte d'un partenariat avec une entreprise du secteur aéronautique que nous désignerons par « l'entreprise partenaire » (EP).

Problématique et objectif de recherche

Actuellement, la problématique de l'obsolescence n'est traitée par aucun département de cette entreprise. Au vue de sa criticité l'EP a donc fait appel à un projet constituant la tâche 6 du projet LEAN – 501 de CRIAQ par laquelle elle espère améliorer sa gestion de l'obsolescence.

La tâche 6 du projet CRIAQ LEAN – 501 se concentre sur deux (2) aspects de la problématique de l'obsolescence :

- 1) La prévision des cas d'obsolescence;
- 2) La gestion des cas d'obsolescence.

Une équipe de cinq (5) membres de l'ÉTS travaille sur cette tâche :

- Prévision de l'obsolescence : Yosra Grichi ;
- Gestion des cas d'obsolescence : Niamkey Sablin (création d'une grille d'évaluation du niveau de gestion de l'obsolescence), Héroïse Conrad (création d'une méthode de plan de transition d'une gestion réactive à une gestion proactive), Imen Zaabar (modèle de sélection de la méthode de résolution), et Léo Mougel (outil d'aide à la planification de changement d'ingénierie).

La gestion des cas d'obsolescence peut se traiter de façon plus ou moins anticipée définissant des modes de gestion réactive, proactive et stratégique (Bartels *et al.*, 2012a). Elle comprend une partie résolution qui traite le cas avéré, et dans le cas spécifique des gestions proactive et stratégique une partie mitigation qui vise à réduire la fréquence et l'impact de l'obsolescence (Rojo, Roy et Shehab, 2010).

Si la littérature liée à l'obsolescence se concentre autour des mesures de mitigation pouvant être mise en place dans le cadre de la prévision d'obsolescence, on ne trouve que peu de travaux sur la résolution des cas d'obsolescence. Or, si la mitigation peut contribuer à la réduction de la fréquence et de l'impact des cas d'obsolescence, il y aura toujours la nécessité de répondre aux cas avérés.

La résolution des cas d'obsolescence avérés se traduit de deux (2) manières possibles, 1) l'achat de stock ou 2) un changement d'ingénierie (CI) (Rojo, Roy et Shehab, 2010). L'option achat de stock n'est viable que lorsque la fin de cycle de vie du système est proche (Feng, 2007). Dans la majeure partie des cas, pour des raisons de coût de stockage, l'option CI est la solution privilégiée à long terme. Le cadre de recherche de ce mémoire est illustré dans la Figure 0.1 : la gestion de l'obsolescence est réalisée de manière plus ou moins proactive, en faisant appel à des techniques de résolution des cas avérés et des techniques de mitigation des risques liés à l'obsolescence. Les techniques de résolution sont divisées en techniques basées sur l'achat de stock ou de changement d'ingénierie. Ce travail se focalise sur la résolution des cas d'obsolescence traités par changement d'ingénierie.

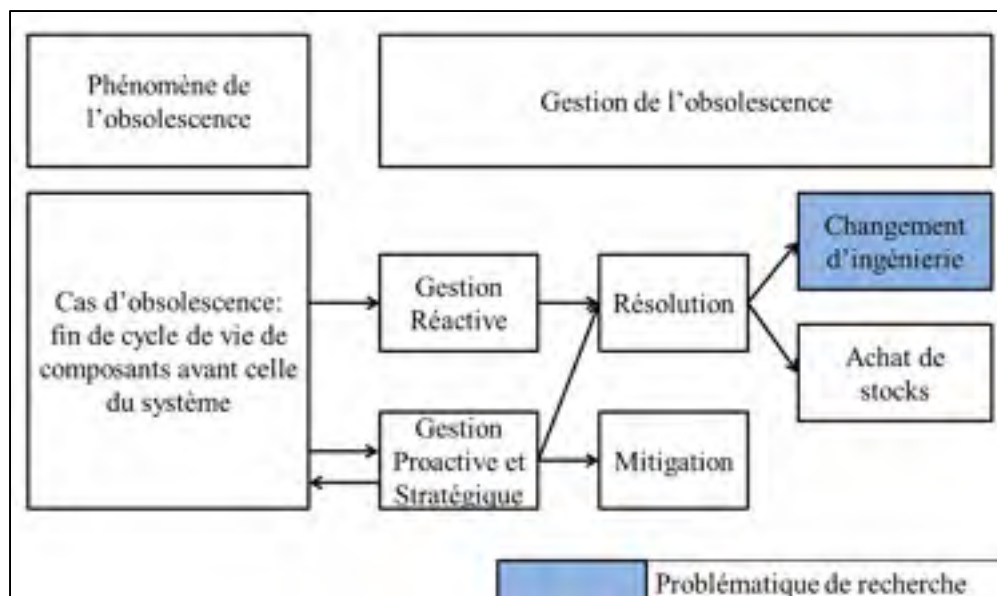


Figure 0.1 Contexte de recherche

Le CI est soumis aux nombreuses exigences de qualité et de certification du secteur aéronautique qui rendent le processus long et contraint. Il peut prendre jusqu'à deux (2) ans. Une rupture d'approvisionnement impacte lourdement la production ainsi que la maintenance. Il faut impérativement que le processus de changement d'ingénierie (PCI) aboutisse avant cette rupture (Figure 0.2). Afin de contrôler le dépassement de ce délai, le processus doit être maîtrisé : le temps nécessaire pour implémenter le changement doit être connu.

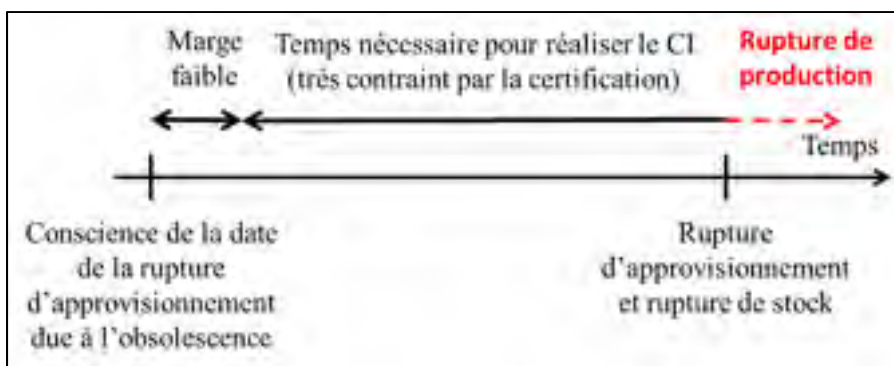


Figure 0.2 Nécessité de la maîtrise du PCI

Or chaque CI est associé une liste de livrable. Cette liste de livrable impacte la durée des projets de CI. Nous allons donc essayer de déterminer les liens entre les caractéristiques des CI et les livrables du processus.

La problématique à laquelle tente de répondre ce travail est la conception d'une approche pour la maîtrise du PCI dans un contexte d'obsolescence dans l'industrie aéronautique. Dans le cadre de cette problématique, nous nous sommes donné comme objectif de réaliser un outil d'aide à la planification liant les caractéristiques du CI et les livrables de PCI. Pour cela nous avons identifiés le besoin de modéliser le PCI et réaliser un outil mettant en évidence ce lien.

Dans un premier temps on cherchera à identifier les concepts et méthodes existantes liés à la problématique. Ceci nous permettra de mettre en avant les facteurs et méthodes permettant de mieux maîtriser le PCI. Sur cette base nous développerons l'outil demandé par l'EP.

Ce mémoire est structuré comme suit :

- Chapitre 1 est une revue de la littérature des thèmes abordés : gestion de l'obsolescence, changement d'ingénierie et son processus ainsi que les différentes méthodes de modélisation de processus.
- Chapitre 2 détaille la méthodologie adoptée.
- Chapitre 3 présente les résultats obtenus.
- Chapitre 4 discute ces résultats ainsi que les limitations de l'étude.
- La conclusion présente les contributions de la recherche et des recommandations sont proposées.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

1.1 Introduction de la revue de la littérature

Afin de répondre à la problématique de l'amélioration et de la maîtrise du PCI dans le contexte de l'obsolescence en aéronautique une revue de l'état de l'art est nécessaire. L'étendue de cette revue de la littérature est illustrée Figure 1.1. Elle est délimitée par la problématique de la maîtrise du PCI dans le contexte de l'obsolescence.

Les principaux concepts, définitions, méthodes et outils utilisés dans ce contexte sont relevés pour éclaircir le positionnement de ce travail. Le thème de l'obsolescence est d'abord abordé pour mettre en lumière le caractère central de la notion de changement d'ingénierie dans la résolution de cas d'obsolescence. Les notions-clés du CI dans l'aéronautique, son processus ainsi que la caractérisation des CI sont ensuite éclairés à la lumière de la littérature. La certification, contrainte majeure du PCI pour les entreprises aéronautique, y est également abordée. Enfin, le concept de processus est défini, les principales méthodes de modélisation de processus, pertinentes pour la problématique ainsi que les méthodes d'analyse et d'amélioration continue des processus sont présentées.

1.2 L'obsolescence dans l'aéronautique

Dans l'industrie aéronautique, la préoccupation de l'obsolescence date des années 1980. Il s'agit de la période à laquelle la partie militaire de cette industrie commence à remplacer les composants qu'elle commandait sur-mesure, par des composants issus du commerce (en anglais « commercial off the shelf », ou COTS). Cette tendance a été favorisée par la croissance du marché des composants électroniques ainsi que la réduction des budgets de la fin de la guerre froide (Alford, 2000). Ce changement a largement été mené par les fournisseurs pour qui les volumes de pièces sur-mesure de l'industrie aéronautique n'était plus assez intéressants face aux autres marchés (Rojo, Roy et Shehab, 2010).

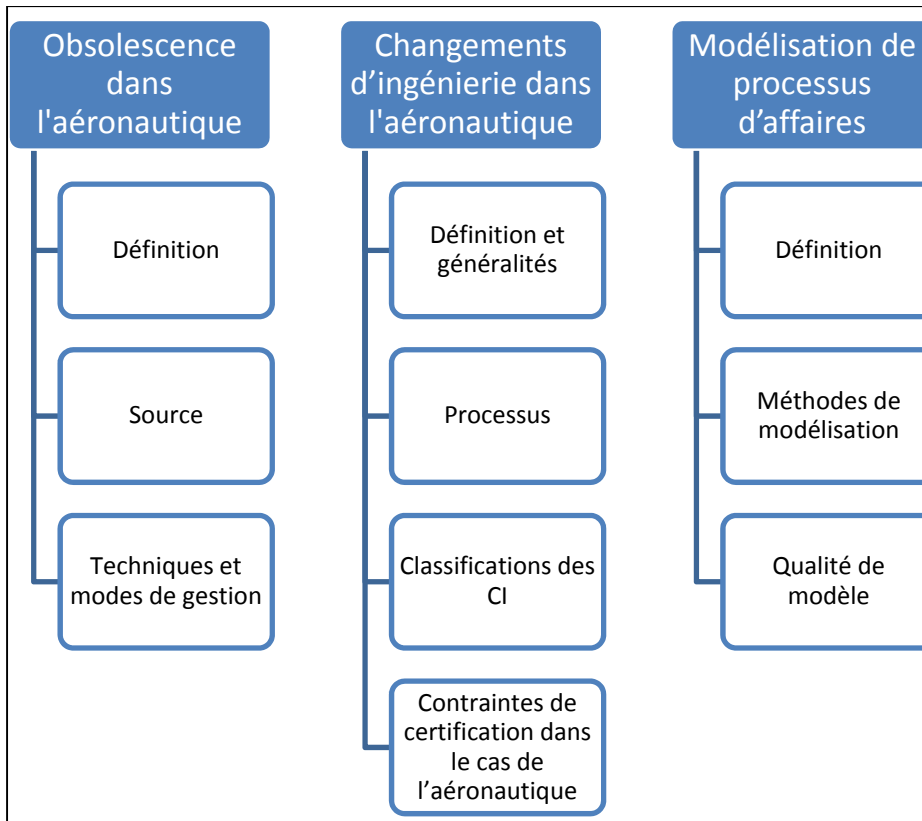


Figure 1.1 Étendue de la revue de la littérature

Historiquement, lorsque les premiers problèmes liés à l'obsolescence sont apparus, les constructeurs et les industriels faisaient du cas par cas au moment où le problème apparaissait, soit selon une gestion réactive. Des solutions étaient alors trouvées pour régler le problème le plus rapidement possible. Des chercheurs ont ensuite montré qu'en intégrant une logique de gestion de l'obsolescence à la chaîne de production et à la chaîne d'approvisionnement, des économies considérables pouvaient être réalisées en coût et en temps. C'est la distinction entre la prévention (gestion proactive) de l'obsolescence et la résolution des problèmes d'obsolescence.

Ainsi, dans cette section, après avoir défini ce qu'est l'obsolescence, les différents types d'obsolescences seront présentés et la gestion de cette obsolescence sera traitée.

1.2.1 Définition de l'obsolescence

L'obsolescence, telle que nous la considérons, se produit en amont de la chaîne d'approvisionnement. Elle se définit comme « la perte ou la perte imminente de fabricants d'origine d'articles ou de fournisseurs de matière première » (Rojo, Roy et Shehab, 2010). Elle porte aussi l'acronyme DMSMS venant de l'anglais « Diminishing Manufacturing Sources and Material Shortage ». On inclut également les cas où la maintenance n'est plus disponible (Nelson III et Sandborn, 2012). Il s'agit donc de tous les cas où les fabricants originaux ne sont plus en mesure de fournir des produits ou services pour lesquels ils sont commandités (Figure 1.2) (Bartels *et al.*, 2012a).

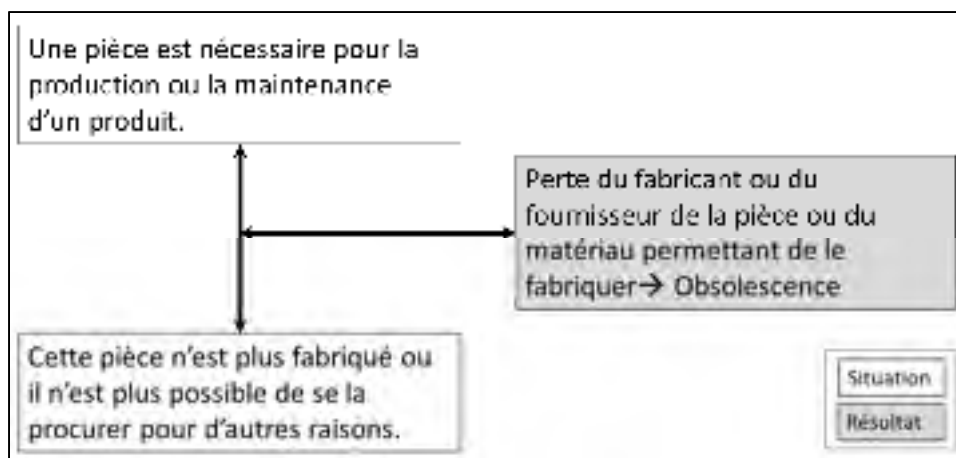


Figure 1.2 Définition de l'obsolescence,
Source : Bartels *et al.* (2012a)

1.2.2 Sources d'obsolescence

Les sources d'obsolescence sont nombreuses, allant de l'indisponibilité des matières premières à une diminution de la demande. On peut alors distinguer les principaux facteurs de l'obsolescence (Gravier et Swartz, 2009) :

- Évolution de la technologie : l'apparition d'une nouvelle technologie peut rendre une technologie dépassée.
- Fonction : la disparition d'une fonctionnalité rend la technologie qui la remplissait obsolète.

- Processus de fabrication : l'évolution des processus de fabrication déclenche l'apparition et la disparition de technologies.
- Obsolescence programmée : un fournisseur peut faire évoluer ses produits intentionnellement rapidement pour des raisons de profit.
- Normalisation et restriction : l'évolution des normes peut rendre un composant non conforme.
- Demande : la diminution de la demande peut annuler la viabilité d'un composant.

Les contraintes associées aux différents cas peuvent tout de même différer. Par exemple, lorsque l'occurrence de l'obsolescence est indépendante de la volonté du fournisseur comme suite à une nouvelle norme, il est impossible de négocier avec ce dernier pour prolonger la production de l'équipement obsolète.

On voit que les sources de l'obsolescence sont multiples et diverses et sont toutes à considérer lorsque l'on cherche à prévoir les cas d'obsolescence. Mais si ces sources de risques d'obsolescence sont nombreuses, elles aboutissent toutes au même résultat : le fournisseur ne fournit plus le composant original.

1.2.3 Techniques et modes de gestion de l'obsolescence

Pour répondre à ce phénomène de l'obsolescence, il existe diverses techniques de gestion de l'obsolescence. Ces techniques peuvent être utilisées une fois l'obsolescence manifestée (résolution) et d'autres en amont de l'occurrence (mitigation). Ces techniques s'inscrivent dans un mode de gestion de l'obsolescence qui organise ces techniques dans une stratégie globale. Dans un premier temps nous décrivons les différents modes de gestion de l'obsolescence. Nous détaillons ensuite les différentes techniques rapportées dans la littérature pour résoudre et pour mitiger l'obsolescence.

Bartels *et al.* (2012a) établit trois (3) niveaux de gestion de l'obsolescence :

1. **Gestion réactive** : Résolution du cas d'obsolescence une fois manifesté.

2. **Gestion proactive** : Mitigation de l'obsolescence afin de réduire la fréquence d'occurrence ainsi que l'impact de cas d'obsolescence.
3. **Gestion stratégique** : il s'agit d'une approche systémique où l'on considère l'ensemble des cas d'obsolescence sur l'ensemble du cycle de vie de l'appareil pour avoir une approche de résolution globale.

Ces stratégies sont illustrées dans la Figure 1.3.

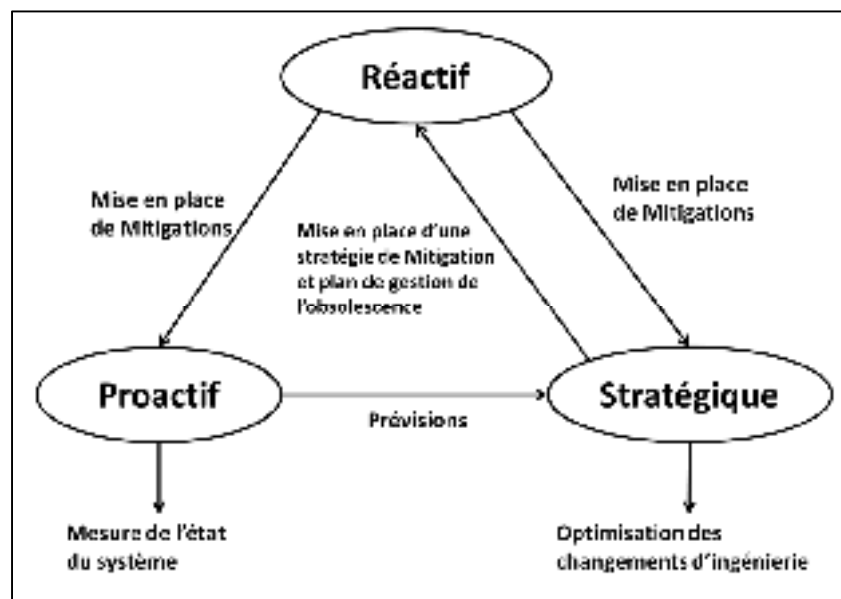


Figure 1.3 Stratégies de gestion de l'obsolescence,
Source : Bartels *et al.* (2012a)

Si une grande partie des auteurs (Bartels *et al.*, 2012b; Rojo, Roy et Shehab, 2010) préconisent la maximisation de la proactivité, le contexte de l'entreprise peut faire que des processus lourds de gestions stratégique de l'obsolescence soient excessifs et trop coûteux par rapport à ce qu'ils apportent (Kidd et Sullivan, 2010). Des facteurs tels que la complexité du composant, la lourdeur des réglementations applicables, ainsi que le niveau de qualité exigé sont tous des facteurs poussant vers une gestion plus proactive. De plus une gestion homogène pour tous les composants n'est pas préconisée. En effet certains composants sont plus susceptibles de devenir obsolètes que d'autres et ont un impact important sur les coûts : ce sont les composants critiques (Rojo, Roy et Shehab, 2010). Les éléments à haute criticité

peuvent susciter une attention particulière (gestion stratégique ou au moins proactive). D'autres, tel que la visserie standard, peuvent être facilement considérés de manière purement réactive. Certains auteurs proposent ainsi une combinaison de réactivité et proactivité afin de prendre en compte la criticité des différents composants du produit (Nelson et Sandborn, 2012; Teunter et Haneveld, 2002).

Dans l'industrie aéronautique, les longs cycles de vie et les exigences de qualité poussent l'industrie à rendre de plus en plus proactive leur gestion de l'obsolescence. Cependant, quel que soit le mode de gestion considéré, celui-ci est composé de techniques de résolution et de mitigation d'obsolescence. Il est impossible de se passer de la résolution de cas d'obsolescence : tout composant à une durée de cycle de vie finie et il est donc nécessaire d'appliquer une technique de résolution de l'obsolescence, c'est-à-dire trouver une solution pour répondre à l'indisponibilité de l'équipement du fournisseur. Il existe des techniques pour mitiger l'impact de l'obsolescence, c'est-à-dire en atténuer l'impact. Ces différentes techniques sont détaillées dans les tableaux suivants (tableaux 1.1 et 1.2). Le lien entre ces techniques et les modes de gestion réactives, proactives et stratégiques sont détaillées dans le

Tableau 1.1. Ces méthodes ont chacune leur avantages et limitations, et ne s'appliquent pas dans tous les cas. Dans l'aéronautique, du fait des exigences en termes de qualité, de certification du produit et de certification des fournisseurs, il n'y a qu'une partie de ces techniques de résolution qui s'appliquent et en particulier les remplacements FFF équivalents, les derniers achats, les achats ponts et les re-conceptions. Les autres sont trop risquées car elles ne permettent pas de maîtriser la provenance de ces composants et d'assurer leur qualité des composants.

Tableau 1.1 Techniques de résolution de l'obsolescence,
Source : Rojo, Roy et Shehab (2010)

Technique de résolution	Description	Avantages et Limitations	
Même Composant	Stocks existants (Existing Stocks)	Trouver des composants en stock au sein des fournisseurs certifiés	Ne nécessite pas de changement d'ingénierie. Souvent en quantité limitée. Solution court-terme. Augmentation possible des prix liée à une forte demande.
	Dernier achat (Last-time Buy)	Acheter le stock nécessaire pour toute la durée de cycle de vie restante auprès du fournisseur.	Ne nécessite pas de changement d'ingénierie. Viable en fin de cycle de vie. Incertitude liée à la prévision de la demande. Doit être approuvé par le fournisseur.
	Achat pont (Bridge Buy)	Acheter le stock nécessaire pour maintenir la production jusqu'à la réalisation d'une solution long terme.	Permet de repousser l'échéance. Ce n'est pas une solution à long terme
	Pièces de rechange (Authorised Aftermarket)	Achats des pièces obsolètes au marché de pièces de rechange du fabricant original.	Ne nécessite pas de changement d'ingénierie. Problèmes de garantie de qualité.
	Pièces détachées (Cannibalization)	Récupération de pièces détachées.	Ne nécessite pas de changement d'ingénierie. Problèmes de garantie de qualité.
Remplacement FFF	Équivalent (Equivalent)	Remplacement par un composant équivalent en termes de forme fonction et paramètre.	Effort de réingénierie limité. Cette solution n'est pas toujours disponible.
	Alternatif (Alternative)	Remplacement par un composant légèrement différent (inférieur) en termes de forme fonction et paramètre.	Cette solution n'est pas toujours disponible. Effort supplémentaires de certification nécessaire. Cette solution est un dernier recours
Émulation (Emulation)	Conception d'une interface logicielle ou physique remplaçant la fonction du composant indisponible.	Efforts importants de réingénierie pour une solution souvent court-terme.	
Re-conception (Redesign)	Réingénierie d'une solution de remplacement au composant/équipement obsolète.	Solution long-terme. Permet d'intégrer des améliorations. Efforts importants de réingénierie et de certification.	

Tableau 1.2 Techniques de mitigation de l'obsolescence,
Source : Rojo, Roy et Shehab (2010)

	Technique de mitigation	Description	Avantages et Limitations
Chaîne d'approvisionnement	Achat de mitigation des risques (Risk mitigation Buy)	Achat de stocks de mitigation du risque d'obsolescence	Permet de limiter l'urgence d'une situation d'obsolescence. Engendre des coûts de stocks supplémentaires.
	Contrat avec le fournisseur	Engagement du fournisseur à prévenir ou à partager la responsabilité de l'obsolescence.	Incite le fournisseur à améliorer sa gestion de l'obsolescence mais ne le garantis pas.
Conception	Modularité/ composants standards	Privilégier des systèmes modulaires et standards pour faciliter le remplacement des composants/équipements obsolètes.	Facilite la réingénierie. Limite la possibilité de différenciation de l'appareil.
	Conception pour l'obsolescence	Intégration du risque d'obsolescence dans le choix de conception.	Alourdit le processus de conception. Mais réduit les impacts de l'obsolescence
Planification	Veille technologique (Technology Roadmapping)	Surveillance des évolutions technologiques et de marchés pour évaluer la santé du composant/équipement face au phénomène d'obsolescence.	Permet d'anticiper l'obsolescence mais ne réduit pas son impact.
	Prévision	Évaluer la durée de cycle de vie restante des composants/équipements.	Constitue une donnée d'entrée des autres techniques de mitigation
	Plan de gestion de l'obsolescence (Design Refresh Planning)	Plan d'action visant à optimiser les réingénieries des systèmes en regroupant des re-conceptions.	Permet des économies sur les efforts de certification. Exige une prévision de l'obsolescence.
	Feuille de route technologique, (Monitoring)	Synchronisation des feuilles de route technologiques avec celles des fournisseurs.	Nécessite la connaissance de la chaîne d'approvisionnement et des feuilles de route technologiques des composants internes.

Tableau 1.3 Technique et mode de gestion de l'obsolescence,
Source : Rojo, Roy et Shehab (2010)

Technique		Mode de gestion			
		Réactif	Proactif	Stratégique	
Technique de résolution	Même Composant	Stocks existants	x	x	x
		Dernier achat	x	x	x
		Achat pont	x	x	x
		Pièces de rechange	x	x	x
		Pièces détachées	x	x	x
	Remplacement FFF	Équivalent	x	x	x
		Alternatif	x	x	x
	Re-conception	Émulation	x	x	x
		Re-conception	x	x	x
Technique de mitigation	Chaîne d'approvisionnement	Achat de mitigation des risques		x	x
		Contrat avec le fournisseur		x	x
	Conception	Modularité/ composants standards			x
		Conception pour l'obsolescence			x
	Planification	Veille technologique		x	x
		Prévision			x
		Plan de gestion de l'obsolescence			x
		Feuille de route technologique			x

L'application de ces techniques est illustrée dans la Figure 1.4. Lorsqu'un composant devient obsolète, une échéance est définie par le fournisseur. Il s'agit de la date de la fin de vie du composant. Cette date est plus ou moins souple selon la possibilité de se procurer du stock (achat-pont, stock existants...) ou de négocier avec le fournisseur. De par les longs cycles de vie, le dernier achat n'est possible que si la fin de cycle de vie est proche et que le fournisseur est en mesure de fournir la quantité nécessaire pour satisfaire la demande. Il faut également que cette solution soit estimée comme rentable après le calcul des coûts associés (cas 3). Si le dernier achat est inenvisageable, on procède à une réingénierie, soit avec un remplacement FFF équivalent de composant, soit avec une re-conception ou émulation de l'équipement au

complet (cas 1). Ces CI peuvent être longs dus aux contraintes de certification et il se peut qu'ils aboutissent après l'échéance. Dans ce cas on négocie un achat-pont afin combler la demande entre l'échéance et l'implémentation du changement (cas 2).

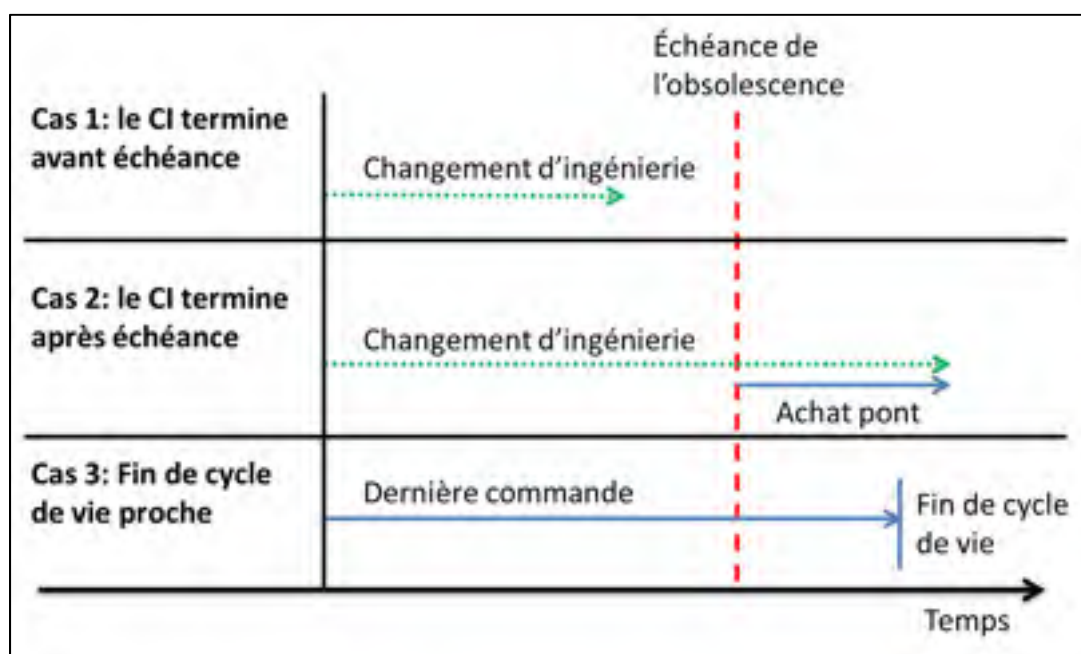


Figure 1.4 Politique de résolution de l'obsolescence

1.2.4 Conclusion sur l'obsolescence

Nous avons donc pu décrire à travers la littérature ce qu'était l'obsolescence, comment cela se manifestait et quelles solutions existaient pour répondre à ces risques et occurrences. Nous avons vu qu'il existait des techniques pour anticiper la fin de vie d'un composant, notamment la re-conception. Ces techniques sont la base d'un mode de gestion de l'obsolescence pouvant se situer entre la gestion purement réactive (une fois le cas avéré) et la gestion stratégique (cas considérés sur l'ensemble du système et de son cycle de vie).

Étant donné le contexte de l'industrie aéronautique avec ses contraintes de qualité, de certification et de longs cycles de vie, nous avons vus que les solutions à long terme les plus récurrentes aux cas d'obsolescence étaient la re-conception ou le remplacement FFF. Ces

techniques se traduisent en CI car elles modifient la conception de l'appareil. Nous sommes donc amenés à nous intéresser aux changements d'ingénierie.

1.3 Changements d'ingénierie dans l'aéronautique

Dans cette section, nous traitons le sujet du changement d'ingénierie que nous étudions dans le cadre de l'obsolescence dans le secteur aéronautique. Après avoir présenté la notion de changement d'ingénieries et ses sources, les différentes classifications de CI seront présentées ainsi que leurs processus d'implémentation.

1.3.1 Généralités

Les définitions trouvées dans la littérature varient légèrement selon les articles et leur contexte mais restent consistantes entre elles. Parmi les plus citées on trouve la définition suivante :

Un changement d'ingénierie est une altération fait à un composant, dessin ou logiciel qui a été publié lors du processus de conception de produit. Le changement peut être de toute taille ou type, peut impliquer n'importe quel nombre de personnes et prendre n'importe quelle quantité de temps.
[Traduction libre] (Jarratt *et al.*, 2011)

Si le terme de changement d'ingénierie est le plus souvent mentionné, on retrouve parfois celui d'ordre de changement (Han, Lee et Peña-Mora, 2011) ou encore celui de changement de conception (Ollinger et Stahovich, 2004). Ces termes, bien que différents sont très proches. L'ordre de changement, par exemple, est produit pour réaliser un changement d'ingénierie ce qui introduira un changement de conception.

Une autre distinction peut se faire sur le contexte du changement. Par exemple, Pulkkinen *et al.* (2015) distinguent deux (2) types de changements d'ingénierie, ceux qui se produisent au sein de projets de développements de produits, appelés changements émergents ou CI de projets (« project engineering changes (pECs) ») et ceux qui se produisent en phase de production, appelés changements initiés ou CI standard (« standard engineering changes

(sECs) » (Clarkson, Simons et Eckert, 2004; Eckert, Clarkson et Zanker, 2004; Jarratt *et al.*, 2011; Shankar, Morkos et Summers, 2012). L'obsolescence se situe parmi les changements initiés.

Les changements d'ingénierie impactent lourdement les entreprises (Jarratt *et al.*, 2011), c'est pourquoi les chercheurs et les entreprises se penchent sur cette problématique et tentent d'établir des processus pour minimiser ces impacts.

1.3.2 Processus de changement d'ingénierie (PCI)

Afin d'assurer une maîtrise des coûts et du temps de ces projets, un processus de changement d'ingénierie (PCI) doit être défini. Il existe plusieurs approches différentes aux multiples problématiques et Shankar, Morkos et Summers (2012) montre qu'une diminution d'un tiers du temps passé par l'ingénierie sur ces projets serait possible.

Il existe de nombreuses descriptions de PCI dans la littérature tentant de rendre le déroulement le plus efficace possible. Dans Jarratt, Clarkson et Eckert (2005) un processus générique basé sur sa revue de littérature est proposé. Six (6) phases communes à la majorité des processus existants y sont distinguées (Figure 1.5).

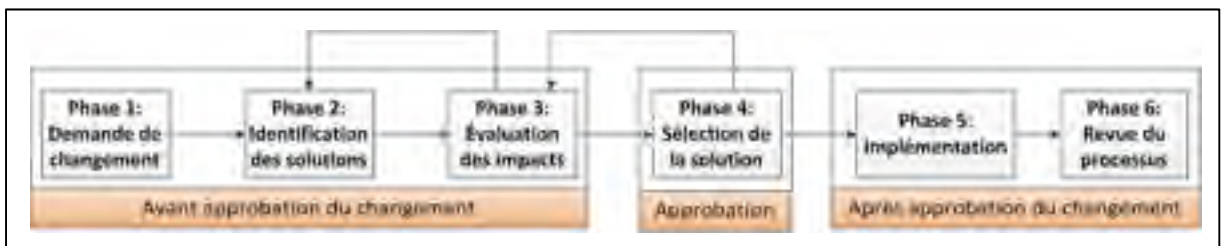


Figure 1.5 Processus de changement d'ingénierie

Source : Jarratt, Clarkson et Eckert (2005)

La première phase est celle de la requête de changement (en anglais « Engineering Change Request » ou ECR). On y décrit le changement, sa raison d'être, ainsi que les répercussions probables de ce changement. Cette phase est critique pour la gestion de la banque de

changements potentiels, l'organisation de ceux-ci, leur priorisation, *etc.* (Fleurent, 2013). Wickel *et al.* (2015) y ajoute la définition de l'objectif du changement. Dans le cas de l'obsolescence, cette étape s'effectue lors de la notification du fournisseur de la modification/fin de cycle de vie de l'équipement si c'est une gestion réactive ou lorsque le changement est considéré adéquat si la gestion est proactive ou stratégique.

La deuxième phase, « identification des solutions », comprend la recherche de solutions potentielles au changement. Il est courant de ne considérer qu'une seule solution. En effet si le changement provient de l'identification d'une solution innovante connue que l'on veut implanter ou dans les cas d'obsolescence où l'on cherche la solution la plus simple et rapide il n'est pas nécessaire de trouver plusieurs fournisseurs. Dans tous les cas, le ou les fournisseurs potentiels sont identifiés et des appels d'offre leur sont envoyés.

La troisième phase est celle de l'évaluation des impacts des solutions considérées. Ces impacts sont ceux de coûts, de temps et de risques. Cela passe par l'identification des déviations possibles et de leurs causes et l'évaluation des effets de ces déviations.

On sélectionne ensuite la ou les solutions que l'on veut développer dans la quatrième phase. Si ces solutions sont satisfaisantes, que des ressources sont disponibles et que le projet est considéré prioritaire, on lance le projet au travers d'un ordre de changement d'ingénierie (en anglais « engineering change ordre, ECO ») et on l'implémente dans la cinquième phase. Celle-ci implique un suivi de l'évolution des performances au long de l'implémentation qui est primordial. Lors de cette phase le(s) fournisseur(s) sélectionné(s) peut (peuvent) être impliqué(s) dans les phases de conception ou de certification, et des ordres d'achats sont envoyés pour le prototypage puis pour la production.

La sixième phase est celle de la révision du processus afin de l'améliorer et de relever les leçons apprises. Une notification de l'effectivité du changement (en anglais « engineering change notification » ou ECN) est alors émise. Wickel *et al.* (2015) montre que si, d'un point de vue macroscopique, les entreprises suivent ce processus, les aspects d'analyse des causes

de déviations en phase de préparation, le suivi de l'évolution des performances lors de l'implémentation ainsi que la révision du processus sont le plus souvent négligés.

Les processus décrits dans la littérature sont concentrés autour de la manière de lancer un projet de changement d'ingénierie et peu autour de son implémentation. La manière dont doit être effectué le changement, apparaît ainsi comme un manque de la littérature. Or le processus doit pouvoir s'adapter à tout type de changement d'ingénierie et son implémentation varie suivant les caractéristiques de changement concernées et les contraintes de l'entreprise.

Dans le cadre de notre étude afin de mettre en place un processus qui prend en compte les spécificités d'un changement d'ingénierie, il nous faut distinguer les différents types de CI.

1.3.3 Types de changements d'ingénierie (CI)

La catégorisation du changement d'ingénierie est un facteur clé dans son traitement. En effet elle impacte directement la manière dont sera traité le problème (Pikosz et Malmqvist, 1998). On trouve dans la littérature plusieurs classifications. Les plus cités sont la classification par urgence (Diprima, 1982; Jarratt *et al.*, 2011; Maull, Hughes et Bennett, 1992), et la classification selon le moment où les changement apparaît dans le processus de conception (Jarratt *et al.*, 2011; Reidelbach, 1991). Ces classifications sont décrites dans les tables suivantes (Tableau 1.4 et Tableau 1.5). La première range les CI selon l'urgence d'implémenter le CI. Il est soit optionnel, obligatoire ou obligatoire et doit être réaliser aussi tôt que possible. La deuxième classe les CI selon leur occurrence dans le processus de conception et différencie les CI qui sont réalisés lors de la conception, lors de la production ou une fois que le produit est livré.

Bien que ces classifications soient utiles pour comprendre les changements d'ingénierie, elles restent trop générales pour distinguer les effets de ces classes sur le PCI.

Tableau 1.4 Classification par urgence des changements d'ingénierie
Source : Jarratt *et al.*, 2011

Classification par urgence	
Immédiat	Ces changements doivent être traités immédiatement et sont souvent liés à des problèmes de sécurité du produit.
Obligatoire	Ces changements doivent être traités mais il existe une certaine flexibilité sur l'échéance
Optionnel	Ces changements sont d'ordre optionnel, ils sont généralement générés car ils apportent une amélioration mais leur traitement est flexible et non-prioritaire

Tableau 1.5 Classification par état de la conception des changements d'ingénierie
Source : Jarratt *et al.*, 2011

Classification par état de la conception	
Tôt, en cours de conception	Ces changements ont généralement moins d'impact
En cours de production	Ces changements apparaissent alors que les commandes aux fournisseurs ont déjà été faites pour lancer la production.
Tard, produit livré	Ces changements ont généralement le plus fort impact s'il est critique

Dans le cas de l'aéronautique, il existe une classification du changement selon sa criticité pour le fonctionnement de l'appareil (avec des niveaux d'exigences associés), dont on peut déduire la charge de travail pour obtenir la certification de ce changement (RTCA, 2000; 2011; TCCA, 2004). Cette classification sera présentée en détail dans la section suivante. Cette classification présente deux (2) limitations. Premièrement, elle ne comprend que les aspects de certification, laissant de côté ceux de conception dont l'amplitude du travail à fournir est non négligeable. Si la certification est d'autant plus exigeante que le changement touche à des composants critiques pour le fonctionnement de l'appareil (l'échec de ce

composant entraîne l'échec de l'appareil), la conception, elle, dépend surtout de la complexité technique du changement, définie par la quantité de dépendances aux composants qui l'entourent, sans nécessairement être critique pour le fonctionnement de l'appareil (Eckert, Clarkson et Zanker, 2004). Il s'agit toutefois d'une classification utile et qu'il paraît important de détailler.

1.3.4 Contrainte principale du processus de changement d'ingénierie : la certification de navigabilité

Dans le secteur aéronautique, la certification navigabilité est une étape obligatoire qui nécessite de nombreux tests induisant des coûts et des délais importants. Des normes strictes définissent les performances ainsi que les exigences de démonstrations de ces performances.

Au Canada, l'autorité de certification est l'agence gouvernementale Transport Canada pour l'Aviation Civile (TCCA) (<https://www.tc.gc.ca/eng/civilaviation/menu.htm>). Celle-ci délivre les certificats de navigabilité ainsi que des délégations aux entreprises manufacturières. Cet organisme possède des équivalents pour l'Europe, l'Agence Européenne de la Sécurité Aérienne (EASA) et pour les États-Unis, Administration Fédérale de l'Aviation (FAA). Bien qu'indépendantes, ces autorités se reconnaissent entre-elles (TCCA, 2015c).

Ces autorités définissent des spécifications techniques auxquelles doivent répondre les appareils afin d'obtenir le certificat de navigabilité (TCCA, 2015b). Ce sont ces certificats de navigabilité qui constituent la principale contrainte des manufacturiers de l'aéronautique dans le cadre d'un changement d'ingénierie. Cette certification est délivrée par une autorité gouvernementale qui impose une conformité face à ces normes. Une certification préliminaire peut être réalisée par le fournisseur (et approuvée par l'autorité), démontrant le bon fonctionnement de l'équipement seul. Il s'agit de la qualification et se traduit par un certificat TSO (de l'anglais « Technical Standard Order »). La certification se distingue de la qualification en cela qu'elle désigne la démonstration du bon fonctionnement de l'équipement au sein de l'appareil. La certification se traduit par un certificat de navigabilité.

L'entreprise partenaire (EP), en tant qu'entreprise manufacturière d'appareils aéronautiques a une délégation d'autorité pour vérifier la conformité aux exigences de certification. Cette délégation d'autorité est assumée par des délégués de certification (DC), représentant l'autorité au sein de l'entreprise. L'autorité exige en contrepartie un document définissant les procédures d'approbation de conception appelé DAPM (de l'anglais, « Design Approval Procedures Manual »). Ce document, approuvé par l'autorité de certification, définit l'ensemble des procédures suivies pour répondre aux exigences définies par les autorités de certification. Conforme à la norme AMW 505E de TCCA (TCCA, 2015a), ce document décrit les limites de délégation de pouvoir, ainsi que le processus de vérification de la conformité aux normes. La Figure 1.6 illustre le processus de certification qui se réalise en quatre (4) étapes :

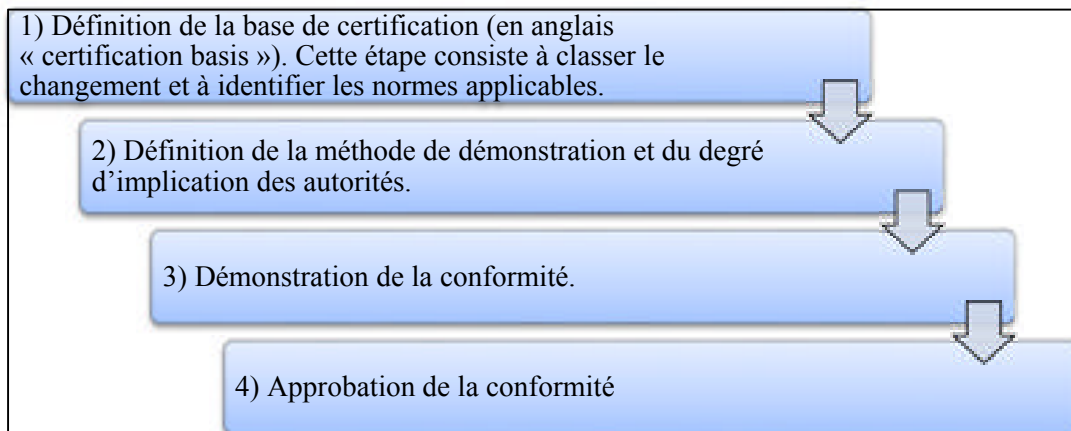


Figure 1.6 Processus de certification du DAPM de l'EP

La première étape, dans laquelle on définit l'importance du changement, influe énormément sur la charge de travail à fournir. Le changement peut être mineur ou majeur. Un changement est majeur s'il a un impact non négligeable sur la navigabilité de l'appareil. Les changements majeurs sont divisés en trois (3) classes (Figure 1.7). Si le changement est de routine, il est de classe 3. Sinon, il est de classe 1 si le changement est complexe ou extensif, ou de classe 2 sinon.

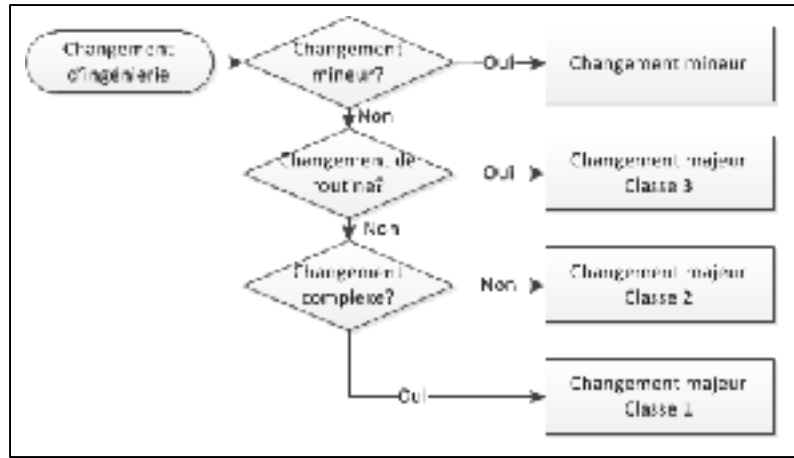


Figure 1.7 Processus de détermination de la classe du CI,
Source : TCCA (2015a)

Le Tableau 1.6 récapitule les exigences pour les différentes classes de changement.

Tableau 1.6 Classes de changement et processus de certification

	Phase 1 : Base de Certification	Phase 2 : Méthode de démonstration	Phase 3 : Démonstration	Phase 4 : Approbation
Mineur	Déterminé et approuvé par l'organisation d'approbation de conception (DAO)	N/A	SoC	N/A
Majeur Classe 3		PSoC ou SoC	FoC	Par DC ou autorité
Majeur Classe 2		PSoC et LOI	FoC	Par DC ou autorité
Majeur Classe 1		CP, LOI	FoC	Par DC ou autorité

DC : délégué de certification
PSoC (de l'anglais « Proposal Statement of Compliance ») : proposition de méthode de démonstration de conformité
SoC (de l'anglais « Statement of Compliance ») : démonstration de conformité
FOC (de l'anglais « Finding of Compliance ») : démonstration de conformité
LOI (de l'anglais « Level Of Involvement ») : Décrit le niveau d'implication des autorités.

Deux (2) différences entre ces classes de changement se remarquent. Premièrement, l'implication des autorités diffère. Selon les classes, l'autorité peut ne pas être impliquée du tout (changement mineur) ou peut être impliquée à chaque étape du processus (majeur, classe 1). Ce niveau d'implication est déterminé dans le document Niveau d'implication (de l'anglais « level of involvement », LOI). Intrinsèquement aux classes, il existe des

spécifications propres aux cas de changement pour l'étendue de l'implication des autorités. Cette implication varie de l'approbation de documents à la participation aux tests.

Deuxièmement, la justification de la méthode choisie pour la démonstration de conformité varie. Les changements de classe 1 nécessitent une justification complète des méthodes de démonstrations décrites dans un plan de certification, les changements majeurs de classes inférieures justifient ces choix plus succinctement dans un PSoC et les changements mineurs ne nécessitent pas de justification car, n'ayant pas d'effet sur la navigabilité, il n'y a pas de démonstration à faire.

La phase de démonstration de conformité est celle qui contient le plus d'activité et son contenu dépend de la nature du changement et des méthodes de démonstrations décidées dans la phase précédente. La validité des conceptions sont à démontrer vis-à-vis de deux (2) normes applicables respectivement aux logiciels et aux composants électroniques complexes (CEH) provenant de l'organisme RTCA et reconnue par les principales autorités de certification (dont TCCA), DO-178C et DO-254 (RTCA, 2000; 2011). Ces normes définissent un niveau de criticité allant de A à E pour les logiciels et les composants électroniques complexes. Ces niveaux de criticité imposent un nombre de livrables à fournir ainsi qu'un taux de défaillance maximal. Les objectifs peuvent être exigés avec indépendance, c'est-à-dire qu'ils doivent être validés par un organisme indépendant. Le tableau ci-après donne ces nombres en fonction de cas (Tableau 1.7). Plus la criticité du composant est importante, plus le nombre d'objectifs à atteindre pour s'assurer de la qualité du composant est grand. Il varie de 71 à 0 pour les classes allant de A à E.

La norme DO-160 (RTCA, 2007) quant à elle définit les environnements de tests auxquels les équipements embarqués doivent être confrontés.

Au vu de l'importance de ces normes, la prise en compte des certifications est essentielle dans le cadre d'un changement d'ingénierie dans l'aéronautique. Si ce n'est pas le seul facteur à prendre en compte, il ne reste pas moins l'un des principaux.

Tableau 1.7 Objectifs à atteindre selon le niveau de criticité de l'équipement (RTCA, 2011)

	Niveau de criticité (DO-178C)				
	A	B	C	D	E
	Catastrophique	Hasardeux	Majeur	Mineur	Pas d'effet
Nombre d'objectifs	71	69	62	26	0
Objectifs validés avec indépendance	30	18	5	2	0
Taux de défaillance maximal (nb par heure)	10^{-9}	10^{-7}	10^{-5}	10^{-3}	N/A

1.3.5 Conclusion sur les changements d'ingénierie dans l'aéronautique

Un changement d'ingénierie en aéronautique est un processus complexe qui a des implications importantes notamment en termes de temps et de coût. La soumission des composants à des contraintes de certification est un élément majeur de cette complexité.

Pour éviter que l'obsolescence perturbe la production, il est important d'intégrer le changement d'ingénierie dans un processus d'affaires qui permet d'anticiper l'obsolescence d'un composant. Cette notion de processus sera examinée dans la section suivante.

1.4 Modélisation de processus d'affaires

1.4.1 Généralités

La nécessité d'adapter l'organisation des entreprises aux besoins évolutifs de l'entreprise est reconnu depuis plus de 50 ans (Ackoff, 1962). Les organisations sont ainsi passées d'une organisation par fonction à une organisation par processus. Cependant, ce domaine de recherche connaît un essor depuis 25 ans environ. Cela provient de la complexité de plus en plus marquée des entreprises, de leurs organisations et de leurs produits.

Les définitions de processus d'affaire sont relativement consistantes entre elles au sein de la littérature. Nous avons choisi de prendre celle donnée dans Hammer et Champy (1993) car elle fait partie des plus citées et cerne le concept dans sa globalité :

Un processus d'affaire est une collection d'activités qui prend une ou plusieurs entrées et qui crée en sortie quelque chose qui a de la valeur pour le client. Un processus d'affaires a un objectif et est impacté par des événements externes ou par d'autres processus. [Traduction libre] (Hammer et Champy, 1993)

Pour étayer cette définition, Aldin et de Cesare (2011) définissent les principaux éléments d'un processus comme étant:

- Le processus : série d'activités d'activité d'évènements qui sont liés par des règles afin de réaliser un but sous forme de livrable, tangible (produit) ou non (service).
- Les activités : ensembles des tâches réalisées par une organisation.
- Service et produit : la finalité observable du processus. Elle peut être tangible (produit) ou non (service).
- Rôle : les types d'acteur œuvrant au sein du processus.
- But : finalité du processus.
- Évènement : occurrence qui se produit à un moment défini et qui engendre la poursuite d'activités.
- Règles : contraintes régissant le processus.

Dans Mili *et al.* (2010), un méta-modèle des concepts de processus est proposé (Figure 1.8). Cette figure représente l'architecture d'un processus. Celui-ci est composé d'activités, qui sont réalisées par des rôles tenus par des acteurs. Ces acteurs font partie d'organisations qui remplissent des fonctions. Les activités qui constituent un processus sont déclenchées par des événements, en déclenchant à leur tour, et consomment/génèrent des ressources.

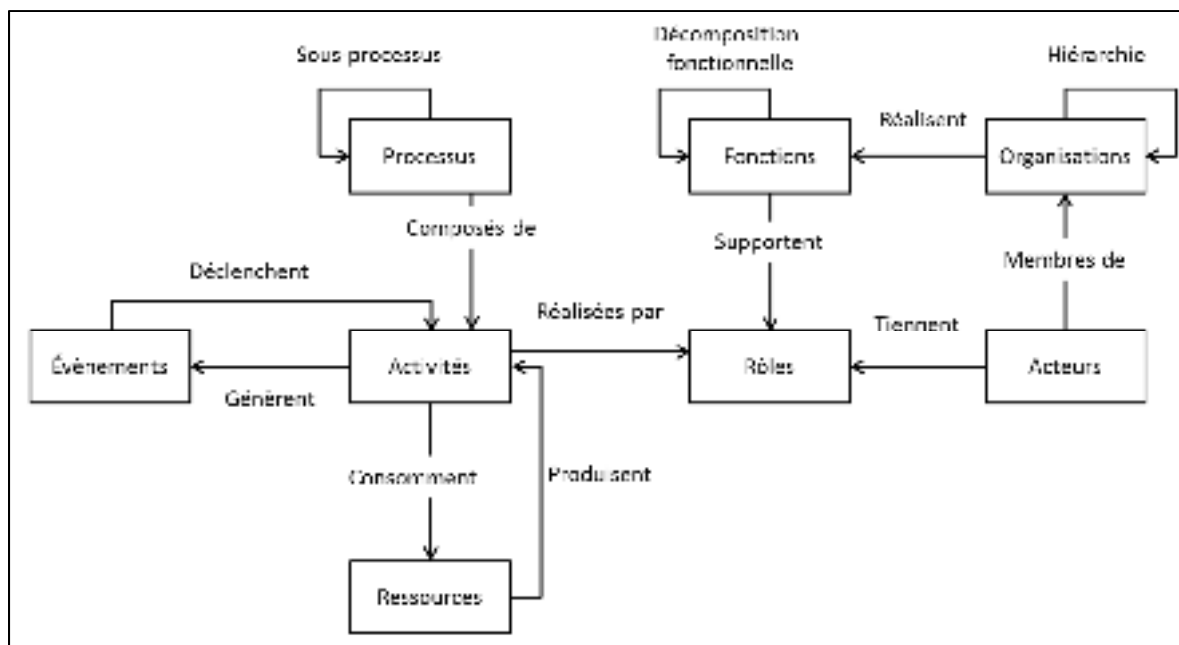


Figure 1.8 Méta modèle du processus
Source : Mili *et al.* (2010)

Diverses méthodes de modélisation ont été développées pour essayer de répondre au mieux aux différents besoins que peuvent avoir les industries. Elles sont présentées dans la section suivante.

1.4.2 Méthodes de modélisation de processus d'affaire

La littérature est très riche dans le domaine des méthodes de modélisation de processus et il est par conséquent difficile de décrire l'ensemble des outils, méthodes et langages développés. De plus, il y a des outils qui se sont largement imposés comme références par rapport à d'autres, que ce soit dans les citations d'auteurs ou dans leur utilisation au sein des entreprises. Nous avons donc fait le choix de limiter notre travail aux principales références dans le domaine. Dans cette section nous présentons les techniques les plus utilisées pour la modélisation de processus d'affaires. La qualité des modèles sera ensuite étudiée.

D'un point de vue terminologique, la littérature n'est pas homogène. Les termes d'outil, de technique, de méthode et de langages ne sont pas définis ou délimités. Le terme de méthode de modélisation est adopté ici pour faire référence aux différents éléments de cette littérature.

Méthode SIPOC

Tout d'abord, pour modéliser le processus dans son ensemble, la méthode SIPOC (en anglais « Supplier, Input, Process, Output, Customer ») est très utilisée. Elle permet de capter en une seule image les tenant et aboutissants du processus, les acteurs clés (fournisseurs et clients) ainsi que le déroulement des activités dans les grandes lignes (Figure 1.9). Cet outil est notamment utilisé pour l'analyse des besoins dans la méthode 6sigma (Tetteh et Uzochukwu, 2015).

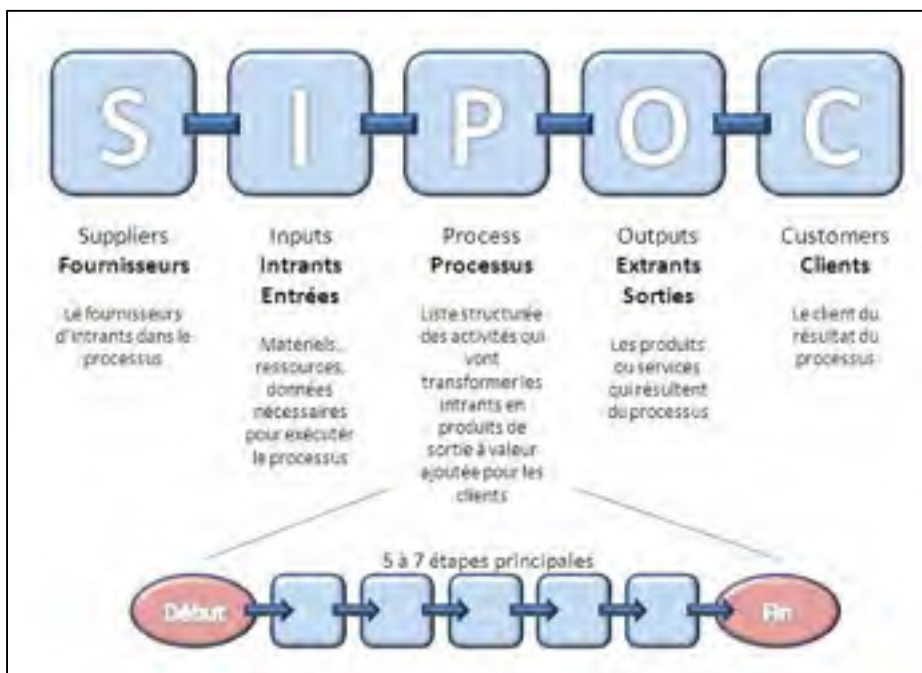


Figure 1.9 Diagramme SIPOC

Diagramme de flux

Pour une modélisation plus détaillée, les diagrammes de flux (en anglais « flowchart ») font partie des méthodes les plus anciennes et les plus utilisées pour la modélisation de processus. Il s'agit d'une représentation graphique formalisée ou non de la séquence des activités d'un processus. Des formes diverses permettent de modéliser les différents concepts (activité,

décision, information, évènement, *etc.*). Facile d'utilisation et de prise en main, cette méthode est très largement utilisée pour la description de processus d'un point de vue fonctionnel. Du fait de sa flexibilité et de sa simplicité, il s'agit d'un outil de communication privilégié. Cependant, cette méthode s'adapte mal à la complexité et au détail. Les liens avec les acteurs, ou les livrables sont souvent sous-entendus. Cette technique est donc principalement utilisée pour des processus de haut niveau.

Le diagramme de flux croisé (Figure 1.10) est une variante de cette méthode et structure les activités selon les acteurs qui les réalisent.

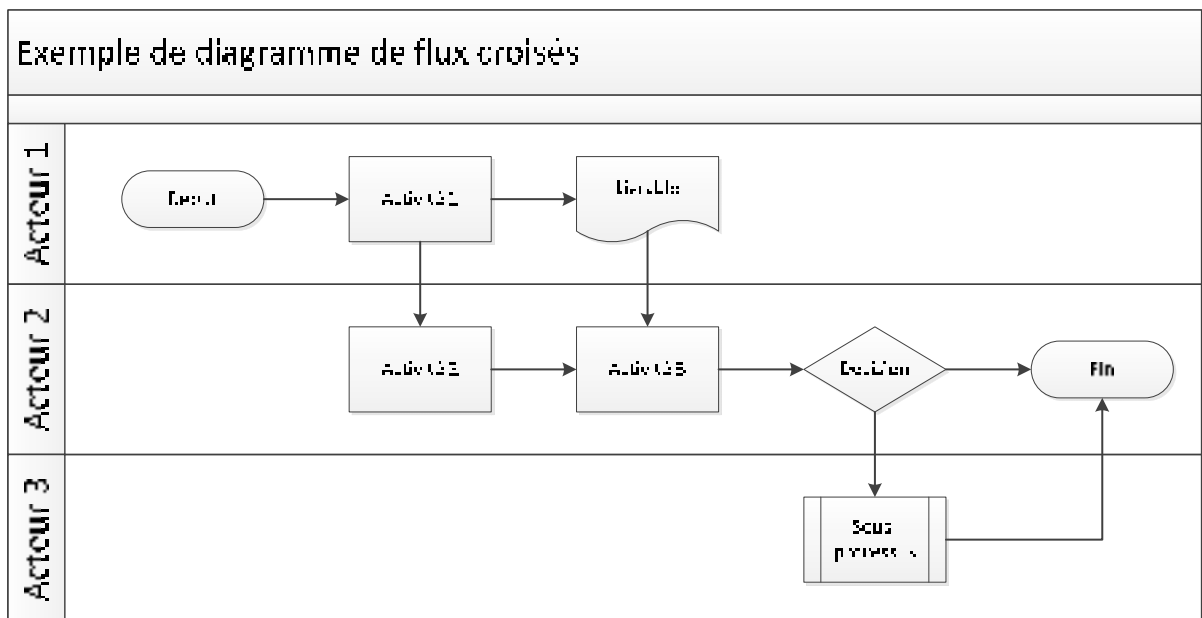


Figure 1.10 Exemple de diagramme à flux croisés

DSM

Il existe également des méthodes centrées autour des livrables tel que le **DSM** (en l'anglais, « Design Structure Matrix »). Il s'agit d'une méthode de représentation matricielle du processus. Cette représentation se concentre sur les dépendances entre ces livrables et activités.

Les livrables et activités (éléments) constitutifs du processus représentent les lignes et colonnes d'une matrice carrée. L'intérieur de la matrices est remplie avec les dépendances entre ces livrable. Cette méthode permet de représenter les itérations nécessaires. Pour chaque colonne, on place une marque dans chaque ligne qui représente un élément qui est une donnée d'entrée à l'élément de la colonne.

Un exemple est illustré Figure 1.11. Dans cet exemple, l'élément B à pour données d'entrée l'élément A ainsi que l'élément E. Au travers de ces dépendances on identifie les cycles de conception.

· B est une entrée de D
 · D est une entrée de E.
 · E est une entrée de B
 On observe ainsi un une boucle d'itérations

	A	B	C	D	E	F	G
Element A	A	1				1	
Element B		B		1			
Element C	1		C				1
Element D				D	1		
Element E		1			E	1	
Element F			1			F	
Element G	1				1		G

Figure 1.11 Exemple de DSM

Cette méthode est propice à l'analyse des cycles de processus et à la simulation (Levardy et Browning, 2009).

IDEF

Dans le contexte d'un processus étoffé, aux multiples problématiques et enjeux, La famille de langage **IDEF** est une famille adaptée. Il s'agit d'une famille de méthodes, orienté fonctionnalité qui permet de répondre à un besoin de définition détaillée d'un processus. Les

deux (2) membres qui concernent la modélisation de processus sont le **IDEF0** et le **IDEF3** (Mili *et al.*, 2010).

Le IDEF0 sert à décrire le fonctionnement d'un système, en reliant les fonctions du système par des flèches représentant des flux de données. Une structure hiérarchique permet de décomposer les différentes fonctions en sous fonctions qui sont elles aussi reliées entre elles. Il est évident que cette technique prend le point de vue fonctionnel et a une fonction de description du processus.

Le IDEF3 sert à modéliser le point de vue dynamique du système. Il permet de modéliser les scénarios possibles ainsi que les acteurs en jeu, le séquençement des activités et les contraintes de l'environnement.

Il permet ainsi la description du processus mais également son analyse du fait du langage complet qu'il utilise. Bien que ces méthodes soient utilisées pour décrire un processus, leur complexité en fait plus des outils d'analyse que des outils de description.

RID et RAD

D'autres méthodes se concentrent sur les ressources et les placent au centre des processus en modélisant les interactions entre ces acteurs. C'est le cas des méthodes de Diagramme rôle activité (en anglais « Role Activity Diagrams », ou **RAD**) (Figure 1.13) et diagramme d'interaction des rôles (en anglais « Role Interaction Diagrams » ou **RID**) (Figure 1.12) (Mili *et al.*, 2010). Ces méthodes sont adaptées pour la description mais aussi l'analyse tel que proposé par Ould (1995), en combinant de la simulation avec de l'optimisation.

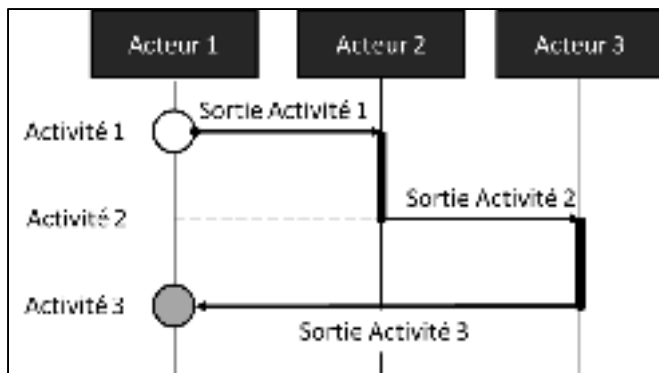


Figure 1.12 Exemple de RID

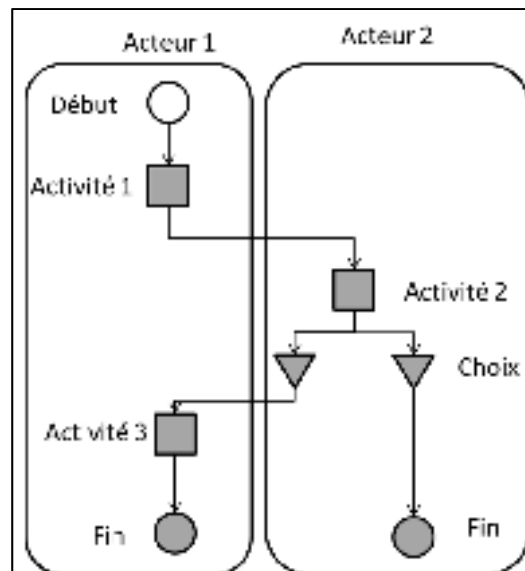


Figure 1.13 Exemple de RAD

1.4.3 Cadre Conceptuel de Qualité du modèle

Il est important de dissocier la qualité d'un processus et celle de son modèle. Bien que, et ce en particulier avec la vague d'intégration du modèle de processus dans la gestion, la qualité du modèle peut impacter celle du processus, il s'agit bien de deux (2) notions différentes. Dans le cadre de cette étude, un modèle de processus a été établi et il paraît donc important de s'intéresser à la qualité de ce modèle.

Pour faire le bon choix de méthode de modélisation, il faut comprendre quelle est la qualité visée, comme le relate les principaux cadres conceptuels sur la qualité de modèles conceptuels. Les cadres principaux sont le BWW, du nom de ses auteurs, (Wand et Weber, 1990), le LSS, également du nom de ses auteurs, (Lindland, Sindre et Solvberg, 1994) et le cadre de travail de qualité de modèles conceptuels (en l'anglais, « Conceptual Modeling Quality Framework », CMQF) (Nelson *et al.*, 2012). Ces cadres sont très souvent cités dans la littérature (de Oca *et al.*, 2015).

Le cadre de travail le plus abouti, le CMQF, combine les deux (2) plus importants, le BWW le LSS. Il est donc considéré comme le plus complet et le plus vérifié car il bénéficie de la

validité de chacun des cadres qui ont pu évoluer au fil des contributions d'auteurs. Il combine ainsi le point de vue produit de la modélisation (modèle) du LSS et celui de processus de modélisation du BWW et remplit les manques des deux (2) cadres (de Oca *et al.*, 2015). Le CQMF permettant de regrouper en un seul cadre le LSS et le BWW, ce sera le seul discuté ici. Ce cadre de travail s'étend à tout ce qui se rattache à la modélisation de concepts et donc à la modélisation de processus (Nelson *et al.*, 2012).

Le cadre de travail CMQF décompose la modélisation en deux (2) parties : la réalité et la perception (de l'utilisateur du modèle). Chaque partie se décompose à son tour en quatre (4) couches (Figure 1.14):

1. Le domaine;
2. Le modèle;
3. Le langage;
4. La représentation.

Entre ces huit (8) aspects, on peut tracer des arcs qui représentent des critères de qualité. En effet, le degré de conservation de l'information au passage d'un aspect de référence à un aspect d'intérêt (comme par exemple entre le domaine physique et la connaissance de ce domaine) correspond à un aspect de la qualité (la qualité de la connaissance du domaine). Ce cadre de travail est représenté Figure 1.14.

Par exemple, entre le domaine physique et la représentation physique, on définit la qualité sémantique qui correspond à l'adéquation de la représentation au domaine. La qualité du modèle est ainsi décomposée en plusieurs notions (schématisées par de types de flèches) appelées couches dans le cadre de travail CMQF : la couche physique (flèches vertes pleines), la couche de connaissance (flèches oranges, pointillés larges), la couche de l'apprentissage (flèches bleues, pointillés alternés) et la couche de développement (flèches rouges, pointillés fins). L'ensemble des notions de qualités de ce modèle sont détaillés en ANNEXE I.

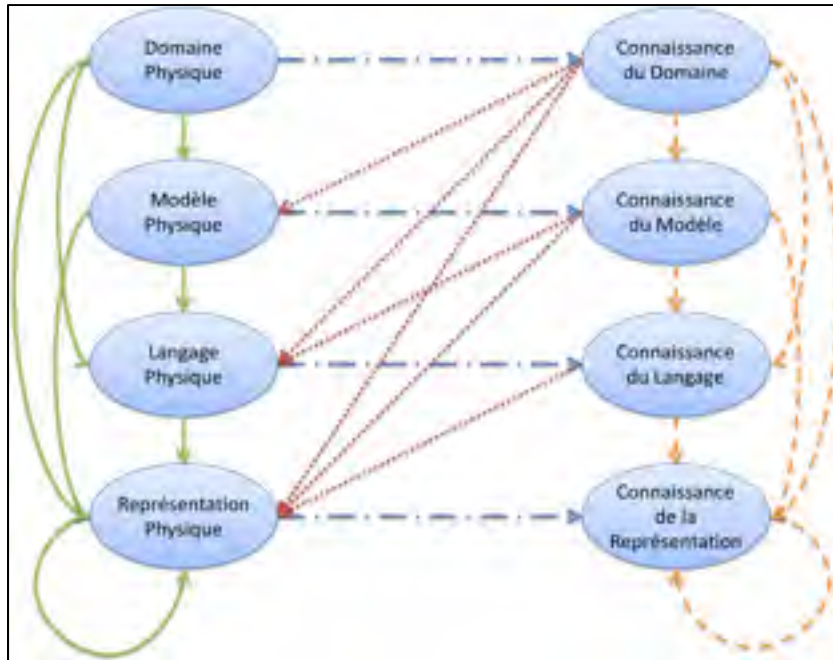


Figure 1.14 Cadre conceptuel de qualité du modèle CMQF
Source : Nelson *et al.* (2012)

Le principal défaut de ce cadre est le manque de validité de certains aspects de qualité qui ne sont pas utilisés par les concepteurs. Dans une étude de la notion de qualité dans la modélisation de processus, les similarités et différences entre les mesures de qualité (et leur terminologies) dans la pratique sont tracées (de Oca *et al.*, 2015). Les résultats montrent l'absence de certaines notions citées ci-dessus, notamment dans les couches de la connaissance et du développement. Cela manifeste le besoin d'un travail de recherche pour définir des méthodes et outils permettant la mesure de ces facteurs de qualité. Cependant ce modèle reste le plus complet de la littérature et permet de décomposer la qualité en caractéristiques bien précises.

1.5 Conclusion et analyse critique de la littérature à la lumière du projet

Au travers de cette revue de la littérature il a pu être établi que la gestion de l'obsolescence se réalise au travers des techniques de mitigation et de résolution des cas d'obsolescence. Étant donné la particularité du secteur aéronautique, il n'y qu'une partie de ces techniques qui s'appliquent. Généralement, un changement d'ingénierie est nécessaire pour répondre à

l'obsolescence du composant. En effet, les longs cycles de vie des appareils aéronautiques rendent l'achat de stock inenvisageable à long terme pour une grande partie des cas rencontrés.

Les tentatives de classer les CI sont restées dans un objectif de décrire les CI, sans chercher à les lier à leur implémentation. Des modèles du PCI existent mais se concentrent sur les phases d'approbation (phases 1 à 4) du changement d'ingénierie et ne rentrent pas dans le détail de la réalisation du changement. Dans l'industrie aéronautique, cette phase d'implémentation (phase 5) est dominée par la contrainte de certification qui impose de nombreuses preuves de conformité à des normes strictes.

Pour comprendre ou analyser ce processus, de nombreuses méthodes de modélisation existent pour répondre aux différents points de vue recherchés (activité, ressources, dépendance des livrables, *etc.*), ou la finalité du modèle (compréhension, analyse ou automatisation).

Pour maîtriser le PCI, il faut être capable de le planifier. La liste des livrables à fournir est une composante de cette planification. On constate dans la revue de la littérature que les modèles de PCI existants ne détaillent pas la phase d'implémentation ni l'influence des caractéristiques du CI sur les éléments du processus. Le lien entre livrables du PCI et les caractéristiques du changement est la piste de recherche pour la maîtrise du PCI que ce travail se propose de suivre.

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre a pour objectif de développer et préciser les choix méthodologiques de recherche employés dans ce projet. La première section présente la science de la conception et la raison du choix de la méthodologie associée. Dans la première section nous détaillons la stratégie de recherche suivie. Les méthodologies des activités sont détaillées dans les sections suivantes.

2.1 Méthodologie générale de l'étude

La méthodologie générale de ce travail est celle dictée par la science de la conception. Citée pour la première fois par HA Simon dans son livre *The Sciences of the Artificial* (Simon, 1969), cette science est une méthode de recherche scientifique basée sur un processus itératif de conception. Cette science se focalise sur la conception de solutions à des problématiques industrielles.

Étant donné que notre travail a été motivé par une demande de notre entreprise partenaire de l'accompagner dans la résolution de certaines de ses difficultés, l'approche de la science de la conception a parue évidente. Dans les sous-sections suivantes nous décrivons dans un premier temps les concepts constituant la science de la conception. Les caractéristiques relevées seront ensuite rapprochés de la problématique de ce travail pour en justifier l'utilisation.

2.1.1 Principes généraux de la science de la conception

La science de la conception provient d'un besoin de créer une science dédiée à l'apport de solution. L'objectif est de fournir une solution à un problème défini. Cette solution s'appuie sur deux (2) piliers, d'un côté le contexte dans lequel la solution s'applique et de l'autre la littérature avec ses théories existantes. Cette méthode permet de contribuer à la validation des

théories ainsi qu'à l'élaboration de nouvelles hypothèses. Von Alan *et al.* (2004) illustre l'essence de cette science dans la Figure 2.1.

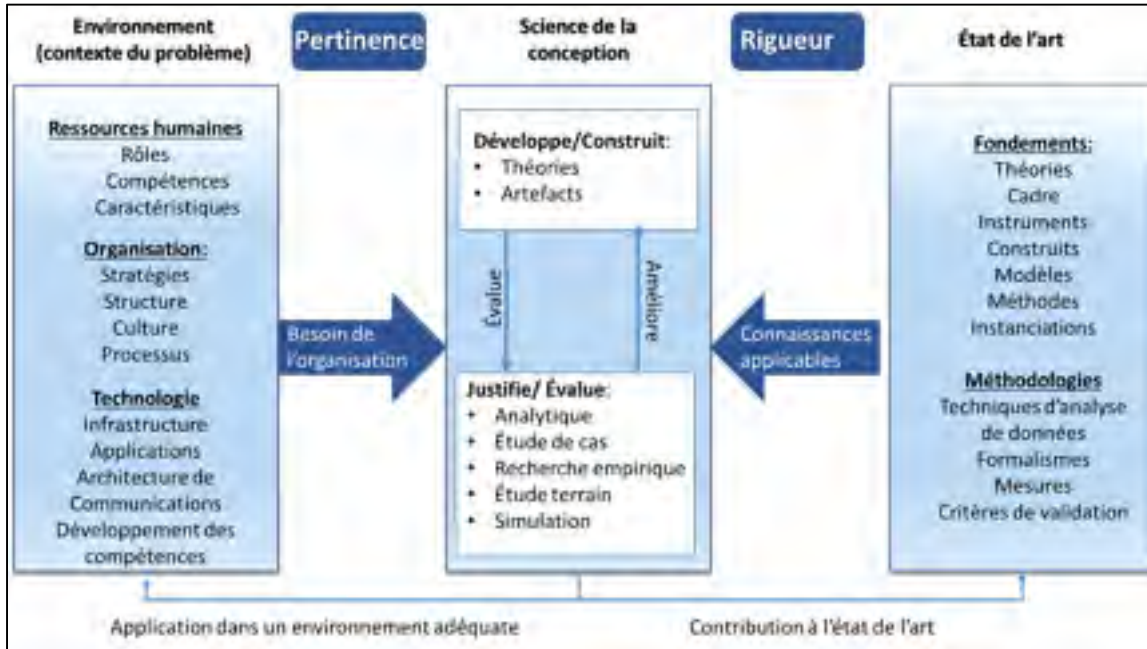


Figure 2.1 Illustration de la science de la conception
Source : Von Alan *et al.* (2004)

L'objectif de cette science est de renforcer les connaissances d'un problème spécifique, de développer de nouvelles méthodes de résolution, de résoudre ces problèmes spécifiques et de créer de nouveaux outils (Dresch, Lacerda et Antunes Jr, 2015).

Le concept d'artéfact est central. Il s'agit d'un outil, tangible ou non, permettant d'atteindre l'objectif de recherche fixé. Il constitue la finalité de la recherche.

Dans le cadre de la science de conception, il n'y a pas nécessairement de recherche de solution optimale. Une approche plus pragmatique est adoptée qui tend vers une solution simplement satisfaisante.

En plus de la notion de validité externe (la solution est applicable hors du cadre de recherche) et interne (les résultats valident les conclusions de la recherche), s'ajoute la notion de validité pragmatique (Dresch, Lacerda et Antunes Jr, 2015). Il s'agit de s'assurer que la solution trouvée soit utile (elle répond à une problématique réelle), et utilisable (elle est réellement applicable).

2.1.2 Méthodologie générale de la science de la conception

Il existe de nombreuses descriptions de la méthodologie générale de la science de la conception (Dresch, Lacerda et Antunes Jr, 2015). Dans l'ensemble elles sont très similaires et on y retrouve les principales étapes :

- identification du problème;
- sélection de solutions;
- évaluation de la solution choisie;
- conclusion.

La Figure 2.2, adaptée de Vaishnavi et Kuechler (2015), a été sélectionnée pour sa clarté afin d'illustrer les étapes.

Il s'agit d'un processus itératif d'évaluation et modifications des artefacts. Ces cycles de conceptions permettent d'améliorer la connaissance du problème ainsi que celle des concepts appliqués au problème.

2.1.3 Justification de l'adoption de la science de la conception : critères d'application

En reprenant les spécificités de la science de la conception décrites par Von Alan *et al.* (2004), le tableau suivant détaille l'adéquation d'une approche par la science de la conception dans le cadre de ce projet (Tableau 2.1).

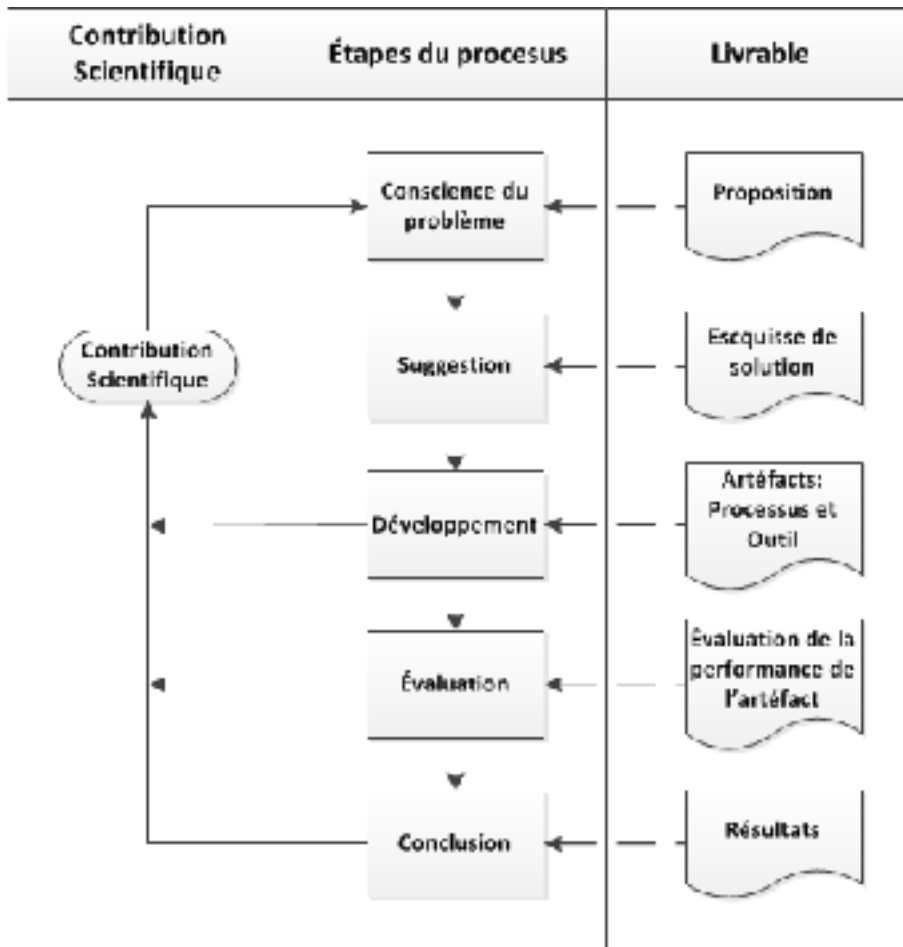


Figure 2.2 Méthodologie de la science de la conception,
Source : Vaishnavi et Kuechler (2015)

Ce tableau illustre que la méthodologie de la science de la conception est pertinente comme approche au sujet traité. Nous l'adoptons pour répondre à la problématique de l'EP.

Tableau 2.1 Application des critères de la science de la conception dans le cadre de ce projet.

Source : Von Alan *et al.* (2004)

#	Critères	Description du critère	Adéquation du projet à ce critère
1	Création d'un artéfact	La science de la conception est orientée vers une solution concrète à un problème concret. La recherche doit donc nécessairement conclure par un artéfact.	La demande de l'EP est de répondre à cette problématique avec un outil opérationnel.
2	Problème spécifique	La solution recherchée doit nécessairement correspondre à un problème concret et avéré par une organisation.	Le problème traité est celui de notre entreprise partenaire.
3	Évaluation de l'artéfact	L'utilité de l'artéfact doit être justifiée	L'entreprise partenaire évaluera l'utilité de l'outil développé.
4	Contribution à la recherche	La recherche menée doit démontrer sa contribution dans le domaine spécifique de son application	La problématique de ce travail contribuera à la caractérisation des CI dans le cadre de l'obsolescence en aéronautique ainsi qu'à la modélisation de son processus.
5	Rigueur de la recherche	Que ce soit pour la réalisation ou l'évaluation de l'artéfact, des méthodes scientifiques rigoureuses doivent être appliquées	Voir la méthodologie décrite dans les sections suivantes.
6	La conception en tant que processus de recherche	La recherche doit être menée afin de mieux comprendre le problème traité et de découvrir de nouvelles méthodes de résolution de problèmes.	Ce problème spécifique n'est pas traité dans la littérature et permet de mieux comprendre comment s'applique le CI dans le cadre de l'obsolescence.
7	Communication de la recherche	La recherche doit être présentée à une audience orientée technologie mais aussi à une audience orientée gestion.	Ce travail est mis à disposition dans la base de données de l'université.

2.2 Stratégie de recherche

2.2.1 Stratégie générale

Comme énoncé en conclusion de la revue de la littérature, la piste de recherche suivie dans ce projet est la liaison des caractéristiques des CI aux livrables du PCI. Pour cela nous avons décidé de procéder de la manière suivante (Figure 2.3). Dans un premier temps, un effort de modélisation du PCI permettra d'identifier la liste exhaustive des livrables du PCI. Ensuite, pour chaque livrable, le critère d'applicabilité sera étudié. L'ensemble des critères d'applicabilité des livrables du PCI sont ensuite analysés et regroupés de manière à obtenir une liste réduite de critères d'applicabilité correspondants aux caractéristiques des CI. L'outil développé permettra ainsi de sélectionner l'ensemble des livrables du PCI à partir des caractéristiques du CI.

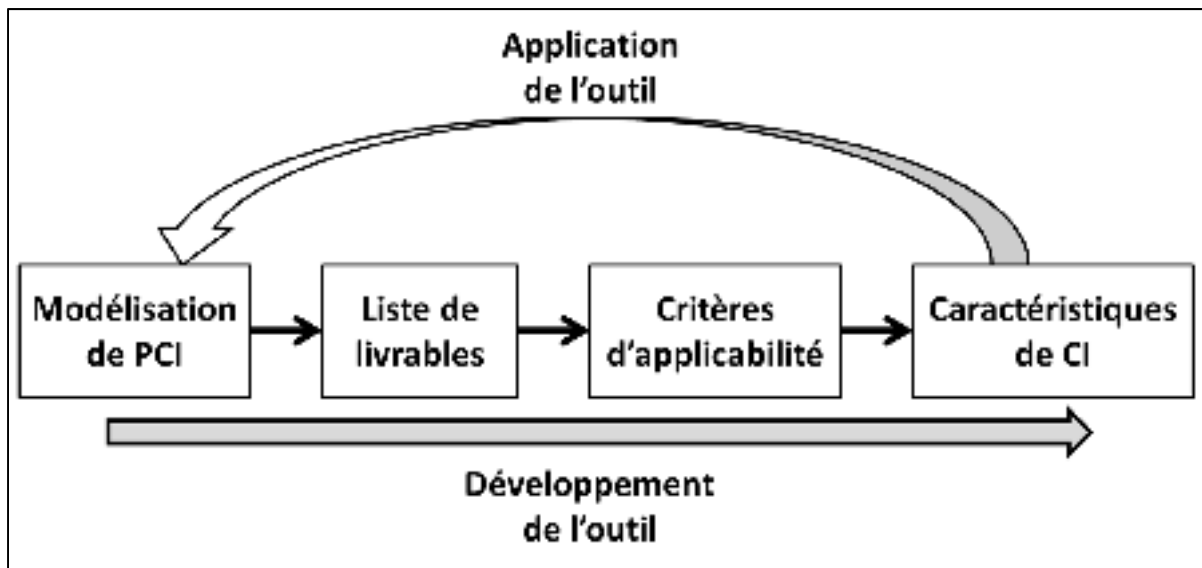


Figure 2.3 Stratégie générale de recherche

2.2.2 Stratégie détaillée

Le Tableau 2.2 résume le déroulement de la stratégie de recherche en détaillant les phases, les méthodes utilisées et les livrables principaux résultants de ces étapes.

Tableau 2.2 Stratégie de recherche

#	Phase de la méthodologie	Méthode	Résultats
1	Phase de conscience du problème		
1.1	Compréhension de la problématique	Revue de la littérature	Problématique de recherche
1.2	Compréhension du contexte client	Rencontres informelles avec l'EP	Problématique de recherche, point de vue industriel
1.3	Revue des concepts théoriques	Revue de la littérature	Connaissances théoriques
2	Phase de suggestion		
2.1	Suggestion et sélection de l'objectif de recherche	Rencontres informelles avec l'EP	Objectif de recherche
3	Phase de développement		
3.1	<i>Analyse des spécifications techniques des livrables de recherche</i>		
3.1.1	Identification des besoins et spécification techniques	Entretien de groupe	Liste des besoins et spécification techniques
3.1.2	Étude de l'importance relative des Spécifications techniques	Entretien de groupe	Maison de la qualité
3.2	<i>Modélisation du processus</i>		
3.2.1	Choix de l'outil de modélisation		Choix de l'outil
3.2.2	Modèle préliminaire	Entretien individuel	Diagramme SIPOC
3.2.3	Modélisation du processus	Entretiens de groupe	Modèle de PCI
3.2.4	Étude de saturation empirique	Critère de saturation empirique	Processus validé
3.3	<i>Développement de l'outil d'aide à la planification</i>		
3.3.1	Collecte des données	Entretiens de groupe	Données brutes
3.3.2	Traitement des données	Diagramme d'affinité	Liste des caractéristiques du CI
3.3.3	Étude de saturation empirique	Critère de saturation empirique	Caractéristiques du changement validés
3.3.4	Création d'une interface utilisateur	Développement d'interface	Outil d'aide à la planification de projet
4	Phase d'évaluation		
4.1	Évaluation qualitative	Sondage	Résultats d'évaluation
4.2	Évaluation quantitative	Test	Résultats d'évaluation

Ce tableau se base sur la méthodologie décrite dans le paragraphe précédent, les sous objectifs principaux de cette étude :

1. Déterminer la problématique de ce travail et la comprendre vis-à-vis de la littérature ainsi que du point de vue de l'industriel : c'est la phase de conscience du problème.
2. Suggérer différentes pistes de recherche et sélectionner l'objectif de recherche : c'est la phase de suggestion.
3. Modéliser le PCI afin de mettre en avant des éléments permettant de mieux maîtriser la phase planification et développer l'outil d'aide à la planification correspondant : c'est la phase de développement.
4. Évaluer les outils développés : c'est la phase d'évaluation.

Les principaux livrables de cette étude sont les suivants :

1. Un modèle du PCI adapté à l'obsolescence;
2. Un outil d'aide à la planification des projets de CI.

Les sections suivantes détaillent les méthodes appliquées dans les phases de recherche.

2.3 Méthodes appliquées dans les phases

2.3.1 Analyse des spécifications techniques des livrables de recherche

Dans cette section, la méthodologie d'élaboration et d'analyse des spécifications techniques des livrables principaux (processus et outil d'aide à la planification) est présentée. L'objectif est non seulement de déterminer les spécifications techniques du livrable de recherche final mais aussi leur importance relatives. Pour cela une approche par construction d'une maison de la qualité est choisie (Bernal *et al.*, 2009). Cette approche permet de déterminer les importances relatives des spécifications techniques en se basant sur les besoins clients (Figure 2.4).

Dans un premier temps les besoins auxquels devront répondre les livrables de recherche seront identifiés. Pour cela un entretien de groupe sera mené avec un ingénieur de certification et un responsable de l'amélioration continu. De plus le responsable de

l'amélioration continue est aussi responsable des différents outils de gestion et est donc directement intéressé par l'objet de ce travail. Ce choix a été réalisé afin d'avoir un point de vue technique et de gestion. Une échelle de 1 (pas important) à 5 (extrêmement important) sera établie pour déterminer l'importance des besoins.

Dans un second temps ces besoins seront décomposés en spécification techniques. Un entretien de groupe avec les mêmes personnes que pour l'identification des besoins sera réalisé. La valeur cible pour chacune de ces spécifications sera identifiée au cours de cet entretien.

A partir des données récoltées, une maison de la qualité pourra être construite. Celle-ci se décompose comme suit (Figure 2.4) :

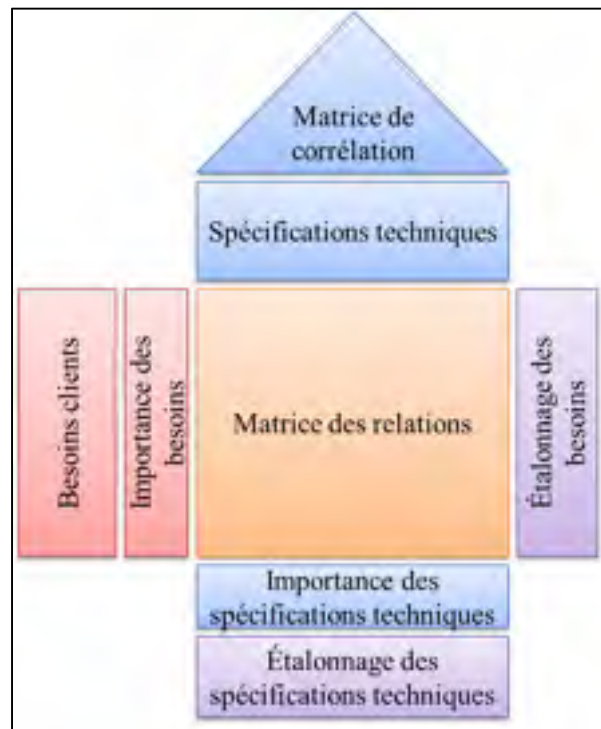


Figure 2.4 Maison de la qualité
Source : Bernal *et al.*, 2009

La matrice des relations décrit les liens entre les besoins et les spécifications techniques. Une fois remplie, un calcul matriciel permettra de déterminer l'importance des spécifications techniques à partir de l'importance des besoins clients. La matrice de corrélation permettra de déterminer les éventuels relations de conflits entre les spécifications.

Les parties étalonnage permettent de comparer différentes solutions vis-à-vis des besoins ou des spécifications. Elles ne seront pas utilisées dans ce travail.

L'élaboration de cette maison de la qualité nous permettra de prioriser les spécifications technique à remplir dans les choix de conceptions futurs ainsi qu'à évaluer les résultats obtenus.

2.3.2 Modélisation du processus de changement d'ingénierie

Dans cette section, la méthodologie de modélisation du processus d'implémentation de changement d'ingénierie est présentée. La Figure 2.5 résume cette méthodologie. Dans les sous sections suivantes ces étapes sont détaillées.

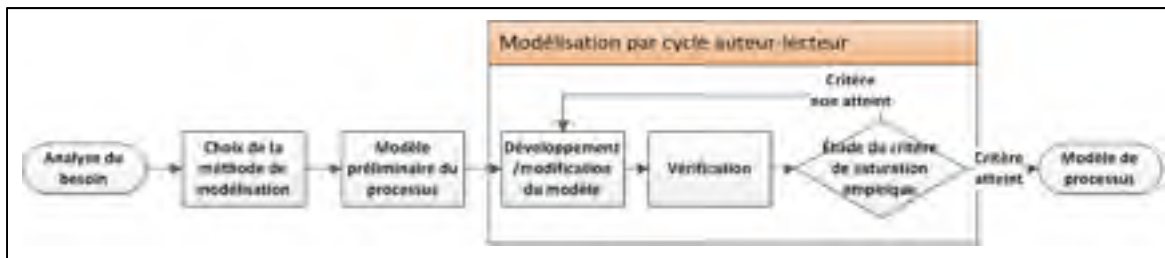


Figure 2.5 Méthodologie de la modélisation de processus

2.3.2.1 Choix de la méthode de modélisation

Comme vu dans la revue de la littérature il existe de nombreuses méthodes de modélisation de processus. Afin de modéliser le PCI, il faut déterminer la méthode adéquate. Cette méthode se basera sur le besoin auquel répond le modèle.

Ainsi, à partir de l'analyse du besoin de la phase 3.1, une liste critères de choix de méthode de modélisation sera dégagée. La pondération issue de la maison de la qualité sera utilisée pour pondérer ces critères.

Les méthodes de modélisations seront ensuite évaluées à la lumière de ces critères et une méthode sera ainsi sélectionnée.

2.3.2.2 Modélisation du processus par cycle auteur-lecteur

La modélisation de processus (quel que soit la méthode) se réalise en suivant les quatre (4) étapes ci-dessous (Biazzo, 2000) :

1. Définition des limites, des fournisseurs, entrants, sortants et clients du processus.
2. Entrevue avec les responsables des différentes activités, définition des activités.
3. Création du modèle avec la logique de cycles « auteur-lecteur », en alternant la modélisation du PCI et la présentation du modèle aux acteurs du processus.
4. Vérification.

La première étape, sera réalisée à travers l'élaboration d'un diagramme SIPOC. En effet, comme vu dans la revue de la littérature, cette méthode permet de cerner en une image le cadre général du processus étudié. Ce modèle identifie les fournisseurs, clients, les activités principales du processus ainsi que les données d'entrée et de sortie du processus du CI. Ce modèle est réalisé au travers d'une entrevue individuelle semi structurée avec le commanditaire du projet de recherche.

La deuxième étape se repose sur une série d'entrevues de groupes semi-structurées. Ce choix se justifie par le degré faible d'innovation ainsi et par le niveau relativement faible de l'expérience des acteurs du processus (Wirthlin, 2000). Le niveau d'expérience est faible en cela qu'il n'y a pas de modèle de processus formalisé mais une expérience significative dans les projets de CI.

Les groupes formés seront interdisciplinaires de 2 ou 3 (selon la disponibilité des participants), afin de confronter les différents points de vue. Ces entretiens semi-structurés se dérouleront en présentant le modèle du processus et en le confrontant aux expériences des participants.

Les informations recherchées sont:

- Les activités du processus et leur séquençement;
- Les livrables des activités, les responsables correspondants;
- Les temps de réalisation de ces livrables;
- La spécificité de l'obsolescence vis-à-vis du PCI.

Suite aux entretiens, des modifications seront suggérées par les lecteurs et intégrées au modèle. Le modèle modifié sera ensuite présenté lors de l'entretien suivant, avec de nouvelles personnes. Ces entretiens vont ainsi alimenter la modélisation du processus d'implémentation de CI par cycle auteur-lecteur.

Échantillonnage

L'échantillon interrogé comporte 6 personnes de l'entreprise partenaire. Les répondants sélectionnés sont les personnes clés du processus d'implémentation du changement. Ils représentent l'ensemble des activités du processus. Les rôles identifiés sont :

- Délégué de certification (x2);
- Gestionnaire de projet (x2);
- Responsable de l'amélioration continue (x1);
- Ingénieur systèmes (x1).

Le profil recherché est celui de personnes d'expériences dans la gestion et la réalisation de PCI. En effet, le PCI n'étant pas formalisé, les CI sont organisés selon les conseils des gestionnaires expérimentés. Ce sont eux qui détiennent l'information du modèle de PCI, ce sont donc eux qui sont sollicités. Leur nombre limite la taille de l'échantillon. La crédibilité des données recueillies est ainsi assurée de deux manières, la représentativité de l'échantillon

vis-à-vis des différents rôles sollicités dans le PCI et l'expérience des personnes sollicitées qui détiennent donc l'information relative au déroulement du processus.

La transférabilité de l'étude

La transférabilité des données est limitée dans cette étude en cela que nous nous limitons à l'entreprise partenaire. Au sein de l'EP la transférabilité est assurée par l'expérience de personnes sollicitées.

La confirmabilité

L'objectivité des données est assurée par la participation multiple des personnes sollicitées. Elles peuvent ainsi confirmer le modèle obtenu au vue de leur expérience.

Saturation du modèle

Conformément à la notion de validité pragmatique, la validation du modèle sera considérée comme suffisante par évaluation du critère de saturation empirique. Ce concept consiste à déterminer le moment où l'on peut arrêter la collecte de donnée en se basant sur la stagnation de l'information récoltée (Pires, 1997). Nous appliquons ce critère dans le cadre de cycles de conception pour déterminer le moment où l'on a atteint la limite de l'apport de cette méthode modélisation. Ce critère se basera sur deux (2) caractéristiques du modèle :

- Nombre de livrables identifiés;
- Nombre de blocs utilisés.

La stabilisation de ces caractéristiques du modèle démontre un critère de saturation empirique atteint : la méthode sera alors aboutie. Un niveau de 95 % de saturation empirique est fixé.

2.3.3 Développement de l'outil d'aide à la planification

Dans cette section la méthodologie choisie pour le développement de l'outil d'aide à la planification du PCI est présentée. La Figure 2.6 résume cette méthodologie. Comme énoncé en conclusion de la revue de la littérature, la finalité de l'outil sera de caractériser les CI

selon l'influence qu'ils ont sur la liste des livrables du PCI. Ces livrables ne s'appliqueront que selon certaines conditions à déterminer. Cette liste de caractéristique sera intégrée au sein d'un outil qui permettra d'identifier les livrables applicables à un changement donné. Pour ce faire, la méthodologie se décomposera en cycles de conception avec une étape de collecte de données (identification des critères d'application des livrables identifiés) et une étape de traitement de données (regroupement des critères). La caractérisation des changements sera considérée comme aboutie lorsque le critère de saturation empirique sera atteint. Enfin, pour pouvoir tester la caractérisation ainsi que pour rendre l'outil utile à l'EP, une interface utilisateur sera développée. Ces étapes sont détaillées dans les sections suivantes.

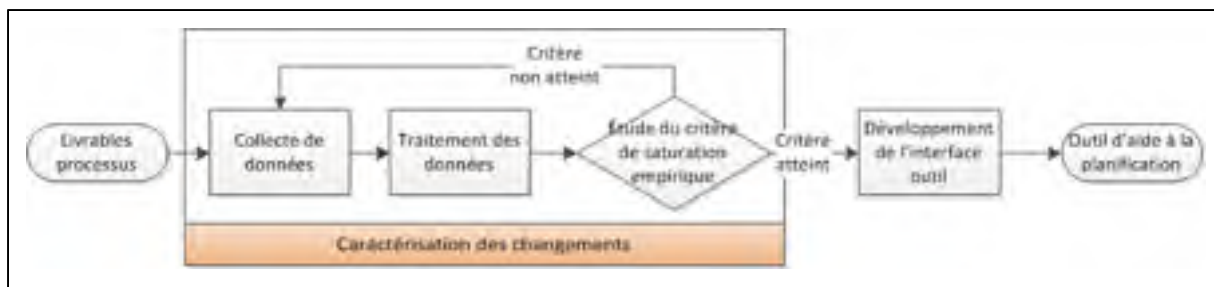


Figure 2.6 Méthodologie de conception de l'outil

2.3.3.1 Collecte de données

La première étape consiste en la collecte de données. Les données recherchées seront les critères d'applicabilité. Ils seront collectés au travers d'entretiens de groupe.

Les profils recherchés seront :

- Délégué de certification (DC);
- Gestionnaires de projet;
- Ingénieurs systèmes.

Ces profils sélectionnés ont été choisis car, en tant que principaux gestionnaires de ce type de projets, ce sont les personnes qui connaissent le mieux les conditions dans lesquels les différents livrables sont applicables. Elles seront donc plus à même de se prononcer sur les différents critères, permettant ainsi une meilleure définition de l'outil et de ses contraintes.

2.3.3.2 Traitement des données

Dans un second temps, l'étape traitement a pour objectif de classer les caractéristiques du changement. Une première identification des critères d'application ayant été faite lors de la collecte des données, les données obtenues sont ensuite traitées afin d'obtenir la caractérisation des changements. Cela sera réalisé au travers de regroupements par affinité (Stevenson, Benedetti et Youssef, 2012). Le résultat sera sous forme de diagramme d'affinité.

Comme pour la modélisation de processus, des cycles de conceptions seront réalisés pour enrichir le diagramme d'affinité. Les données collectées seront insérées dans les catégories existantes si possibles ou, le cas échéant, de nouvelles catégories seront créées.

2.3.3.3 Critère de saturation empirique

De la même manière que pour la modélisation de processus, le critère de saturation empirique sera employé pour déterminer l'aboutissement de cette méthode. La mesure considérée sera le nombre de caractéristiques trouvées car il s'agit d'un critère facilement identifiable et quantifiable tout en étant représentatif de l'outil. Tant que ce nombre n'est pas stable, une nouvelle collecte de données, suivi du traitement de celles-ci sera faite. Un niveau de 95 % de saturation empirique est fixé.

2.3.4 Évaluation de l'outil

L'évaluation des livrables principaux (modèle de processus et outil d'aide à la planification) constitue la phase 4. L'évaluation des livrables sera faite en deux (2) parties, une partie qualitative (convivialité de l'outil et clarté du modèle de processus) et une partie quantitative (performances). Les méthodes utilisées pour réaliser ces deux (2) évaluations sont décrites ci-dessous.

2.3.4.1 Évaluation qualitative

La validation qualitative de l'outil d'aide à la planification concerne principalement l'ergonomie de l'interface utilisateur. Sa convivialité sera donc évaluée par ces derniers.

Une présentation des livrables sera faite aux futurs utilisateurs. Un questionnaire d'évaluation sera ensuite soumis suite à cette présentation et les résultats seront comparés aux spécifications techniques du cahier des charges. Les personnes sélectionnées n'auront pas participé à la conception de l'outil afin de maximiser la validité interne de cette évaluation.

Le profil des participants sélectionnés sera celui des futurs utilisateurs de l'outil, c'est à dire les gestionnaires des projets de PCI.

2.3.4.2 Évaluation quantitative

La fonction de l'outil est d'identifier les livrables selon les caractéristiques du changement. Sa performance sera définie lors de l'analyse des spécifications techniques comme étant sa capacité à identifier l'ensemble des livrables de PCI applicables, et seulement ceux-là, pour un projet donné. Les performances de l'outil, sont donc quantifiables objectivement.

Pour mesurer cette performance, l'outil sera appliqué à un projet en cours par deux (2) évaluateurs, un gestionnaire de projet et un DC. Cela permettra de comparer les résultats de l'expert et celui du gestionnaire et évaluer la nécessité de consultation d'un expert (DC) pour la caractérisation du CI. Les résultats obtenus par l'outil seront comparés aux livrables identifiés lors de la planification du projet. On pourra définir plusieurs situations possibles (Figure 2.7).

Nous en déduiront les mesures à faire pour évaluer la performance de l'outil :

- La mesure de la capacité de l'outil à identifier l'ensemble des livrables nécessaires à l'aboutissement du projet. On mesurera le nombre de livrables non identifiés par

l'outil mais tout de même nécessaire au projet (identifiés par le gestionnaire de projet). Cette mesure de performance sera appelée erreur.

- Le niveau de détail des activités et des livrables identifiés par le gestionnaire de projet et celui de l'outil peuvent différer. On aura donc une partie des livrables identifiés par le gestionnaire qui sont indiqués implicitement par l'outil. Par exemple si le gestionnaire détaille les livrables intrinsèques à une procédure de test, et que l'outil reste au niveau du rapport final de ce test, alors l'outil aura identifié implicitement ces livrables de la cédule. Ainsi, on mesurera la quantité de livrables définis implicitement et explicitement par l'outil. On nommera cette notion cohérence. La proportion de livrables identifiés par le gestionnaire et identifié explicitement par l'outil consistera en la mesure de performance que l'on nommera cohérence explicite. Ceux explicitement identifiés par le gestionnaire mais implicitement par l'outil constituent la mesure de performance cohérence implicite. Pour illustrer ce qu'est un livrable identifié implicitement, on peut penser à une ligne dans l'outil « rapport de test » tandis que le gestionnaire détaillera la liste des rapports pour chaque test à réaliser.
- L'outil peut permettre d'identifier des livrables qui auraient été oublié lors de la planification. Ces livrables constituent la plus-value de l'outil. On nommera cette mesure de performance plus-value.
- Le cadre délimitant cette étude ne concordera pas parfaitement avec celui de la cédule du projet et une partie des livrable identifiés par le gestionnaire ne figurera pas dans l'outil car ils auront été exclus du cadre de travail. Le nombre de ces livrables exclus de ce travail constituent la mesure de performance que l'on nommera hors-cadre.

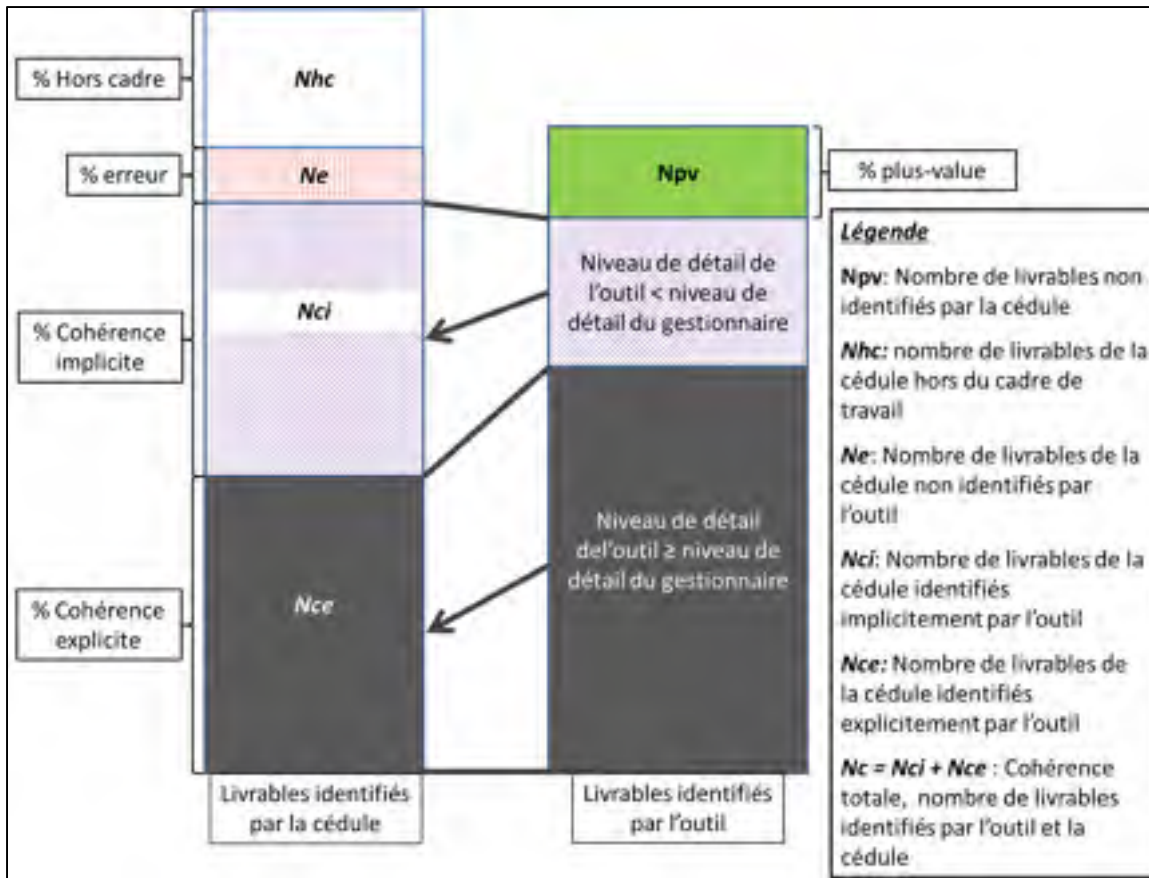


Figure 2.7 Mesures de performances de l'outil

En reprenant les notations de la figure ci-dessus (Figure 2.7) le calcul des mesures de performance se fait comme suit. En posant :

$$Tot = Npv + Nce + Nce + Nhc \quad (2.1)$$

$$Nc = Nce + Nci \quad (2.2)$$

On obtient les mesures de performances définies ci-dessus :

$$\%erreur = \frac{Nce}{Tot} * 100 \quad (2.3)$$

$$\%CohérenceTotale = \frac{Nc}{Tot} * 100 \quad (2.4)$$

$$\%CohérenceExplicite = \frac{Nce}{Nc} * 100 \quad (2.5)$$

$$\%CohérenceImplicite = \frac{Nci}{Nc} * 100 \quad (2.6)$$

$$\%pluevalue = \frac{Npv}{Tot} * 100 \quad (2.7)$$

$$\%HorsCadre = \frac{Nhc}{Tot} * 100 \quad (2.8)$$

Nous avons ainsi décrit la méthodologie utilisée dans ce travail. Sa rigueur a pour objectif d'assurer la validité des résultats. Dans la section suivante nous présentons les résultats obtenus par l'application de cette méthodologie.

CHAPITRE 3

PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

3.1 Phase de Suggestion : sélection de l'objectif de recherche

La phase de suggestion permet d'affiner le type de livrable pouvant intéresser l'EP dans le cadre de notre problématique : la maîtrise du PCI dans le cadre de l'obsolescence en aéronautique. Plusieurs objectifs de recherche, basés sur une revue de la littérature, ont été identifiés. Afin de centrer le chapitre de la revue de la littérature sur ce travail les problématiques non sélectionnées n'y ont pas été présentées.

Les pistes envisagées ont été les suivantes :

- Étude de la propagation de changement pour les pièces sujettes à l'obsolescence. Lorsqu'un fournisseur provoque un CI, ce CI peut avoir des répercussions sur les éléments de l'appareil avoisinants. L'étude de ces répercussions contribuerait à la maîtrise du PCI en cela que l'étendue du changement serait mieux maîtrisée. Il s'agit du lien entre le CI perçu par le fournisseur et celui perçu par l'entreprise (Figure 3.1).
- Étude du lien entre les caractéristiques du CI (du point de vue de l'entreprise) et les livrables du PCI. Il s'agit de la piste retenue. L'étude de ce lien contribue à la maîtrise du PCI car il permet d'identifier les livrables nécessaires à la réalisation du CI, et assiste sa planification (Figure 3.2).

La piste de la propagation n'a pas été retenue pour les raisons suivantes. Tout d'abord elle nécessite l'accès à la configuration des appareils. Certaines informations sont identifiées à accès restreint par l'EP et donc difficile d'accès dans le cadre de ce travail.

De plus, l'EP ne possède pas de liste exhaustive des pièces sujettes à l'obsolescence. Or ces informations sont nécessaires à la généralisation des résultats aux cas d'obsolescence. Nous avons envisagé de travailler sur des cas particuliers mais, dans ce cas, la validité externe aurait eu besoin d'être vérifiée. Cela aurait nécessité plus de temps avant que l'entreprise ne

puisse bénéficier des contributions de ce travail. Or, le court terme est un facteur important pour l'EP et pour pouvoir présenter des résultats opérationnels dans le temps imparti à ce mémoire.

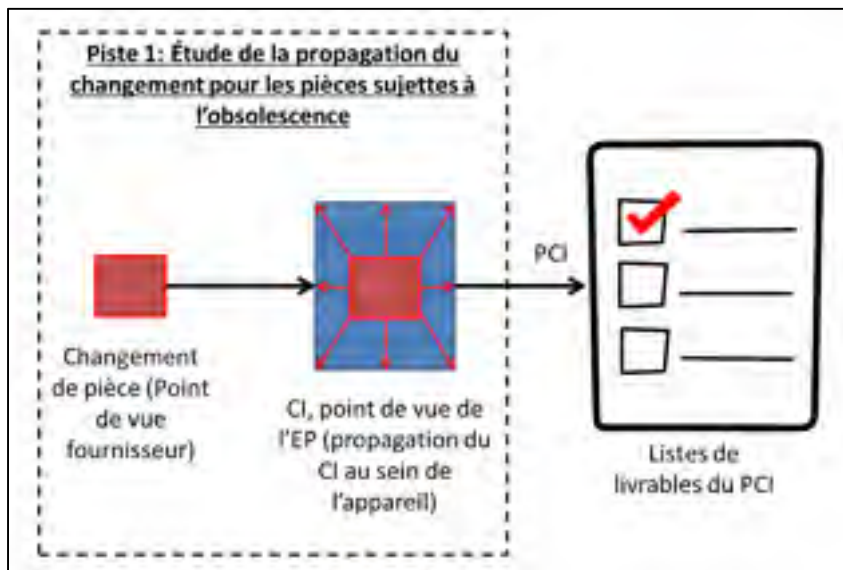


Figure 3.1 Piste 1 : Étude de la propagation de changement d'ingénierie pour les pièces sujettes à l'obsolescence

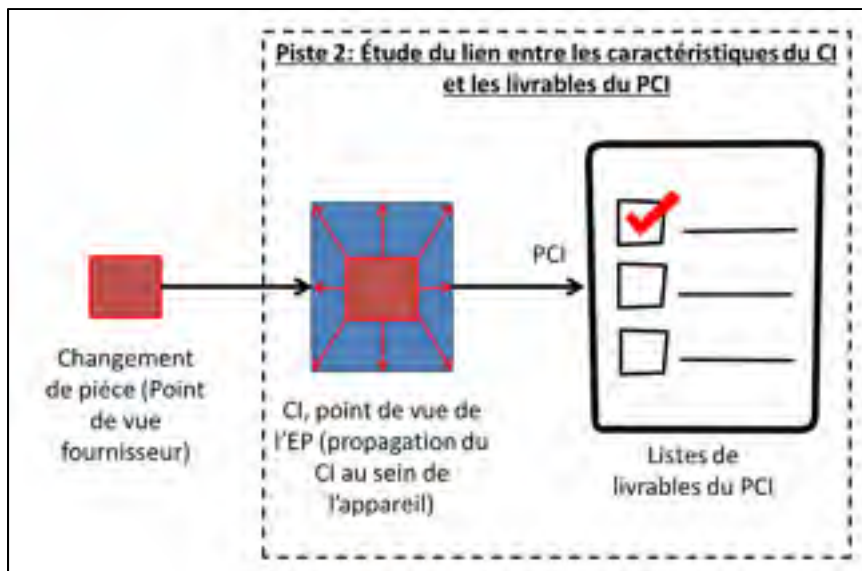


Figure 3.2 Piste 2 : Étude du lien entre les caractéristiques du CI (du point de vue de l'entreprise) et les livrables du PCI

Enfin le manque de capitalisation des cas de propagation de changement aurait également empêché la validation empirique du travail à court terme. Nous avons donc opté pour l'étude du lien entre les caractéristiques du changement et les livrables associés au PCI sachant que des données relatives à la caractérisation du changement sont accessibles.

L'objectif est alors de développer un outil permettant, en fonction des caractéristiques du CI, d'identifier les livrables du PCI. Dans les sections suivantes nous présentons les résultats principaux de la phase de développement.

3.2 Spécification du livrable final

Conformément à la méthodologie présentée précédemment les besoins relatifs à la conception d'un outil d'aide à la planification par identification des livrables ont été identifiés au travers d'un entretien de groupe avec un ingénieur de certification et un responsable de l'amélioration continue. La liste est présentée ci-dessous (Tableau 3.1). Les besoins ont été décomposés en besoins relatifs au modèle de processus, à l'identification des livrables et à l'outil dans son ensemble. L'importance des besoins a été évaluée en utilisant une échelle de 1 (pas important) à 5 (extrêmement important).

Tableau 3.1 Besoins clients

Partie	Besoin	Importance
Processus	1 - Processus clair	4
	2 - Contexte clair	4
Identification des livrable	3 - Ensemble des livrables de projets identifiés	5
	4 - Niveau de détail des livrables adéquat	3
Ensemble	5 - Intégrable aux processus généraux de l'entreprise	3
	6 - Utilité claire	5
	7 - Application rapide	2
	8 - Formation rapide	3
	9 - Mises à jour rapides	5

Les besoins identifiés sont relatifs au modèle de processus, à la capacité de l'outil à identifier les livrables ainsi qu'à la convivialité de l'ensemble. Cette analyse des besoins nous a permis de réaliser que le processus répond à un besoin qui dépasse la conception de l'outil, il permet également de guider les gestionnaires dans le déroulement général du PCI.

Ces besoins ont ensuite été décomposés en spécifications techniques. Comme décrit dans la méthodologie, cette décomposition a été réalisée au travers d'un entretien de groupe avec les mêmes personnes que pour l'identification des besoins. Ces spécifications sont décrites dans le tableau suivant (Tableau 3.2). A chaque spécification est associé un objectif ainsi qu'une valeur cible qui est le niveau satisfaisant.

Tableau 3.2 Spécifications techniques de l'outil

Partie	Spécification Technique	Objectif	Cible
Processus	A - Représentation du processus claire pour les utilisateurs	↑	Évaluation utilisateur >4/5
	B - Clarté du contexte du processus pour les utilisateurs	↑	Évaluation utilisateur >4/5
Identification des livrable	C - Erreur	↓	%Erreur <5%
	D - Cohérence Explicite	↑	%CohérenceExplicite >70%
Ensemble	E - But de l'outil clair pour les utilisateurs	↑	Évaluation utilisateur >4/5
	F - Utilité perçue pour les utilisateurs	↑	Évaluation utilisateur >4/5
	G - Temps d'application (Ta)	↓	Ta < 5min
	H - Temps de formation (Tf)	↓	Tf < 30min
	I - Temps de mise à jour (Tmaj)	↓	Tmaj < 10min

Le lien entre ces spécifications techniques et les besoins a été réalisé au travers d'une maison de la qualité. Pour cela une l'échelle d'influence de 0 (pas influent) à 5 (extrêmement influent) a été utilisée pour chaque couple besoin-spécification. Cette évaluation permet de déterminer l'importance relative des spécifications. Le résultat est présenté ci-dessous (Figure 3.3).

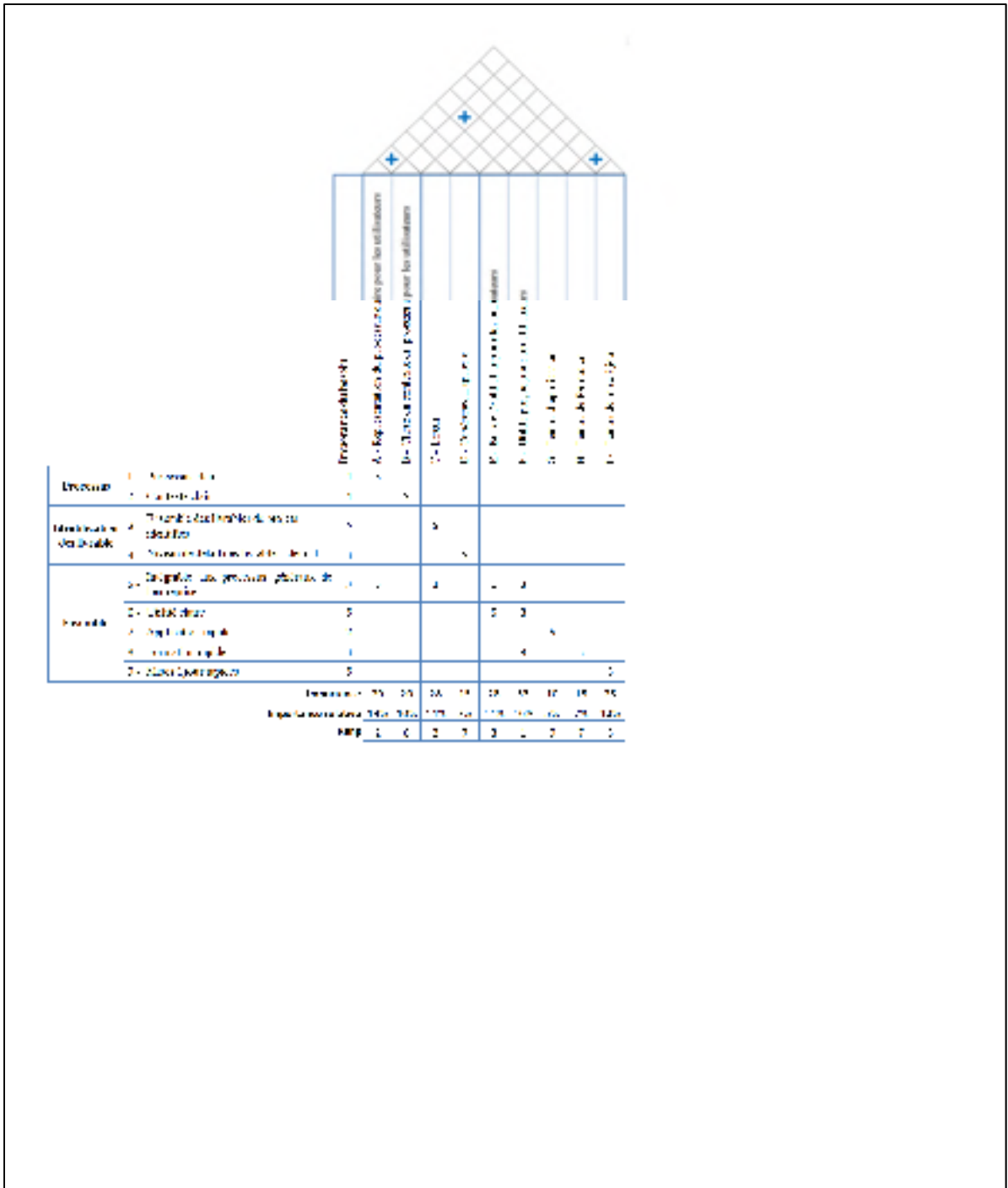


Figure 3.3 Maison de la qualité

Cette étude permet de mettre l'emphasis sur les spécifications clés :

- l'utilité perçue par les utilisateurs (F);
- la clarté du modèle (A);
- le taux d'erreur de l'identification des livrables du PCI (C);
- la clarté de l'apport de l'outil (E).

Le plus important est que les gestionnaires comprennent l'apport que peut avoir cet outil pour leurs activités de planification et qu'ils soient incités à intégrer leurs mises à jour au fur et à mesure qu'ils l'utilisent.

3.3 Modélisation du processus

3.3.1 Choix de la méthode de modélisation de processus

À partir de la revue de la littérature, nous avons repris les différentes méthodes. Conformément à la méthodologie, les critères de choix de méthode de modélisation de processus proviennent du cahier des charges. Les spécifications techniques déterminantes concernant le processus sont :

- Clarté du modèle (A);
- Temps de mises à jour (I);
- Temps de formation (H);
- Clarté du contexte du modèle (B).

La spécification « clarté du contexte du modèle » n'est pas prise en compte dans le choix car elle est induite par la contextualisation du modèle et non par le modèle en lui-même. Ces critères de choix s'inscrivent dans le cadre conceptuel CMQF, il s'agit de :

- La qualité pragmatique;
- La qualité de l'application de la connaissance du langage;
- La qualité syntaxique.

Une échelle de 1 (ne convient pas) à 5 (convient parfaitement) a été utilisée. L'importance des spécifications techniques a été utilisée pour pondérer chacun de ces critères. Un score global pour chacune de ces méthodes en a été déduit en sommant les scores obtenus pour chaque critère pondéré par son importance. Les résultats sont présentés dans le tableau suivant (Tableau 3.3).

Tableau 3.3 Évaluation des méthodes de modélisation

Méthode	Poids des critères (importance de la spécification correspondant)			Total
	Clarté du modèle	Mise à jour rapide	Formation rapide	
	29	25	15	
SIPOC	4	5	3	286
Diagramme de flux	4	5	5	316
Diagramme de flux croisé	5	5	5	345
DSM	3	2	4	197
IDEF0	3	3	2	192
IDEF3	3	1	2	142
RAD	4	5	3	286
RID	4	5	3	286

Le diagramme de flux croisé est donc la méthode qui semble la plus adaptée, elle a donc été choisie pour modéliser le processus d'implémentation de CI.

3.3.2 Modèle préliminaire du processus de changement d'ingénierie

Comme présenté dans la méthodologie, la première étape de modélisation d'un processus consiste en la définition des limites, des fournisseurs, entrants sortants et clients du processus et un modèle SIPOC est réalisé pour cela. Le modèle SIPOC est présenté Figure 3.4. Le processus étudié est initié par la notification d'une obsolescence, que ce soit par le fournisseur ou par une méthode de prévision. Il se termine par l'approbation finale du changement par l'autorité de certification de navigabilité. L'implémentation du changement dans la production ainsi que la partie chaîne d'approvisionnement (gestion de l'inventaire et

des commandes) n'est pas traitée, elle est hors du cadre établi pour ce travail, comme indiqué dans l'introduction.

Les fournisseurs du processus sont :

- Le fournisseur dont proviennent les pièces obsolètes. Il déclenche le processus lorsqu'il notifie le manufacturier de la fin de production de cette pièce.
- Le fournisseur de la solution de remplacement. Cet acteur est souvent l'entreprise qui fournit la pièce obsolète, comme dans le cas d'une amélioration du produit. Cet acteur produit l'ensemble des informations relatives au nouveau produit, ainsi que les rapports démontrant sa qualité. Pour simplifier le diagramme, ces deux (2) fournisseurs sont intégrés sous le terme « fournisseur ».

Les clients identifiés sont internes à l'entreprise:

- Les autorités de certification. Elles approuvent le changement ainsi que certains livrables.
- La production est impactée dans ses processus de production car il doit implanter le produit de remplacement.
- Le service client doit prendre conscience du changement afin de répondre aux demandes de maintenance relatives au produit obsolète.
- Les gestionnaires de l'inventaire doivent assurer la transition de la pièce obsolète vers la pièce de remplacement.
- Les gestionnaires de programme intègrent le changement dans la conception de l'appareil concerné.

Le processus se déroule ainsi en cinq (5) phases :

- 1) Notification;
- 2) Planification;
- 3) Conception;
- 4) Tests, Qualification et Certification;
- 5) Implémentation dans la production (n'est pas traité dans ce travail).

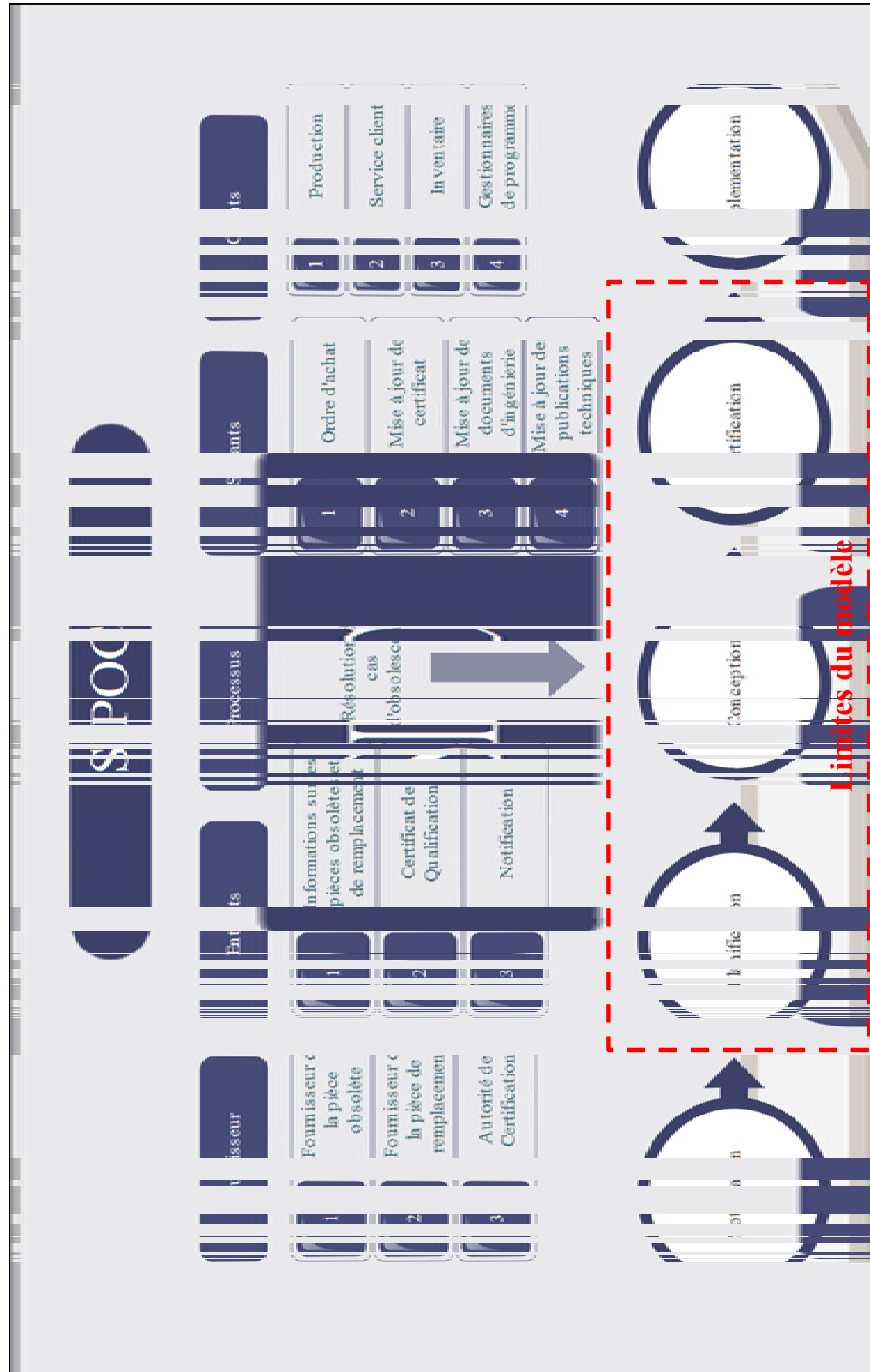


Figure 3.4 Modèle SIPOC du PCI

En somme, le processus part d'un besoin imminent de CI imposé par le fournisseur et produit une nouvelle conception, avec les livrables qui en découlent, pour l'ensemble des services concernés. Ces livrables proviennent essentiellement de deux (2) besoins liés : 1) la nécessité d'assurance de qualité de l'ingénierie et 2) l'obtention de la certification de l'appareil.

La contrainte principale de ce processus est d'être rapide car le temps imparti pour réaliser ce processus est limité et un retard impacterait la production ou le service client ce qui aurait des impacts financiers importants.

3.3.3 Modèle du processus d'implémentation de changement d'ingénierie

3.3.3.1 Analyse du processus

Dans cette section, nous présentons le résultat de l'analyse du PCI de l'EP afin de rendre le modèle le plus représentatif possible de ce contexte.

L'entreprise possédait déjà un processus de CI pour les introductions de nouveaux produits, appelé le NP&SI (de l'anglais « New Product and System Integration »). Le processus actuel NP&SI a pour but d'introduire de nouveaux composants quelle que soit la raison (inclut les changements volontaires). On y retrouve les aspects clés du processus générique de CI de la littérature ainsi que celui de certification.

Le processus NP&SI est composé de 4 phases :

- 1) Étude du cas et exigences;
- 2) Conception;
- 3) Tests;
- 4) Implémentation dans la production.

Le tableau suivant (Tableau 3.4) fait le lien entre les processus NP&SI de l'entreprise, le PCI générique de la littérature (Section 1.3.2) et celui de certification (Section 1.3.4).

Tableau 3.4 Lien entre le processus NP&SI, le PCI générique et le processus de certification

#	Processus NP&SI	Changement d'ingénierie générique (Jarratt <i>et al.</i> , 2011)	Certification	
		Demande de changement et sélection de la solution. (phases 1 et 4)		
1	Planification	Identification, évaluation de la solution. (phases 2 et 3)	Définition de la base de certification (phase 1)	Définition de l'implication des autorités et de la méthode de démonstration. (phase 2)
2	Conception	Implémentation (phase 5)		
3	Tests, Qualification, et Certification	Implémentation (phase 5)	Démonstration de la conformité (phase 3)	
4	Implémentation dans la production	Implémentation (phase 5)	Approbation de la conformité (phase 4)	

Ces quatre (4) phases du processus sont :

- **Planification.** Ici, le changement est évalué et la solution de remplacement est choisie. La cédule, le budget sont établis ici. Cette étape se fait en coordination avec le fournisseur de la solution de remplacement. Une partie des livrables est liée à cette planification. L'outil d'aide à la planification sera utilisé à cette étape.
- **Conception.** La conception se réalise en parallèle avec le fournisseur. La documentation d'ingénierie ainsi que le travail de conception doit être coordonné avec le travail du fournisseur. Celui-ci doit produire un certain nombre de documents relatif à son produit (« Supplier Document Requirements », ou SDR), et l'entreprise doit les réviser.

- **Certification.** La certification est également réalisée en parallèle, afin de se synchroniser avec la conception, de qui elle dépend directement. Elle suit le processus vu dans la revue de la littérature.
- **Implémentation dans la production.** Il s'agit de l'intégration du changement dans la production des appareils.

Il existe deux (2) cas simples de changement qui simplifient les phases décrites. Elles correspondent à des remplacements FFF :

- 1) Si le changement n'impacte pas la qualification ou l'ingénierie, le fournisseur envoie une analyse d'impact du changement que le délégué de certification approuve. Aucune modification des documents de certification ou d'ingénierie n'est nécessaire.
- 2) Si le changement a un impact sur l'ingénierie de l'entreprise mais qu'il s'agit d'un remplacement direct, le nouveau composant rentre dans une liste de composants approuvés de remplacement (en anglais « super session list »). Une démonstration de la conformité à la certification (SoC) est tout de même nécessaire.

Au cours des entretiens les différences entre la situation du CI volontaire et le CI dans un contexte d'obsolescence (subi) a été considérée. Les différences identifiées sont retranscrites dans le tableau suivant (Tableau 3.5).

La différence entre les CI en cas d'obsolescence et les CI volontaires se trouve principalement au niveau de l'objectif et du délai de réalisation:

- 1) L'objectif : en situation d'obsolescence, il s'agit d'une situation de réponse à un risque imminent de perturbation de la production alors que dans le cas d'un changement volontaire, la production n'est pas menacée.
- 2) Le délai d'implémentation : dans le cas de l'obsolescence le délai est fixé, tandis que pour un changement volontaire, le délai est un objectif que l'entreprise se fixe et un retard éventuel peut être acceptable.

Tableau 3.5 Différences de contexte entre le CI volontaire et le CI en situation d'obsolescence

	Cas d'obsolescence (subi)	Cas volontaire
Motif de changement	Imposé	Volontaire
Nécessité du changement	Nécessaire	Volontaire
Solution recherchée	Fonctionnelle et rapide, généralement apportée par le fournisseur	À valeur ajoutée,
Temps imparti	Défini et court	Souple et suffisant
Urgence	Dépend du temps avant date butoir	Dépend des autres projets envisagés
Impact en cas de retard	Risque d'arrêt de production	Rentabilité du projet diminué
Issues envisageables	Solution trouvée	Solution rentable trouvée

Cette observation met en avant la différence d'enjeu entre ces deux (2) situations. Dans le cas de changement volontaire, l'enjeu principal se trouve au niveau des phases d'approbation du changement (phases 1 à 4 de la Figure 1.5) car ce qui compte c'est la qualité du changement. Dans le cas de l'obsolescence, l'enjeu se situe dans le délai de réalisation (phase 5 de la Figure 1.5) du changement. Du point de vue de la réalisation du changement, aucune différence n'a été identifiée.

3.3.3.2 Présentation du modèle

Le processus NP&SI, bien que documenté, n'est défini qu'à relativement haut niveau donnant des directives générales pour son exécution ainsi que quelque outils mais il n'y a ni modèle de processus, ni de liste détaillée des livrables du processus. Nous avons donc créé la modélisation permettant de mettre en avant ces livrables. Comme établi ci-dessus la méthode utilisée est le diagramme de flux croisé (Figure 3.5).

Ce modèle a été conçu pour prendre en compte l'ensemble des cas de figure présentés dans l'analyse du PCI. L'ensemble des livrables potentiellement applicables ont été considérés. La structure générale est composée d'une succession alternée d'activités (blocs rectangulaires) et de livrables (blocs ondulés). Afin de rendre le modèle clair, le niveau de détail du diagramme de flux est maintenu à relativement haut- niveau (pas de détail des activités de planification, de certification ou d'ingénierie).

Dans le modèle, les livrables sont regroupés au sein de blocs ondulés et la liste détaillée de ces livrables est reportée dans un tableur séparés qui sert de base de donnée pour l'outil. On y indique les efforts de réalisation moyens ainsi les responsables de ces livrables.

3.3.4 Critère de saturation empirique

La création de ce modèle a été finalisée grâce aux cycles de conceptions décrits dans la méthodologie. Les figures suivantes décrivent l'évolution de la conception du modèle. Comme indiqué dans la méthodologie, les paramètres suivants ont été sélectionnés pour évaluer le critère de saturation empirique:

- Nombre de livrables identifiés;
- Nombre de blocs du diagramme de flux utilisés.

Ces figures (Figure 3.6 et Figure 3.7) montrent une stabilisation du modèle du PCI. Elles évoluent de moins de 5 % à chaque cycle. Les cycles de conceptions ne permettant plus l'amélioration du modèle, nous avons terminé cette phase : la saturation empirique à 95 % est atteinte.

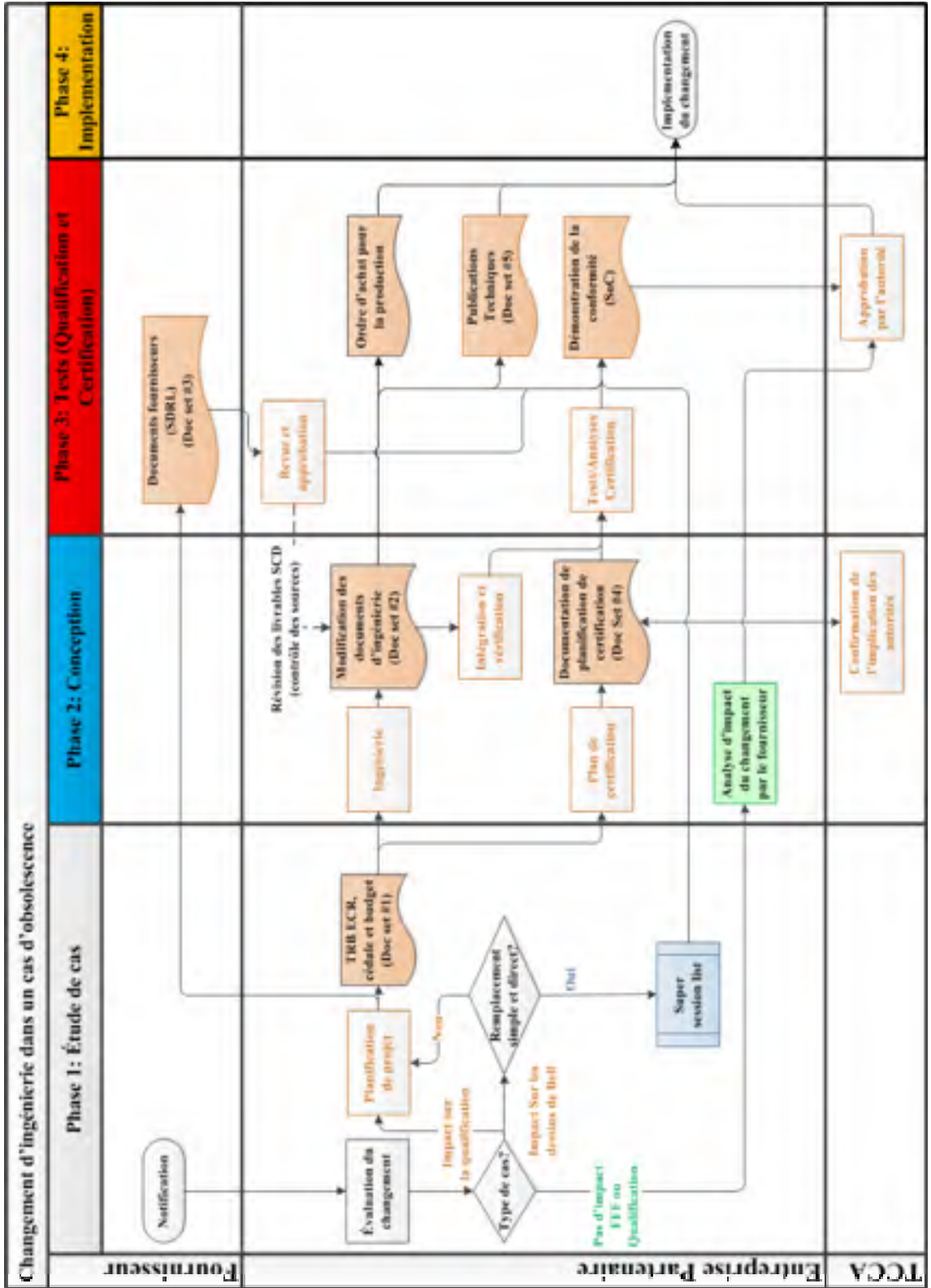


Figure 3.5 Modèle du PCI (22 blocs)

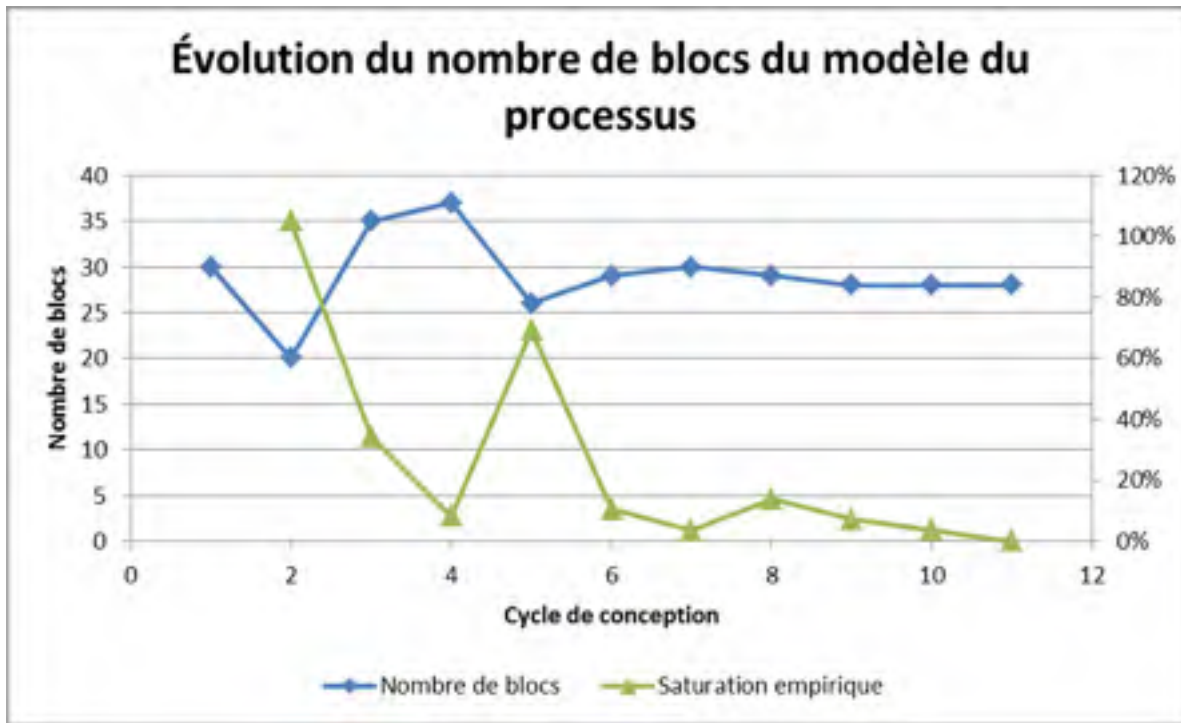


Figure 3.6 Évolution du nombre de blocs du modèle de processus

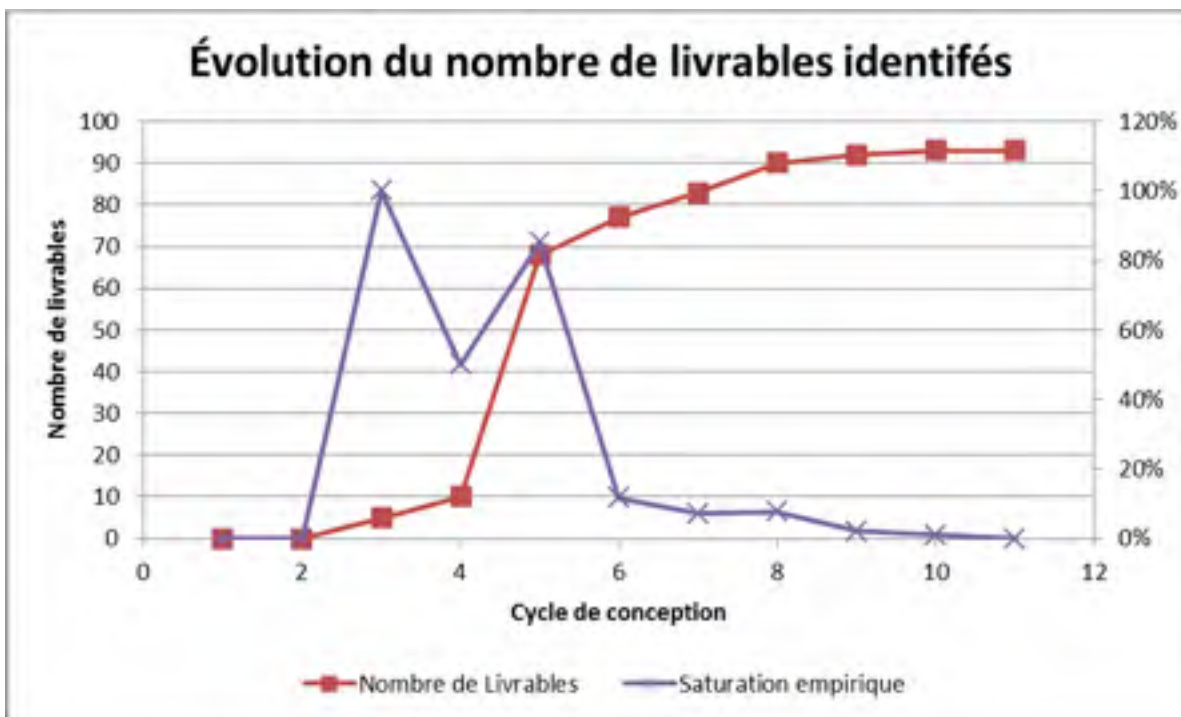


Figure 3.7 Évolution du nombre de livrables identifiés

3.4 Développement de l’outil

3.4.1 Caractéristiques des changements d’ingénierie (collecte et traitement des données)

Dans cette section nous présentons la caractérisation des changements d’ingénierie. Comme vu dans la méthodologie, cette caractérisation a été obtenue par détermination et regroupement des critères d’application des livrables du PCI (Tableau 3.6).

Tableau 3.6 Diagramme d’affinités des 21 caractéristiques des changements d’ingénierie

Certification		
<i>Caractéristique du changement</i>		<i>Contexte du changement</i>
- Charge électrique affectée	- Qualification affectée	- Modification d'équipement - Niveau de changement majeur - Équipement TSO
- Composant Électronique Complexe affecté	- Qualification contre la foudre affectée	
- Logiciel affecté	- Susceptibilité aux émissions radiofréquences affectée	
- Fiabilité affectée	- Tests de certification nécessaires	
- Interface pilote affectée	- Tests de qualification nécessaires	
Ingénierie		
<i>Caractéristique du changement</i>		<i>Contexte du changement</i>
- Branchements électriques affectés	- Installation/interface affectées	- Équipement spécifié par l'entreprise
- Changement de numéro de pièce		- Remplacement d'équipement
Projet		
- Activités du fournisseur attendues	- Appareils en service concernés	- Modification des dessins d'ingénierie nécessaires

Les caractéristiques trouvées ont été regroupées en trois (3) catégories, celles relatives à la certification, celles relatives à l’ingénierie et celles relatives à la gestion de projet. La liste obtenue comporte 21 éléments dont la majeure partie correspond à la certification (13/21).

Cette proportion n'est pas surprenante étant donné le caractère central de la certification en aéronautique. Ces caractéristiques demeurent d'un haut niveau technique, un gestionnaire de projet n'est, à priori, pas formé pour caractériser un CI selon cette liste.

3.4.2 Critère de saturation empirique

Les figures suivantes décrivent l'évolution de la caractérisation des changements d'ingénierie. Comme indiqué dans la méthodologie, le nombre de caractéristique a été sélectionné pour évaluer le critère de saturation empirique.

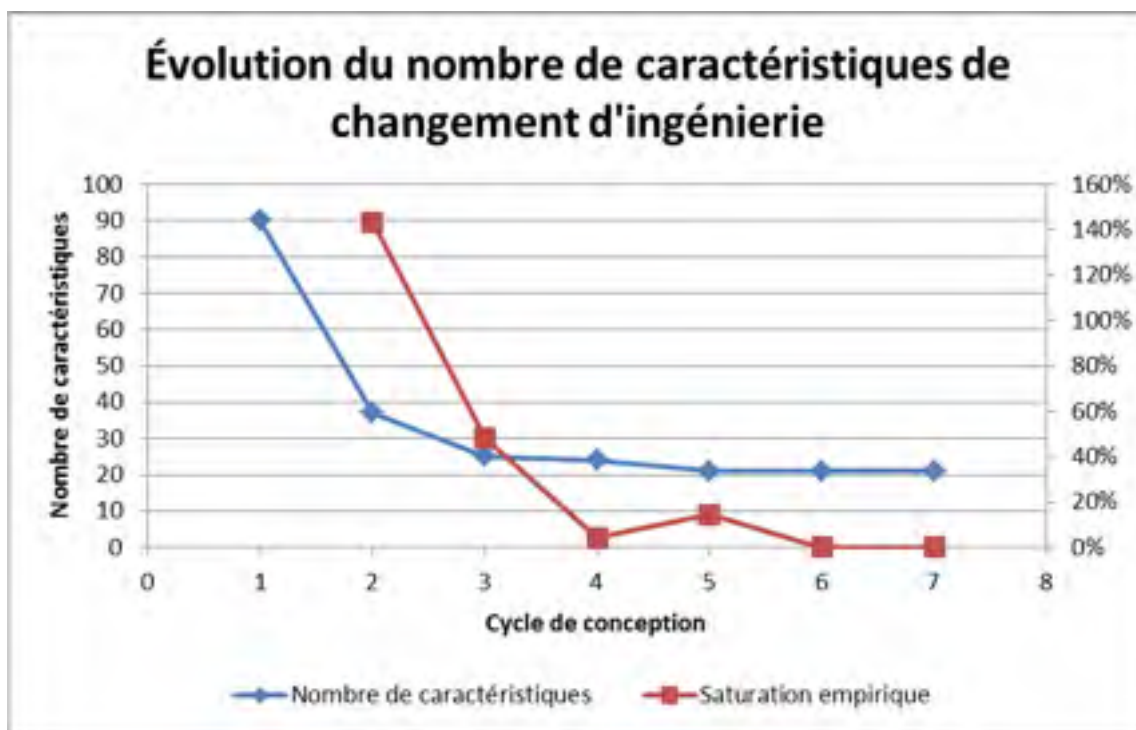


Figure 3.8 Évolution du nombre de critères au cours des cycles de conception

Le nombre de critères identifiés pour caractériser le CI évolue de moins de 5 %, le critère de saturation empirique est donc atteint.

3.4.3 Présentation de l'outil

L'outil conçu est basé sur Excel®. A partir d'une interface, l'utilisateur peut sélectionner les caractéristiques qui s'appliquent au changement qu'il implémente (Figure 3.9). En validant son choix, la liste de livrables applicables apparaît. Certains livrables sont optionnels et l'utilisateur peut décider de ne pas les inclure dans la liste s'ils ne sont pas considérés comme pertinents. L'outil permet une deuxième étape de sélection pour obtenir la liste finale. L'utilisateur peut ensuite construire sa cédule à partir de cette liste finale. Un exemple de liste de livrable, lorsque seule la caractéristique de CI majeur (clase 1, 2 ou 3) est sélectionnée figure ci-dessous (Tableau 3.7).

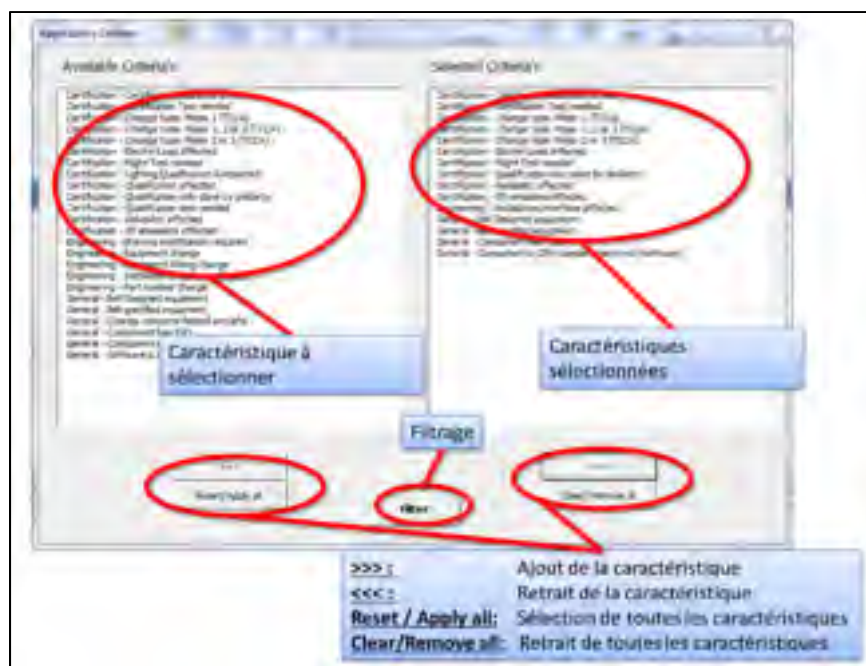


Figure 3.9 Interface utilisateur de l'outil

A priori, le gestionnaire ne possède pas l'expertise nécessaire pour évaluer les caractéristiques du CI. Il doit donc consulter les experts adéquats pour évaluer ces caractéristiques.

Les figures suivantes, qui ont été présentées et validées par un DC de l'EP, présentent les arbres de décision pour l'évaluation des caractéristiques des CI, du point de vue certification

et ingénierie (Figure 3.10 et Figure 3.11). Ces figures mettent en évidence la nécessité de la consultation d'experts pour l'évaluation des caractéristiques.

Tableau 3.7 Exemple de liste de livrable: CI majeur 1, 2 ou 3

	Livrable	Type de document	Effort d'ingénierie (h)	Effort de création de document (h)	Ressource	Caractéristique du CI	Commentaires supplémentaires
Set #4 Documentation de planification et d'approbation de la certification	Plan de Certification	Création de document	N/A	40	Groupe de Navigabilité	Certification - Type de changement: Majeur 1 (TCCA)	Si changement majeur de classe 1: CI extensif
	PSoC (Proposed statement of Compliance)	Création de document	N/A	4	DC	Certification - Type de changement: Majeur 2 or 3 (TCCA)	Si changement majeur de classe 2 ou 3: plan de certification non applicable
	Approbation par TCCA	Lettre d'approbation	N/A	N/A	TCCA	Certification - Type de changement: Majeur 1 or 2 (TCCA)	Si LOI est nécessaire
	Plan de Certification/ SoC - mise à jour après résultats	Mise à jour de document	N/A	6	Groupe de Navigabilité	Certification - Type de changement: Majeur 1, 2 or 3 (TCCA)	Nécessaire si modifications des documents de l'EP (dessins ou publications techniques)
	Approbation du SoC par TCCA	Lettre d'approbation	N/A	N/A	TCCA	Certification - Type de changement: Majeur 1 or 2 (TCCA)	Si LOI est nécessaire
	Approbation par DC	Notice d'approbation	N/A	4	DC	Certification - Type de changement: Majeur 1, 2 or 3 (TCCA)	Requis si il y a un SoC

La liste de livrables obtenue est ainsi sous forme de tableur. Des informations pertinentes ont été ajoutées tel que la durée de réalisation des livrables et les responsables. Ces informations aident l'utilisateur dans sa planification.

Au cours de la conception de l'outil et de son interface, des modifications de contenu ont eu lieu. En effet, la conception a été réalisée en parallèle du développement de la caractérisation des changements d'ingénierie. Ainsi des mises à jours du contenu de l'outil ont été réalisées au cours de sa conception ce qui a permis la mesure du temps de mise à jour. Les mises à jour prenaient entre 5 minutes et 20 minutes en fonction de leur ampleur. Cela est satisfaisant vis-à-vis du cahier des charges.

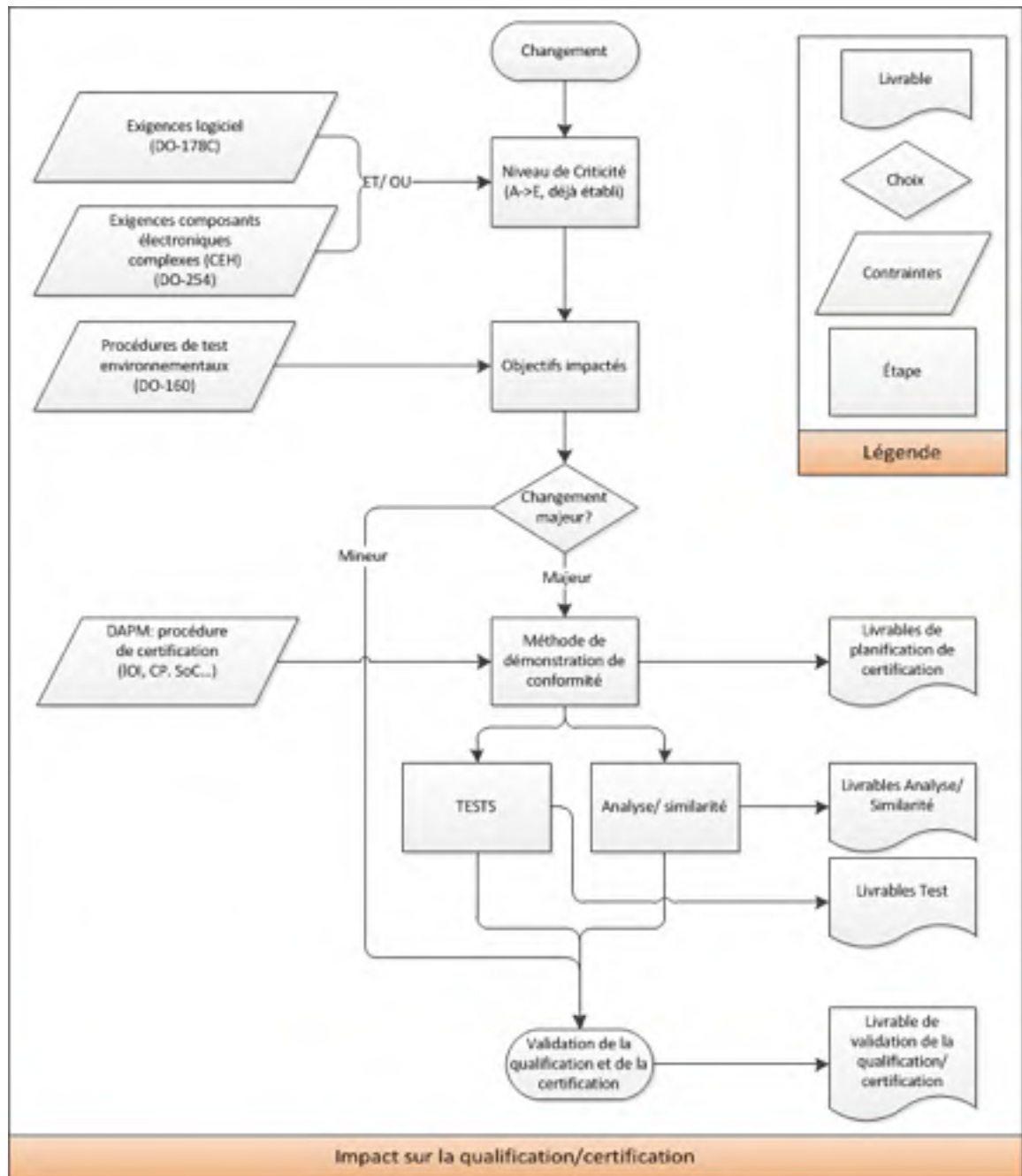


Figure 3.10 Processus de caractérisation du CI - Certification

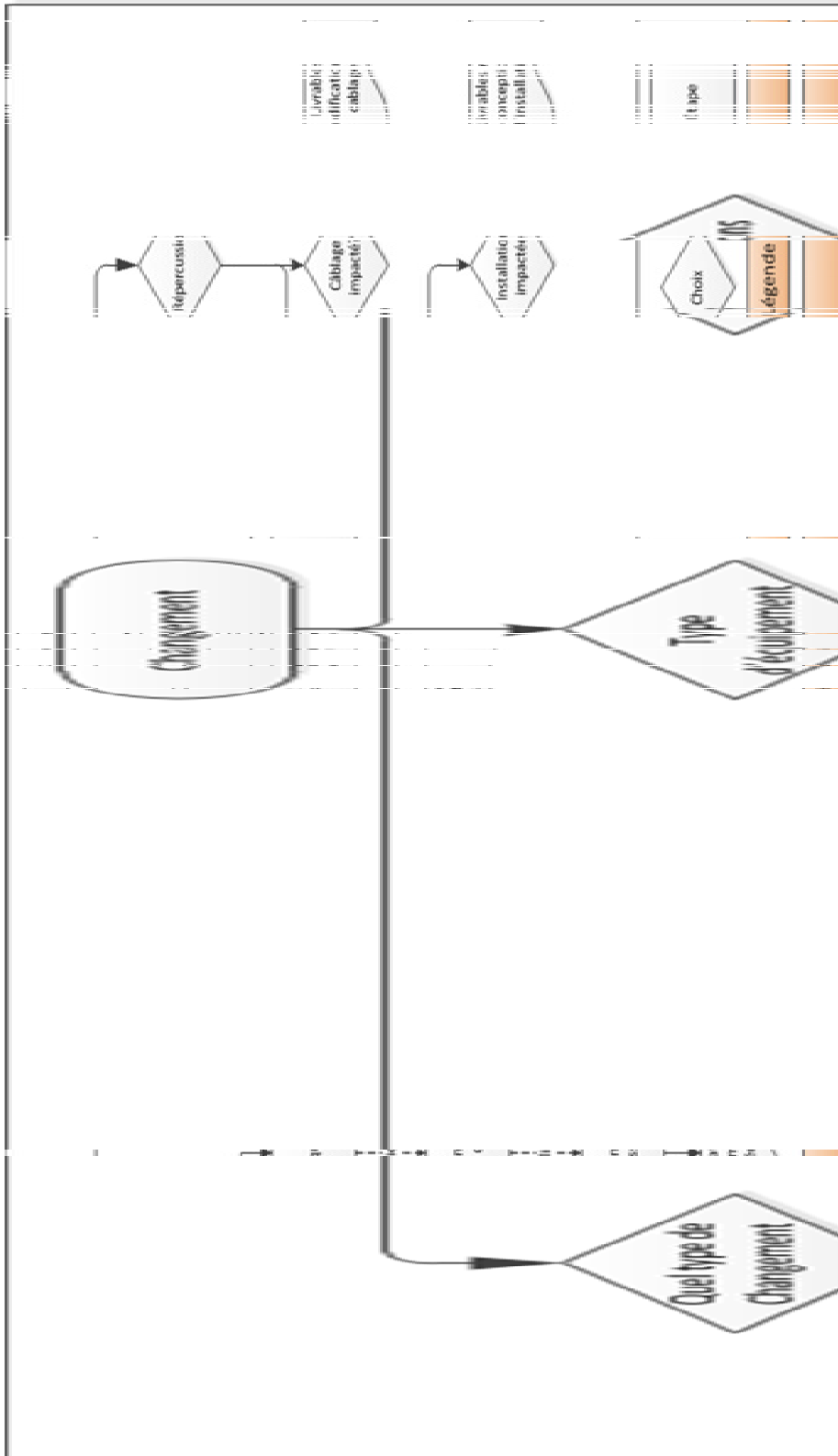


Figure 3.11 Processus de caractérisation du CI – Ingénierie et Projet

3.5 Résultats de l'évaluation qualitative

Comme décrit dans la méthodologie, l'outil final a été présenté aux utilisateurs et aux gestionnaires de projets. La présentation a duré 30 minutes incluant 15 minutes de présentation et 10 minutes de questions et 5 minutes d'évaluation au travers d'un questionnaire. Les questions du questionnaire étaient directement liées aux spécifications techniques. Les gestionnaires étaient au nombre de 5.

Le sondage, traduit en français pour ce document, est placé en ANNEXE II. Les résultats complets sont placés en ANNEXE III.

Statistiquement, on a réalisé un échantillonnage de 5 gestionnaires de projets (non participant au développement) sur une population de gestionnaire de projet de 9. La sélection est considérée comme aléatoire étant donné qu'aucun filtre n'a été fait, que l'ensemble de la population a été conviée et que les absences ne représentent à priori pas de biais. Les résultats sont placés dans les tableaux suivants (Tableau 3.8 et Tableau 3.9).

Tableau 3.8 Résultats concernant le modèle de processus

	Processus	
	Clarté du contexte (/5)	Clarté du modèle (/5)
Moyenne	4.8	4.4
Écart-Type	0.45	0.55
Demi-intervalle de confiance (95 %)	0.39	0.48
Min	4	4
Max	5	5

Tableau 3.9 Résultats concernant l'outil d'aide à la planification

	Ensemble Outil et Processus		
	Clarté du but (/5)	Utilité perçue (/5)	Formation acquise suite à la présentation (/5)
Moyenne	5	4.8	3.8
Écart-type	0	0.45	0.84
Demi-intervalle de confiance (95 %)	0*	0.39	0.73
Min	5	4	3
Max	5	5	5

Vis-à-vis des spécifications techniques (Tableau 3.2), l'outil est valide des points du vue :

- Clarté du processus (A);
- Clarté du contexte du processus (B);
- Clarté du but de l'outil (E);
- Utilité perçue (F).

Concernant le temps de formation à l'outil (H), les gestionnaires ont répondu avec une moyenne de $3,8 \pm 0,73$ (à 95%) être confortables à utiliser l'outil suite à la présentation de 30 minutes. On peut considérer ce résultat satisfaisant vis-à-vis de la spécification technique du temps de formation ($T_f < 30 \text{min}$). Ces résultats sont donc positifs quant à l'intérêt que porte l'industrie à ce projet. Cependant, il s'agit d'une seule entreprise, ces résultats auraient besoins d'être confirmés par d'autres entreprises du secteur pour estimer la validité externe de ce travail.

3.6 Résultats de l'évaluation quantitative

Comme présenté dans le chapitre méthodologie, la performance de l'outil est mesurée en appliquant l'outil à un projet de CI en cours. Le projet en question est un cas d'obsolescence sur un composant avionique situé au niveau de l'équipement d'enregistrement de données.

Le changement est dû à une modification de la réglementation relative à la certification. Les caractéristiques du changement sont présentées dans le Tableau 3.10. Au moment de l'évaluation, le projet était en cours et la planification du projet avait déjà été réalisée. Nous avons ainsi pu comparer ce qui a été planifié à ce qui est indiqué par l'outil.

Tableau 3.10 Caractéristiques du CI de l'évaluation quantitative (gras)

Certification		
Caractéristique du changement		Contexte du changement
Charge électrique affectée	Qualification affectée	Modification d'équipement
Composant Électronique Complexe affecté	Qualification contre la foudre affectée	
Logiciel affecté	Susceptibilité aux émissions radiofréquences affectée	
Fiabilité affectée	Tests de certification nécessaires	Changement majeur, Niveau 2
Interface pilote affectée	Tests de qualification nécessaires	Équipement TSO
Ingénierie		
Caractéristique du changement		Contexte du changement
Branchements électriques affectés	Installation/interface affectées	Équipement spécifié par l'entreprise
Changement de numéro de pièce		Remplacement d'équipement
Projet		
Activités du fournisseur attendues	Appareils en service concernés	Modification des dessins d'ingénierie nécessaires

Pour réaliser l'évaluation, nous avons dû distinguer les mesures suivantes comme mentionné dans la méthodologie :

- Cohérence explicite;
- Cohérence implicite;
- Cohérence totale;
- Erreurs;
- Plus-value;
- Hors-cadre.

Cette évaluation a donné lieu aux résultats suivants (Figure 3.12 et Figure 3.13).

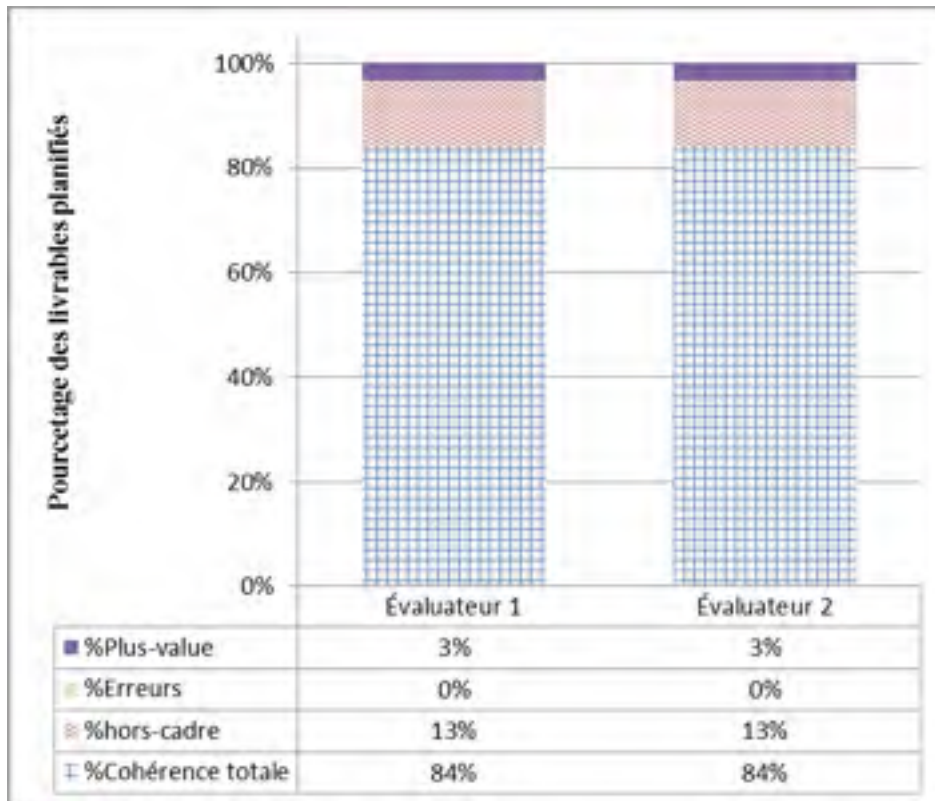


Figure 3.12 Résultats de l'évaluation quantitative de la performance de l'outil

Les résultats obtenus sont très positifs. Aucune erreur de l'outil n'a été repérée et, à l'inverse, une plus-value a pu être démontrée au travers de ce test avec l'identification de 3 % des livrables qui avaient été oubliés (2/62). Cela montre les bénéfices que peut apporter un tel outil. Une plus-value de l'outil signifie un oubli de livrable ainsi qu'un potentiel retard dans le projet dû à cet oubli évitable.

De plus, la consistance entre les résultats trouvés par les deux (2) évaluateurs manifeste une compréhension uniforme de la sémantique utilisée. Les profils étant différents, cette constance est importante pour s'assurer d'avoir utilisé un langage commun aux deux profils. Cela est nécessaire étant donné le besoin du gestionnaire de consulter un expert pour appliquer l'outil. Dans une optique de standardisation du processus de résolution de cas

d'obsolescence, ce résultat est important. De plus, cela tend à montrer que l'outil développé ici permet au gestionnaire d'être plus indépendant de l'expert. Ce résultat est à relativiser dans la mesure où un des évaluateurs a participé au développement de l'outil.

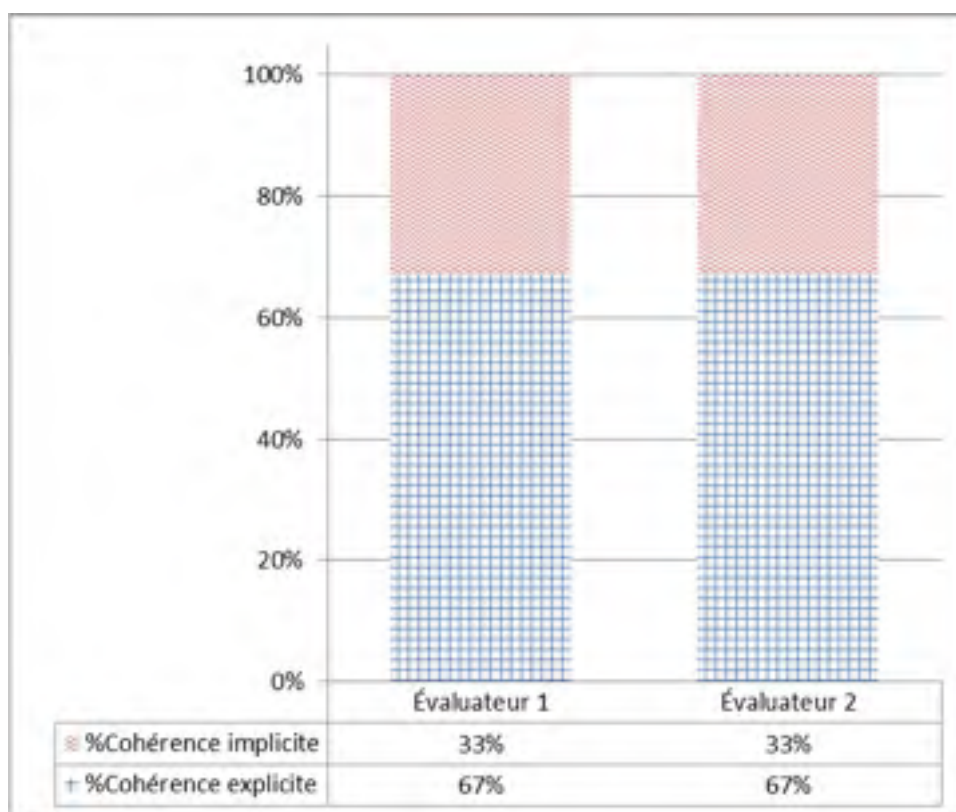


Figure 3.13 Résultat de l'évaluation quantitative pour la cohérence

La proportion de livrables hors-contexte est de 13 %. Ce pourcentage bas tend à montrer que l'on intègre la majeure partie du projet dans le cadre de cet outil et que son bon fonctionnement devrait être source d'améliorations significatives des performances du processus.

Ces résultats tendent à montrer une bonne fiabilité de l'outil du fait que l'on n'ait pas détecté d'erreur de l'outil. Basé sur cette évaluation, l'outil répond à cette spécification technique.

Du point de vue de la cohérence explicite, on obtient un résultat de 67 % des livrables en commun à l'outil et à la cédule qui sont explicitement cités. Bien que proches de la spécification technique, ce résultat est légèrement inférieur.

Ces résultats sont donc satisfaisants vis-à-vis du cahier des charges. Cependant, il ne s'agit que d'une seule mesure ce qui est insuffisant pour tester les 21 caractéristiques identifiées. D'autres mesures sont donc nécessaires pour conclure sur ces résultats.

Ce test a également permis de mesurer les temps d'application de l'outil. Les évaluateurs ont indiqué une application de durée de 2 minutes pour identifier la liste des livrables applicables. Ce résultat est consistant avec le cahier des charges défini dans l'analyse des besoins.

CHAPITRE 4

DISCUSSION

Les deux (2) principaux résultats de ce travail sont, d'une part, la modélisation d'un PCI pour le secteur aéronautique et d'autre part la caractérisation des cas d'obsolescence en fonction de leur influence sur le PCI (inscrit au cœur de l'outil). Dans ce chapitre, nous revenons sur les résultats obtenus en vue de souligner leurs contributions, leurs limitations et proposer des recommandations pour les recherches futures ainsi que pour l'EP.

4.1 Contributions et limitations du modèle de PCI

Tout d'abord, le modèle de PCI contribue à sa formalisation et permet de guider les gestionnaires dans la réalisation de CI. Le modèle de PCI se concentre autour de la planification, conception et certification du CI, mais laisse de côté les considérations d'intégration du CI dans la production, de gestion de l'inventaire et de gestion de la chaîne d'approvisionnement. Nous avons effectivement préféré concentrer nos efforts sur le cœur du problème dans le cas de l'obsolescence, comme entendu avec l'EP lors de l'élaboration du modèle SIPOC. Le faible pourcentage (13 %) de livrables hors-cadre identifiés lors de l'évaluation quantitative nous conforte dans notre choix. Ce faible pourcentage montre la représentativité du cadre du PCI. Nous recommandons tout de même à l'EP d'étendre ce modèle afin d'en améliorer la portée.

La méthodologie utilisée pour la création du modèle de PCI est basée sur un échantillonnage représentatif des fonctions sollicitées par le processus, leur expérience dans ce type de projet ainsi qu'un critère de saturation empirique. Elle permet d'assurer la validité du modèle. Cependant, le nombre de personnes sollicitées (6), limité par le nombre de personnes disponibles parmi le nombre de personnes ayant une expérience significative dans le déroulement du PCI, reste faible. Si le modèle obtenu doit être représentatif du fonctionnement de l'EP, il ne l'est probablement pas pour une autre entreprise.

Du point de vue de la littérature, il n'existe pas à notre connaissance de modèle de PCI pour l'industrie aéronautique comme indiqué en revue de la littérature. Bien qu'il semble peu probable que ce modèle soit absent des entreprises du secteur, ce travail contribue à la diffusion de cette connaissance. La modélisation du PCI contribue à la compréhension du processus, des contraintes auxquelles il est soumis ainsi que des facteurs qui influencent son déroulement. Étant l'importance que gagne le phénomène de l'obsolescence, ainsi que l'importance du PCI dans la gestion de l'obsolescence, la compréhension du processus est essentielle.

La principale limitation du modèle du PCI est sa validité externe. Sa création se base sur une seule organisation (celle de l'EP), et n'est pas nécessairement applicable aux autres du secteur aéronautique. Cependant, la majeure partie des livrables du PCI et des caractéristiques de CI proviennent des exigences de certification de navigabilité. Or cette contrainte est imposée à l'ensemble des entreprises du secteur aéronautique. De plus, les autorités de certification majeures (TCCA, FAA et EASA) se reconnaissent et se réfèrent aux mêmes documents de référence RTCA. La validité de ce travail dépasse donc, *à priori*, le cadre de l'EP et devrait pouvoir se généraliser au secteur aéronautique canadien, voire au reste du monde. La confrontation du modèle de PCI à d'autres entreprises est donc une recommandation.

4.2 Contribution et limitations de l'outil d'aide à la planification

La contribution majeure de ce travail est l'outil développé qui permet d'assister la planification des PCI en identifiant les livrables à réaliser. Cet outil permet d'assurer l'exhaustivité de la liste des livrables du PCI là où l'humain tend à en oublier. Les résultats de l'évaluation démontrent cette contribution.

Pour l'industriel, l'effort de planification est également réduit. Auparavant, le gestionnaire devait consulter de nombreux experts pour dégager la liste de livrables à produire et construire sa cédule en fonction. Cet outil diminue considérablement le travail de l'expert qui n'a plus qu'à assister le gestionnaire dans la caractérisation des CI, l'outil en dégageant la liste de livrables correspondants. De plus les informations relatives aux différents livrables

(effort de réalisation, ressources nécessaires *etc.*) sont précieuses pour le gestionnaire qui doit planifier le PCI.

Ce travail répond à un besoin industriel ainsi qu'à un manque identifié dans la littérature. À notre connaissance, ce besoin n'apparaît pas dans la littérature, et il n'existe donc pas de réponse à celui-ci. Il est possible que certaines entreprises aient des outils similaires à celui développé ici mais ne les aient pas publiés. Notre travail identifie ainsi un besoin pour lequel il n'existe pas de réponse formelle, ce qui est une contribution en tant que telle. Ce besoin est identifié par l'analyse des besoins et confirmé par l'évaluation qualitative. Bien qu'absent de la littérature, le lien entre les CI et leur processus semble pourtant nécessaire pour maîtriser le PCI. La caractérisation développée ici contribue ainsi à la compréhension de ce lien en proposant un modèle ainsi qu'à la diffusion de la connaissance des CI en aéronautique. Elle contribue par exemple à la compréhension de l'impact qu'ont ces CI sur les entreprises. En effet, la réalisation des livrables s'accompagne de coûts et de délais qui sont directement liées à la performance des entreprises. Dans un contexte d'obsolescence de plus en plus fréquent, les changements d'ingénierie se multiplient et ces connaissances deviennent importantes.

L'utilisation de l'outil se base sur la caractérisation du CI. Or, certaines caractéristiques nécessitent des compétences en ingénierie ou en certification pour les déterminer. Bien que cet outil soit destiné aux gestionnaires de projet, ces derniers ont tout de même besoin de consulter les experts pour l'utiliser à son plein potentiel. L'utilisation de l'outil sans consultation des experts peut tout de même permettre au gestionnaire d'avoir une estimation de la liste des livrables à fournir et il peut se servir de cette estimation pour réaliser une cédule préliminaire. L'outil contribue donc à l'indépendance des gestionnaires de projet vis-à-vis des experts. Cette indépendance est néanmoins limitée car le gestionnaire doit consulter les experts. Nous recommandons ainsi la réalisation de travaux permettant de réduire ou supprimer cette dépendance aux experts. Cela nécessiterait des efforts de modélisation des caractéristiques des CI.

La principale limitation de validité de ce travail se trouve au niveau du nombre de tests d'évaluation quantitative. Un seul test ne permet pas de conclure sur la pertinence des caractéristiques identifiées et sur la capacité de l'outil à identifier l'ensemble des livrables nécessaires au PCI. Des tests supplémentaires permettraient de déterminer l'impact de cet outil sur l'exhaustivité de la planification et sur la performance de la gestion de projet associée. La validité externe de l'outil est déterminée par celle du modèle du PCI discutée ci-dessus.

De plus, l'avis des experts reste sujet aux erreurs, notamment dans l'estimation des caractéristiques des CI. En effet, pour réaliser cette caractérisation, il faut être capable d'une part d'évaluer chacune des caractéristiques pour le CI et d'autre part d'évaluer l'étendue du CI. Or, ces évaluations ne sont pas triviales, en témoigne la nécessité d'experts, et nous recommandons de développer des modèles permettant de faciliter ces évaluations. Il s'agit de la piste de recherche mise de côté lors de la phase de suggestion et donc d'une recommandation pour de futures recherches (Figure 3.1). Ces modèles nécessitent des données sur les projets de CI. Nous recommandons à l'EP de mettre en place la conservation systématique et la formalisation de ces données pour alimenter de futurs modèles.

CONCLUSION

Au travers de ce travail nous avons étudié la problématique de la maîtrise du PCI afin de répondre efficacement au phénomène de l'obsolescence. Pour cela nous avons cherché à développer un outil d'aide à la planification, traçant le lien entre les caractéristiques de CI et la liste de livrables du PCI. La méthodologie utilisée est une application directe de la méthodologie de la science de la conception. Un premier effort de modélisation a permis d'identifier la liste de livrables du PCI. Ces livrables ne s'appliquent que sous certaines conditions relatives aux caractéristiques du CI. A partir de ces conditions d'applicabilité nous avons pu déterminer une liste de 21 caractéristiques déterminantes pour l'étendue de la liste de livrables du PCI. Nous avons ensuite développé une interface utilisateur pour extraire rapidement, à partir des caractéristiques d'un CI, la liste des livrables applicables. Des informations pertinentes (effort de réalisation, responsables) ont été associés à ces livrables pour améliorer la portée de l'outil.

Les résultats de validation interne sont, bien que limités dans la quantité de tests effectués, très encourageants. Ils manifestent l'intérêt des futurs utilisateurs pour cet outil ainsi qu'une réelle plus-value pour la planification des CI. En effet, l'outil permet d'une part d'alléger la consultation d'experts nécessaire à la planification de CI et d'autre part évite des oublis lors de l'élaboration de la liste des livrables applicables.

Contributions de recherche

Les principales contributions à la recherche scientifique de ce travail sont :

- Un modèle de PCI dans l'industrie aéronautique;
- Une caractérisation des CI permettant de lier les CI au livrables du PCI.

Pour l'EP, les contributions de ce travail sont :

- Un outil d'aide à la planification de PCI, réduisant l'effort de planification, augmentant l'indépendance du gestionnaire par rapport aux experts et améliorant la fiabilité de l'identification des livrables.
- Un modèle de PCI contribuant à la formalisation de celui-ci.

Recommandations pour les futures recherches

Pour les futures recherches nous avons identifié les recommandations suivantes :

- Le modèle de PCI développé ici se concentre au cœur de la problématique de l'obsolescence. Son extension à l'implémentation du CI dans la production de sa gestion dans l'inventaire ou de sa gestion au niveau de la chaîne d'approvisionnement améliorerait sa portée.
- Les mesures de validité sont limitées à l'EP. L'application de cet outil à d'autres entreprises du secteur aéronautique permettrait d'étendre la validité externe de ce travail.
- Dans la continuité de ce travail, un effort de modélisation supplémentaire pour améliorer l'automatisation de l'outil et rendre le gestionnaire de projet complètement indépendant des experts serait pertinent. Un tel effort augmenterait la contribution à l'effort de planification.
- La modélisation de propagation de CI pour les composants sujets à l'obsolescence permettrait, à partir d'un changement initié par de l'obsolescence, de déterminer l'étendue du CI. Cela permettrait d'améliorer sa planification et de maîtriser son processus. Il s'agit de la piste envisagée en phase de suggestion (Figure 3.1).


ANNEXE I

QUALITÉS DU MODÈLE CMQF

#	Nom	Référence	Intérêt	Description
P1	Adéquation Modèle-domaine	Domaine Physique	Modèle Physique	Le Domaine est approprié à la représentation
P2	Qualité de l'ontologie	Modèle Physique	Langage Physique	L'articulation du modèle est approprié à des termes linguistique
P3	Qualité Syntaxique	Langage Physique	Représentation Physique	Les termes linguistiques sont appropriés à la représentation
P4	Qualité Sémantique	Domaine Physique	Représentation Physique	La représentation est en adéquation avec la réalité du domaine
P5	Adéquation Langage-Domaine	Domaine Physique	Langage Physique	Le langage est approprié pour décrire le domaine
P6	Qualité intentionnelle	Modèle Physique	Représentation Physique	La représentation traduit le modèle
P7	Qualité Empirique	Représentation Physique	Représentation Physique	Validité interne de la représentation (peut être obtenue en comparant la représentation à une autre idéale)
C1	Adéquation Modèle-domaine perçue	Connaissance du Domaine	Connaissance du Modèle	Idem que P1 mais passé à travers le filtre de l'interprétation (ces aspects manquent de validation par des études)
C2	Qualité de l'ontologie perçue	Connaissance du Modèle	Connaissance du Langage	Idem que P2 mais passé à travers le filtre de l'interprétation (ces aspects manquent de validation par des études)
C3	Qualité Syntaxique perçue	Connaissance du Langage	Connaissance de la Représentation	Idem que P3 mais passé à travers le filtre de l'interprétation (ces aspects manquent de validation par des études)
C4	Qualité Sémantique perçue	Connaissance du Domaine	Connaissance de la Représentation	Idem que P4 mais passé à travers le filtre de l'interprétation (ces aspects manquent de validation par des études)
C5	Adéquation Langage-Domaine perçue	Connaissance du Domaine	Connaissance du Langage	Idem que P5 mais passé à travers le filtre de l'interprétation (ces aspects manquent de validation par des études)
C6	Qualité intentionnelle perçue	Connaissance du Modèle	Connaissance de la Représentation	Idem que P6 mais passé à travers le filtre de l'interprétation (ces aspects manquent de validation par des études)
C7	Qualité Empirique perçue	Connaissance de la Représentation	Connaissance de la Représentation	Idem que P7 mais passé à travers le filtre de l'interprétation (ces aspects manquent de validation par des études)
A1	Qualité de la vision	Domaine Physique	Connaissance du Domaine	Qualité de la connaissance du domaine
A2	Qualité pédagogique	Modèle Physique	Connaissance du Modèle	Concordance des structures du modèle et de celles de l'utilisateur
A3	Qualité Linguistique	Langage Physique	Connaissance du Langage	Qualité de la connaissance du langage
A4	Qualité Pragmatique	Représentation Physique	Connaissance de la Représentation	Qualité de la compréhension de l'utilisateur
D1	Adéquation de l'application Domaine - Modèle	Connaissance du Domaine	Modèle Physique	Le modèle concorde avec la compréhension du domaine de l'utilisateur
D2	Adéquation de l'application Domaine - Langage	Connaissance du Domaine	Langage Physique	Le langage utilisé est cohérent avec la compréhension du domaine de l'utilisateur
D3	Qualité de l'application de la connaissance du domaine	Connaissance du Domaine	Représentation Physique	La représentation est en adéquation avec la compréhension du domaine
D4	Adéquation de l'application Modèle - Langage	Connaissance du Modèle	Langage Physique	Le langage utilisé est cohérent avec la structure du modèle telle qu'elle est comprise par l'utilisateur
D5	Qualité de l'application de la connaissance du Modèle	Connaissance du Modèle	Représentation Physique	La représentation est en adéquation avec la structure du modèle telle qu'elle est comprise par l'utilisateur
D6	Qualité de l'application de la connaissance du Langage	Connaissance du Langage	Représentation Physique	La représentation est cohérente avec l'interprétation du langage par l'utilisateur

ANNEXE II

SONDAGE DE VALIDATION


Le génie pour l'industrie

Évaluation de l'outil d'aide à la planification

Évaluation					
Comment évaluez-vous les déclarations suivantes	(5) Complètement vraie	(4) Plutôt vraie	(3) Assez vraie	(2) Plutôt fausse	(1) Complètement fausse
Processus					
1 - Le contexte du processus est clair Commentaires :	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2 - Le processus est clair Commentaires :	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Outil de d'aide à la planification dans son ensemble					
3 - Je comprends le but de cet outil Commentaires :	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4 - Cet outil est utile Commentaires :	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5 - Je me sens confortable d'utiliser cet outil après la présentation Commentaires :	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Commentaires

Commentaires

ANNEXE III

RÉSULTATS DU SONDAGE DE VALIDATION

	Évaluateur				
	1	2	3	4	5
Contexte clair	5	5	4	5	5
Processus clair	4	5	4	5	4
Processus sans contraintes	5	5	3	5	5
Utilité claire	5	5	5	5	5
Outil utile	5	5	4	5	5
En adéquation avec but	5	5	4	5	5
Utilisation acquise	5	4	3	4	3

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Ackoff, Russell Lincoln. 1962. « Scientific method: Optimizing applied research decisions ».
- Aldin, Laden, et Sergio de Cesare. 2011. « A literature review on business process modelling: new frontiers of reusability ». *Enterprise Information Systems*, vol. 5, n° 3, p. 359-383.
- Alford, L. D., Jr. 2000. « The problem with aviation COTS ». In *2000 IEEE Autotestcon Proceedings. AUTOTESTCON 2000. IEEE Systems Readiness Technology Conference. Future Sustainment for Military and Aerospace, 18-21 Sept. 2000.* (Piscataway, NJ, USA), p. 519-24. Coll. « 2000 IEEE Autotestcon Proceedings. IEEE Systems Readiness Technology Conference. Future Sustainment for Military Aerospace (Cat. No.00CH37057) »: IEEE. < <http://dx.doi.org/10.1109/AUTEST.2000.885634> <http://ieeexplore.ieee.org/ielx5/7082/19092/00885634.pdf?tp=&arnumber=885634&inumber=19092> >.
- Bartels, Bjoern, Ulrich Ermel, Michael Pecht et Peter Sandborn. 2012a. « Introduction to Obsolescence Problems ». In *Strategies to the Prediction, Mitigation and Management of Product Obsolescence.* p. 1-16. John Wiley & Sons, Inc. < <http://dx.doi.org/10.1002/9781118275474.ch1>.
- Bartels, Bjoern, Ulrich Ermel, Michael Pecht et Peter Sandborn. 2012b. « Proactive Obsolescence Management ». In *Strategies to the Prediction, Mitigation and Management of Product Obsolescence.* p. 193-197. John Wiley & Sons, Inc. < <http://dx.doi.org/10.1002/9781118275474.ch8>.
- Bernal, Luis, Utz Dornberger, Alfredo Suvelza et Trevor Byrnes. 2009. « Quality Function deployment (QFD) for services ». *Leipzig: International SEPT Program.*
- Biazzo, Stefano. 2000. « Approaches to business process analysis: a review ». *Business Process Management Journal*, vol. 6, n° 2, p. 99-112.
- Clarkson, P John, Caroline Simons et Claudia Eckert. 2004. « Predicting change propagation in complex design ». *Journal of Mechanical Design*, vol. 126, n° 5, p. 788-797.
- de Oca, Isel Moreno-Montes, Monique Snoeck, Hajo A Reijers et Abel Rodríguez-Morffi. 2015. « A systematic literature review of studies on business process modeling quality ». *Information and Software Technology*, vol. 58, p. 187-205.
- Diprima, Mike. 1982. « Engineering Change Control and Implementation Considerations ». *PRODUCT. & INVENT. MGMT.*, vol. 23, n° 1, p. 81-87.

- Dresch, Aline, Daniel Pacheco Lacerda et José Antônio Valle Antunes Jr. 2015. *Design Science Research : A Method for Science and Technology Advancement* (2015). Cham: Springer International Publishing : Imprint: Springer, 1 ressource en ligne (XVIII, 161 p.) p.
- Eckert, Claudia, P John Clarkson et Winfried Zanker. 2004. « Change and customisation in complex engineering domains ». *Research in engineering design*, vol. 15, n° 1, p. 1-21.
- Feng, Dan. 2007. « Optimizing lifetime buy quantities to minimize lifecycle cost ».
- Fleurent, Martin. 2013. « Amélioration du processus de gestion des demandes de changement d'ingénierie dans le domaine de la construction ». École Polytechnique de Montréal.
- Gravier, Michael J., et Stephen M. Swartz. 2009. « The dark side of innovation: Exploring obsolescence and supply chain evolution for sustainment-dominated systems ». *The Journal of High Technology Management Research*, vol. 20, n° 2, p. 87-102.
- Hammer, Michael, et James Champy. 1993. « Reengineering the corporation: A manifesto for business revolution ». *Business Horizons*, vol. 36, n° 5, p. 90-91.
- Han, Sangwon, SangHyun Lee et Feniosky Peña-Mora. 2011. « Identification and quantification of non-value-adding effort from errors and changes in design and construction projects ». *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 138, n° 1, p. 98-109.
- Jarratt, T. A. W., C. M. Eckert, N. H. M. Caldwell et P. J. Clarkson. 2011. « Engineering change: an overview and perspective on the literature ». *Research in Engineering Design*, vol. 22, n° 2, p. 103-124.
- Jarratt, Timothy, John Clarkson et Claudia Eckert. 2005. « Engineering change ». In *Design process improvement*. p. 262-285. Springer.
- Kidd, Michael, et Miranda Sullivan. 2010. « Reactive obsolescence management measurements, a better approach ». *Naval Engineers Journal*, vol. 122, n° 1, p. 75-80.
- Levardy, Viktor, et Tyson Browning. 2009. « An Adaptive Process Model to Support Product Development Project Management ». *IEEE Transactions on Engineering Management*, vol. 56, n° 4, p. 600-620.
- Lindland, Odd Ivar, Guttorm Sindre et Arne Solvberg. 1994. « Understanding quality in conceptual modeling ». *IEEE software*, vol. 11, n° 2, p. 42-49.

- Maull, Roger, David Hughes et Jan Bennett. 1992. « The role of the bill-of-materials as a CAD/CAPM interface and the key importance of engineering change control ». *Computing & Control Engineering Journal*, vol. 3, n° 2, p. 63-70.
- Mili, Hafedh, Guy Tremblay, Guitta Bou Jaoude, Éric Lefebvre, Lamia Elabed et Ghizlane El Boussaidi. 2010. « Business process modeling languages: Sorting through the alphabet soup ». *ACM Computing Surveys (CSUR)*, vol. 43, n° 1, p. 4.
- Nelson, H James, Geert Poels, Marcela Genero et Mario Piattini. 2012. « A conceptual modeling quality framework ». *Software Quality Journal*, vol. 20, n° 1, p. 201-228.
- Nelson III, Raymond S, et Peter Sandborn. 2012. « Strategic management of component obsolescence using constraint-driven design refresh planning ». *International Journal of Product Lifecycle Management*, vol. 6, n° 2, p. 99-120.
- Nelson, Raymond S, et Peter Sandborn. 2012. « Strategic management of component obsolescence using constraint-driven design refresh planning ». *International Journal of Product Lifecycle Management*, vol. 6, n° 2, p. 99-120.
- Ollinger, Gabriel Aguirre, et Thomas F Stahovich. 2004. « RedesignIT—a model-based tool for managing design changes ». *Journal of Mechanical Design*, vol. 126, n° 2, p. 208-216.
- Ould, Martyn A. 1995. *Business processes: modelling and analysis for re-engineering and improvement*, 598. Wiley Chichester.
- Pikosz, Peter, et Johan Malmqvist. 1998. « A comparative study of engineering change management in three Swedish engineering companies ». In *Proceedings of the DETC98 ASME design engineering technical conference*. p. 78-85.
- Pires, Alvaro P. 1997. « Échantillonnage et recherche qualitative: essai théorique et méthodologique ». *La recherche qualitative. Enjeux épistémologiques et méthodologiques*, p. 113-169.
- Pulkkinen, Antti, Petri Huhtala, Simo-Pekka Leino, Juha-Pekka Anttila et Ville V Vainio. 2015. « Characterising the Industrial Context of Engineering Change Management ». In *IFIP International Conference on Product Lifecycle Management*. p. 618-627. Springer.
- Reidelbach, Mark A. 1991. « Engineering change management for long-lead-time production ». *Production and Inventory Management Journal*, vol. 32, n° 2, p. 84.
- Rojo, Francisco Javier Romero, Rajkumar Roy et Essam Shehab. 2010. « Obsolescence management for long-life contracts: state of the art and future trends ». *The*

International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 49, n° 9-12, p. 1235-1250.

RTCA. 2000. « DO - 254: Design Assurance Guidance for Airborne Electronic Hardware ».

RTCA. 2007. « DO - 160 : Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment, Radio Technical Commission for Aeronautics, issue F ». vol. 6.

RTCA. 2011. « DO - 178C: Software Considerations in Airborne Systems and Equipment Certification ».

Shankar, Prabhu, Beshoy Morkos et Joshua D Summers. 2012. « Reasons for change propagation: a case study in an automotive OEM ». *Research in Engineering Design*, vol. 23, n° 4, p. 291-303.

Stevenson, William J., Claudio Benedetti et Youssef Abdou Youssef. 2012. *La gestion des opérations : produits et services* (2012), 3e éd. Montréal: Chenelière-McGraw-Hill, 784 p.

TCCA. 2004. « AC 500-16 Establishing the Certification Basis of Changed Aeronautical Products ».

TCCA. 2015a. *Airworthiness Chapter 505 - Delegation Of Authority*.

TCCA. 2015b. « Airworthiness Chapter 527 - Normal Category Rotorcraft ».

TCCA. 2015c. « Application Guidelines for Helicopter FAA to TCCA Licence Conversion Agreement ». <
<https://www.tc.gc.ca/eng/civilaviation/opssvs/managementservices-referencecentre-ac-400-2143.html> >.

Tetteh, Edem G., et Benedict M. Uzochukwu. 2015. « Lean Six Sigma Approaches in Manufacturing, Services, and Production ».

Teunter, Ruud H, et Willem K Klein Haneveld. 2002. « Inventory control of service parts in the final phase ». *European Journal of Operational Research*, vol. 137, n° 3, p. 497-511.

Vaishnavi, Vijay, et William Kuechler. 2015. *Design science research methods and patterns : innovating information and communication technology* (2015), Second edition. Boca Raton, Florida: CRC Press, 373 p.

Von Alan, R Hevner, Salvatore T March, Jinsoo Park et Sudha Ram. 2004. « Design science in information systems research ». *MIS quarterly*, vol. 28, n° 1, p. 75-105.

- Wand, Yair, et Ron Weber. 1990. « An ontological model of an information system ». *IEEE transactions on software engineering*, vol. 16, n° 11, p. 1282-1292.
- Wickel, M, N Chucholowski, F Behncke et U Lindemann. 2015. « Comparison of seven company-specific Engineering Change Processes ». In *Modelling and Management of Engineering Processes*. p. 125-136. Springer.
- Wirthlin, Joseph R. 2000. *Best practices in user needs/requirements generation*. DTIC Document.