

Conception Architecturale de Systèmes Complexes par une Approche Energétique : Application au Domaine Aéronautique.

Corentin Malchair

▶ **To cite this version:**

Corentin Malchair. Conception Architecturale de Systèmes Complexes par une Approche Energétique : Application au Domaine Aéronautique.. Génie des procédés. HESAM Université, 2021. Français. NNT : 2021HESAE005 . tel-03482792

HAL Id: tel-03482792
https://pastel.hal.science/tel-03482792

Submitted on 16 Dec 2021

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

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

HESAM UNIVERSITÉ

Arts et Métiers Sciences et Technologies

ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES DES MÉTIERS DE L'INGÉNIEUR
École doctorale n° 432 : Sciences des Métiers de l'ingénieur – Campus de Talence

THÈSE

présentée par : **Corentin MALCHAIR**

soutenue le : **29 Janvier 2021**

pour obtenir le grade de : **Docteur d'HESAM Université**

préparée à : **École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers**

Spécialité : **Conception**

Conception Architecturale de Systèmes Complexes par une Approche Energétique : Application au Domaine Aéronautique.

THÈSE dirigée par :
Jérôme PAILHES

et co-encadrée par :
Marco MONTEMURRO

Jury

M. Éric BONJOUR, Professeur, ERPI, Université de Lorraine	Président
M. Denis CAVALLUCCI, Professeur, CSIP, INSA Strasbourg	Rapporteur
M. Alain DAIDIÉ, Professeur, ICA, INSA Toulouse	Rapporteur
Mme Elise GRUHIER, Professeur, I2M, Arts et Métiers	Examinatrice
M. Jérôme PAILHES, Maître de conférences, HDR, I2M, Arts et Métiers	Examinateur
M. Marco MONTEMURRO, Professeur, I2M, Arts et Métiers	Examinateur
M. Yvan BAUDIN, Manager IdLab, Airbus	Invité

THÈSE

À mes parents,

REMERCIEMENTS

J’aimerais tout d’abord remercier mes directeurs de thèse scientifiques Jérôme Pailhès et Marco Montemurro qui m’auront appris à mettre de l’ordre dans mes idées, à nuancer mon propos en étant un peu moins absolu dans ma vision des choses et à toujours me remettre en question. Leur disponibilité, leur bienveillance, leurs conseils et leurs relectures méticuleuses m’auront sans aucun doute permis de mener à bien cette thèse malgré le contexte. J’adresse bien sûr aussi de profonds remerciements à mon directeur de thèse industriel Yvan Baudin avec qui je travaillais déjà avant le début de ces travaux et avec qui j’espère pouvoir continuer à collaborer. C’est lui qui a été à l’initiative de ces travaux de recherche et qui m’a proposé de continuer à travailler ensemble sur ce sujet des plus passionnants tout en me laissant la liberté de le réorienter au cours du déroulement de ma thèse. La bienveillance et la confiance dont il a toujours fait preuve à mon égard ont permis de jeter les bases d’une collaboration solide et efficace et m’ont permis de mener mes travaux de recherches dans les meilleures conditions matérielle et intellectuelle. Cette thèse leur doit beaucoup, pour tout cela je les en remercie.

Je voudrais remercier Elise Gruhier, Éric Bonjour, Denis Cavallucci et Alain Daidié pour leur participation au jury lors de ma soutenance de thèse et pour nos échanges à l’issue de celle-ci. Leur relecture et les commentaires subséquents m’auront permis d’améliorer mon mémoire de thèse final et nos échanges à l’issue de la soutenance m’ont ouvert de nombreuses perspectives de recherches et de développements futurs. Je les remercie pour cette belle conclusion à une thèse dont je garderai un excellent souvenir.

J’adresse aussi des remerciements profonds au trio d’ingénieurs et architectes qui auront suivi mes travaux de thèse pratiquement jusqu’à la fin, François Bouissière, Claude Cuiller et Pierre-Éric Dereux. Leurs connaissances de l’entreprise et de la conception architecturale ont apporté énormément de matière à mes travaux de recherche, je les remercie d’avoir pu m’impliquer autant dans leurs activités et de m’avoir permis de rencontrer de nombreux acteurs du processus de développement. Ces travaux ne seraient pas les mêmes sans eux et, étant partenaires de ces travaux de recherche, j’espère sincèrement que les résultats de cette thèse leur seront utiles dans leur domaine d’activité et qu’il sera possible de continuer à développer la méthodologie proposée ici avec eux. Je tiens également à mentionner ici toutes les personnes que j’ai pu interviewer dans le cadre de mon analyse du contexte et de l’environnement industriel, je les remercie d’avoir bien voulu se prêter au jeu que je leur ai proposé. D’une manière générale, j’ai pu rencontrer des gens intelligents, bienveillants et enthousiastes qui ont su me donner les clés de compréhension nécessaires à une bonne analyse d’une industrie infiniment complexe.

Je remercie également mes collègues du laboratoire de l’I2M ainsi que les différents doctorants que j’ai été amené à rencontrer. Tous ont toujours su m’accorder du temps quand c’était nécessaire, une oreille attentive (parfois deux) lors de mes visites et d’excellents conseils tout au long de ma thèse. Mes remerciements vont aussi à mes collègues de l’IdLab où j’ai passé la majeure partie de mon temps et où se sont déroulées la plupart des activités de recherche. Ma communication sporadique sur mes travaux de recherche ne leur aura pas toujours permis de comprendre exactement mes activités ou mes difficultés ce qui ne les a pourtant pas empêché d’être disponibles et de m’apporter leur soutien. Mention spéciale à mon collègue doctorant Etienne Ané pour les (très) nombreuses discussions et pauses-café plus ou moins liées au sujet de mes recherches qui m’auront permis, entre autres, de garder ma motivation et ma curiosité intactes pendant ma thèse. Son regard de néophyte sur le thème de mes recherches m’a été d’une grande aide pour préciser et affiner mon propos. Je lui souhaite que sa thèse se déroule au mieux malgré le contexte difficile et je ne doute pas de la qualité du mémoire de thèse final qu’il produira. Merci à ceux qui ont su trouver le temps et la volonté (il

en faut) de relire mes papiers et mes bouts de thèse au fur et à mesure qu'ils étaient produits. L'IdLab de manière générale m'a toujours proposé un accueil et des conditions de travail privilégiés, un environnement agréable propice à l'échange, à la curiosité et au rire, ingrédients essentiels d'une vie professionnelle épanouie selon moi.

Mes remerciements vont aussi à mes amis qui ont eu la patience de ne pas obtenir de réponse à la question récurrente « Alors c'est quand ta soutenance ? » mais ne se sont pas découragés et ont continué à me la poser. Je suis particulièrement heureux d'avoir pu les conserver dans mon entourage malgré l'éloignement professionnel et le contexte sanitaire particulièrement contraignant pour entretenir des relations sociales. J'ai eu l'immense plaisir de constater que nombre d'entre eux ont répondu présent le jour de ma soutenance, prêts à m'encourager et à partager cet évènement. Cette journée bien que mémorable ne saurait occulter les nombreuses années de bons moments et de souvenirs qui auront permis d'oublier momentanément le travail dans des soirées, repas, week ends, évènements et ce bien avant que cette thèse ne débute. Merci donc à Alex, Anne-Laure, Antoine, Guillaume, Judith, Julien, Kévin, Lucien, Marion, Marion, Peyo, Raphaël, Ronny, Sébastien et Thomas. Un merci tout particulier à Ludivine Schmidt, présente aussi à ma soutenance avec la double casquette de caméra(wo)man, qui aura su tout au long de cette thèse me redonner de la motivation quand c'était nécessaire et me changer les idées quand c'était important. Un fâcheux accident de ski survenu durant ma thèse m'ayant laissé avec un puzzle à la place d'un tibia, ses attentions et son infinie bienveillance m'ont aidé à me relever et ont, j'en suis certain, accéléré mon rétablissement. Nos aventures dans le cosmos mélangées à des vapeurs tourbées ont sans aucun doute participé à la réussite de cette thèse. Sa curiosité et sa combativité continuent de m'inspirer et j'espère pouvoir partager encore de nombreuses randonnées, de nombreux souvenirs et de nombreuses années en sa compagnie.

Enfin, j'adresse des remerciements à ma famille qui a toujours su me soutenir dans mes choix personnels et professionnels. Je remercie tous ceux qui ont été présents, physiquement ou non, pendant cette thèse. Leur bienveillance, leurs pensées et leurs encouragements n'ont pas été vains et je suis particulièrement heureux de pouvoir enfin leur dire que ma soutenance est passée. Merci à mes tantes et mes oncles, mes cousines et cousins, mes nièces, ma belle-sœur qui se trouve être aussi leur mère et mon beau-frère. Je ne peux non plus m'empêcher d'avoir une pensée pour ceux qui ne sont plus ici et avec qui j'aurai aimé pouvoir partager mes travaux, papy Guy, mamie Liliane, papy George, papy et mamie Rio. Vous me manquez tous et je suis certain que vous auriez aussi apprécié de partager ce moment avec nous.

Ces remerciements ne peuvent s'achever sans une pensée générale pour ma famille proche, mes parents Anne-Christine et Philippe Malchair, ma sœur Maëlle Malchair, mon frère Pierrick Malchair et ma grand-mère Letty Villot (la seule, l'unique mamie Letty). Leur présence, leurs encouragements, leur intelligence et leur amour sont à la base de ce que je suis devenu. Je n'aurai pas pu être mieux entouré ou plus soutenu, ils sont chacun à leur manière des personnes formidables (et de qualité supérieure). Je suis fier de faire partie de votre famille et je serai toujours heureux d'avoir pu partager ce moment important avec vous tous.

Cette thèse et moi vous devons beaucoup. Merci.

RESUME

Mots-clefs : Conception, architecture, systèmes, énergies, fonctions, structures, assemblage, complexité.

La conception architecturale des systèmes complexes présente de nombreuses difficultés et les méthodes de conception classiques ne peuvent apporter qu'une réponse limitée aux problématiques actuelles. De nombreuses méthodologies proposent des solutions en se concentrant sur une facette du processus de développement ou un critère de conception spécifique. La mondialisation et l'augmentation de la population imposent aux industriels des cadences de production élevées, tandis que les nouveaux modes de consommation leur demandent une forte agilité pour s'adapter rapidement aux besoins des clients. Ces contraintes mettent en évidence les limites du paradigme de conception actuel et exacerbent les problématiques issues du processus de développement du produit. La décorrélation entre les différentes vues du produit (fonctionnelle, physique et industrielle) favorise l'apparition d'incohérences et complexifie un processus déjà très contraint. Ces travaux de recherche proposent de lier les différentes vues du produit au cours de son développement afin de renforcer la robustesse de la conception, favoriser la conception collaborative et améliorer la traçabilité des choix de conception au cours du développement d'un produit. L'approche CTOC (Convertisseur, Transmetteur, Opérateur, Contrôle) formalisée ici fait écho à cette proposition en offrant un cadre de conception robuste permettant de construire simultanément les vues fonctionnelle et physique du produit. Des développements de la méthode CTOC sont présentés dans cette thèse afin de répondre aux problématiques identifiées dans le contexte de l'étude mais aussi pour offrir un environnement de conception favorisant l'innovation architecturale.

Les choix de conception réalisés durant la phase de conception architecturale impactent l'ensemble du développement et les conséquences de ces choix peuvent n'apparaitre que bien plus tard. Ainsi, la phase d'industrialisation du produit peut révéler une performance industrielle insatisfaisante dont l'origine remonte à des choix de conception réalisés au début du processus de développement. L'intégration de critères d'évaluation de la performance industrielle dès la phase de conception préliminaire permet aux concepteurs de discriminer très tôt des architectures candidates et d'évaluer leur performance industrielle. Les travaux présentés dans cette thèse apportent des développements à la méthode CDfA (Conceptual Design for Assembly) qui se concentre sur l'évaluation de la performance industrielle d'assemblage et propose une méthode pouvant être étendue à d'autres critères dans le futur.

L'identification d'une forte synergie entre les approches CTOC et CDfA a permis de les regrouper en une méthodologie de conception architecturale. L'utilisation du modèle CTOC comme base d'application de l'approche CDfA apporte de nombreux avantages et notamment une plus grande maîtrise d'un système malgré sa complexité. Le modèle CTOC global remplit les conditions nécessaires à l'application de la méthodologie d'évaluation de la performance industrielle décrite par l'approche CDfA. Ces travaux formalisent une méthodologie globale de conception architecturale liant les vues fonctionnelle, physique et industrielle du produit et applicable dès la phase de conception préliminaire.

ABSTRACT

Keywords: Design, architecture, systems, energies, functions, structures, assembly, complexity.

The architectural design of complex systems presents many difficulties and conventional design methods can only provide a limited response to the current issues. Many methodologies offer solutions by focusing on one facet of the development process or a specific design criterion. Globalization and population growth require high production rates from manufacturers, while new consumption patterns require a high degree of agility to adapt quickly to customer needs. These constraints highlight the limits of the current design paradigm and highlight the issues arising from the product development process. The decorrelation between the different views of the product (functional, physical and industrial) encourages the appearance of inconsistencies and makes an already highly constrained process more complex. This research proposes to link the different views of the product during its development in order to reinforce the robustness of the design, to promote collaborative design and to improve the traceability of the design choices during the development of a product. The CTOC (Converter, Transmitter, Operator, Control) approach formalized here echoes this proposal by offering a robust design framework allowing to build simultaneously the functional and physical views of the product. Developments of the CTOC method are presented in this thesis in order to respond to the issues identified in the context of the study but also to provide a design environment conducive to architectural innovation.

The design choices made during the architectural design phase impact the whole development and the consequences of these choices may not appear until much later. Thus, the industrialization phase of the product may reveal unsatisfactory industrial performance, the origin of which can be traced back to design choices made at the beginning of the development process. The integration of industrial performance evaluation criteria as early as the preliminary design phase allows designers to discriminate candidate architectures very early on and to evaluate their industrial performance. The work presented in this thesis brings developments to the CDfA (Conceptual Design for Assembly) method which focuses on the evaluation of the industrial performance of assembly and proposes a method that can be extended to other criteria in the future.

The identification of a strong synergy between the CTOC and CDfA approaches has allowed to group them into a global architectural design methodology. The use of the CTOC model as a basis for the application of the CDfA approach brings many advantages and in particular a greater mastery of a system despite its complexity. The global CTOC model fulfils the necessary conditions for the application of the industrial performance assessment methodology described by the CDfA approach. This work formalizes a global architectural design methodology linking the functional, physical and industrial views of the product and applicable from the preliminary design phase.

SOMMAIRE

SOMMAIRE **9**

1. CHAPITRE 1: INTRODUCTION **13**

1.1 CONTEXTE **13**

1.1.1 Industrie aéronautique 13

1.1.2 Cycle de développement du produit 13

1.1.3 Complexité 16

1.1.4 Paradigme de conception 18

1.2 AXES DE RECHERCHE **20**

1.3 QUESTIONS SCIENTIFIQUES/VERROUS SCIENTIFIQUES: **23**

1.4 METHODOLOGIE **25**

2. CHAPITRE 2: ANALYSE DE LA LITTÉRATURE **27**

2.1 CONTEXTE **27**

2.2 COMPLEXITÉ **37**

2.2.1 Définition de la complexité 38

2.2.2 Classifications de la complexité 39

2.2.3 Solutions potentielles de gestion de la complexité 41

2.3 THÉORIES DE MODÉLISATION, MÉTHODOLOGIES ET APPROCHES **42**

2.3.1 Axiomatic Design (AD) 42

2.3.2 Function-Behavior-Structure (FBS) 44

2.3.3 Theory of Inventive Problem Solving (TRIZ) 46

2.3.4 Model-Based Systems Engineering (MBSE) 47

2.4 MÉTHODOLOGIES DE CONCEPTION BASÉES SUR UNE APPROCHE ÉNERGÉTIQUE **48**

2.4.1 Modèle CTOC 50

2.4.2 Concurrent designing ou conception intégrée 52

2.5 DESIGN FOR X **59**

2.5.1 Design for X (DfX) 59

2.5.2 Design for Assembly (DfA) 60

2.5.3 Conceptual Design for Assembly (CDfA) 60

2.6 CONCLUSION 61

3. CHAPITRE 3 : PROPOSITIONS SCIENTIFIQUES 63

3.1 DESCRIPTION DE LA DÉMARCHE 63

3.2 CAPTURE, ÉLICITATION ET ANALYSE DE LA CONNAISSANCE 63

3.2.1 Gestion de la connaissance (Knowledge Management) 63

3.2.2 Processus de capture de la connaissance 66

3.2.3 Représentation de la connaissance. 69

3.3 FORMALISATION DES ENJEUX SCIENTIFIQUES IDENTIFIÉS 75

3.3.1 Analyse des problématiques principales identifiées 75

3.3.2 Première proposition - Gérer le lien entre la vue fonctionnelle et la vue physique du produit en phase de conception préliminaire. 78

3.3.3 Seconde proposition - Intégrer des critères de performance industrielle en phase de conception préliminaire : 79

3.3.4 Troisième proposition - Définition d'un nouveau paradigme de conception préliminaire. 80

3.4 CONCLUSION 82

4. CHAPITRE 4 : LIAISON FONCTION/STRUCTURE 84

4.1 INTRODUCTION 84

4.2 DE LA FONCTION À LA STRUCTURE 85

4.2.1 Dans la litterature 85

4.2.2 Approche énergétique 85

4.2.3 Modèle CTOC 88

4.3 L'APPROCHE CTOC APPLIQUÉE A DES SYSTÈMES COMPLEXES 90

4.3.1 Systemes couplés, découples et Hybridés 90

4.3.2 Processus de Conception par l'approche CTOC 92

4.3.3 Discussions autour des architectures obtenues par l'application de l'approche CTOC 97

4.3.4 Conclusions 104

4.4 APPLICATION DU CTOC À UNE ARCHITECTURE D'AÉRONEF MODERNE 106

4.4.1 Introduction 106

4.4.2 Sujet de l'étude 107

4.4.3 Domaine fonctionnel / Domaine physique 108

4.4.4 Application de l'approche CTOC à une entité spécifique 110

4.4.5 Fonction de contrôle manuel / Cockpit 112

4.4.6 Fonction de contrôle automatisé / Baie avionique 113

4.4.7 Alternatives d'architecture 113

4.5 REPRÉSENTATION DES BOUCLES DE CONTRÔLE 114

4.5.1 Lois d'asservissement du système 114

4.5.2 Limite de modélisation par l'approche CTOC 116

4.5.3 Représentation classique des schémas d'asservissement 118

4.5.4 Proposition d'évolution de la méthode CTOC 119

4.6 CONCLUSION 120

5. CHAPITRE 5 : INTÉGRATION DE CRITÈRES DE PERFORMANCE INDUSTRIELLE 121

5.1 INTRODUCTION 121

5.2 DESCRITPION DE L'APPROCHE CDFA 122

5.2.1 Limitations de l'approche CDfA 126

5.2.2 Développements de la modélisation des systèmes multi-flux 128

5.2.3 Refonte de l'échelle de valeurs des interfaces 129

5.2.4 Conclusion 137

5.3 CAS D'ETUDE : POINTE AVANT D'A320 138

5.3.1 Description du cas d'étude : Pointe avant d'Airbus A320 138

5.3.2 Résultats de l'application 139

5.3.3 Axes de développement futurs 144

5.4 CONCLUSION 144

6. CHAPITRE 6 : APPROCHE GLOBALE DE CONCEPTION ARCHITECTURALE 146

6.1 INTRODUCTION 146

6.2 LIER LES APPROCHES CDFA ET CTOC 147

6.2.1 Mise en évidence de la synergie entre les approches 147

6.2.2 Le CTOC comme base d'application du CDfA 148

6.3 FORMALISATION DE L'APPROCHE GLOBALE DE CONCEPTION ARCHITECTURALE 154

6.4 CONCLUSION 156

7. CHAPITRE 7 : CONCLUSIONS, LIMITATIONS ET PERSPECTIVES 157

7.1 CONCLUSIONS 157

7.2 LIMITATIONS 159

7.3 PERSPECTIVES 160

8. BIBLIOGRAPHIE 161

9. ANNEXE 172

1. CHAPITRE 1: INTRODUCTION

1.1 CONTEXTE

1.1.1 Industrie aéronautique

L'industrie aéronautique fait aujourd'hui face à des défis techniques majeurs liés au nombre toujours croissant de passagers, dont certaines études prévoyaient une augmentation durant les dix prochaines années. La récente crise mondiale liée à la propagation de la COVID-19 a temporairement freiné cette croissance et aura probablement des impacts encore indéterminés sur l'économie mondiale. Cependant, en admettant un retour au niveau de trafic aérien tel qu'il était avant la crise, des variations rapides des cadences de production vont être nécessaires. Cette demande à venir (associée à une forte volonté des industriels de réduire leur empreinte carbone) va nécessiter de gros efforts de la part des acteurs de l'industrie aéronautique et mettre à l'épreuve leurs méthodes de conception et de production. En effet, la plupart des aéronefs actuels ont été principalement conçus avec pour objectif d'optimiser les performances du produit au détriment des performances du système industriel. Cette stratégie peut finir par générer des problèmes dans les lignes de production dans l'éventualité où les cadences de production viendraient à dépasser les capacités du système industriel. Comment faire face aux défis de demain ? Comment les industries aéronautiques pourront-elles gérer des cadences de production plus de dix fois supérieures à celles pour lesquelles le produit a été initialement conçu ? La réponse réside en partie dans le cycle de développement du produit mais aussi dans l'étude et la gestion des performances du système industriel. Les choix d'architecture réalisés durant la phase de conception préliminaire ont une influence sur la conception du système industriel, il est donc cohérent de les étudier dès cette phase du cycle de vie du produit.

1.1.2 Cycle de développement du produit

La majorité des méthodes de conception utilisées dans l'industrie aéronautique sont inspirées des travaux de Pahl & Beitz et sont décomposées en quatre grandes phases (Pahl, Beitz, Feldhusen, & Grote, 2007) :

- (i) « *Product planning and clarifying the task* » : cette phase permet la planification du processus de conception et le récolte d'information relatives à l'expression des exigences et contraintes de conception.

- (ii) « *Conceptual Design* » : Lors de cette phase, des solutions au problème énoncé précédemment sont proposées. Après avoir établi une description fonctionnelle du produit et des solutions cohérentes, le résultat est une structure globale cohérente. Ainsi, dans cette phase, le « concept » est défini et permet de clarifier l'effort de conception nécessaire au respect des exigences exprimées précédemment lors de la 1ère phase.
- (iii) « *Embodiment Design* » : Afin d'aboutir à une solution plus concrète, dans cette phase, le concepteur part du concept établi précédemment, détermine la structure du produit et finalement spécifie l'arrangement général de celui-ci. Le « Concept » issu de la phase précédente est utilisé pour développer le produit à partir de critères techniques et économiques. Ce développement continue jusqu'à ce que le niveau de détail soit suffisant pour commencer à produire de la documentation de production.
- (iv) « *Detail Design* » : Cette phase traite les détails de la conception, incluant les formes, les surfaces, les dimensions et les tolérances des pièces individuelles. De plus, les matériaux, les spécifications, les estimations de coûts, les évaluations de fabricabilité et la documentation de production sont réalisés durant cette phase.

Une approche classique de la conception d'un produit consiste à passer par ces quatre grandes phases de conception. Ainsi, la documentation du produit basée sur les besoins des clients est fournie. A partir de celle-ci, différentes études sont proposées. En phase de conception préliminaire, plusieurs modèles conceptuels sont créés et évalués pour retenir les meilleurs. Une approche plus technique marque l'« embodiment design phase » au cours de laquelle la conception du produit est étudiée. La structure du produit est établie. Finalement, la conception détaillée du produit est étudiée.

Dans le domaine aéronautique comme dans d'autres industries, les entreprises sont organisées en centres de compétences (COCs) en cohérence avec ce paradigme. Ce découpage correspond à un procédé de conception séquentiel et regroupe les experts techniques au sein d'entités séparées (Engineering, Propulsion, Aerodynamics, Structure, Systems, Flight Commands, Testing, Manufacturing, etc.). Au sein de ce genre d'organisations, les ingénieurs et les architectes avions sont séparés des équipes de production étant donné que la production a lieu à l'issue des activités de conception.

Les architectes avion sont principalement impliqués durant la phase de conception préliminaire aussi appelée phase d'architecture. L'objectif de cette phase d'architecture est de

livrer une architecture avion cohérente, potentiellement innovante, qui respecte les objectifs stratégiques de l'entreprise et répond aux attentes des clients. Les architectes sont responsables de la cohérence du produit et travaillent donc en étroite collaboration avec les COCs impliquées dans le procédé de conception, tout au long du cycle de vie du produit. Une architecture peut avoir différentes définitions selon la population qui l'emploie et la phase du cycle de développement du produit lors de laquelle on y fait référence. Elle peut être un ensemble d'objectifs stratégiques, d'objectifs de performances ou encore les contraintes technologiques imposées lors de la conception initiale d'un produit. Elle peut aussi se définir par un ensemble de composants élémentaires qui, assemblés les uns aux autres, vont interagir et former un produit complexe faisant apparaître par la même occasion des contraintes à contourner et des synergies à exploiter. Par souci de clarté, nous appellerons le premier « projet architectural » et le second « architecture ». C'est cette dernière définition d'une architecture que nous allons privilégier dans cette étude.

Ainsi, une architecture cohérente est un ensemble de composants qui permet d'atteindre les objectifs fixés (remplir la fonction attendue en respectant les contraintes de conception) et dont les interactions sont maîtrisées. Par opposition, une architecture incohérente est un ensemble de composants ne remplissant pas les fonctions attendues et dont on ne maîtrise pas certaines synergies et incohérences. La nature du produit aéronautique implique une importante complexité principalement liée à la quantité de composants, d'information, de fonctions, de compétences et d'acteurs ce qui amène bien plus souvent à générer des architectures incohérentes que cohérentes étant donné la quantité exponentielle d'interactions au fur et à mesure de l'élaboration d'une architecture. La valeur ajoutée des architectes avions est donc de réussir à proposer des optimums globaux à partir d'optimums locaux en gérant la complexité du produit et de son environnement, cette cohérence doit être assurée aussi bien à un niveau macroscopique que dans le détail des composants.

Le travail des architectes est donc de maîtriser un produit complexe, à ne pas confondre avec un produit compliqué. Un produit compliqué, tel qu'une voiture, un train, un avion, nécessite une importante quantité de connaissances pour être appréhendé mais il existe des méthodes ou des cadres méthodologiques permettant de mener à bien leur conception. Un produit complexe en revanche, présente des inconnues qu'aucune méthodologie ne permet de maîtriser totalement, que ce soit pour des raisons technologiques, à cause d'un manque de connaissance ou encore liées à la dynamicité de paramètres de conception (économiques ou technologiques). A chaque niveau de conception d'un produit ou d'un processus, les concepteurs doivent faire face à plusieurs alternatives entre lesquelles ils doivent trancher.

Chaque choix de conception est directement ou indirectement relié à un autre. De plus, les décisions des concepteurs du produit affectent les concepteurs du processus et inversement. Ainsi, une approche cohérente pour atteindre une solution globalement optimale est vitale. Cependant, cela n'est possible que lorsque toutes les variables de conception sont connues et leurs performances prédictibles mais la plupart du temps, il existe un manque de connaissance à chaque niveau de conception ayant différentes origines. De nombreuses recherches ont été menées dans le but de créer un cadre de modélisation et d'implémentation de méthodes permettant de gérer cette complexité (Henk Jan Wassenaar, 2003; Wood, 2004). Combler ce vide méthodologique revient à créer un cadre de conception systématique qui permettrait de modéliser un système complexe et d'enrichir la connaissance du concepteur à chaque niveau du processus de conception afin de l'assister lors de la prise de décision. Des méthodes seront explorées lors de l'analyse de la littérature, cependant il convient tout d'abord de définir la complexité que les architectes doivent gérer lors de la phase de conception préliminaire d'un produit avion.

1.1.3 Complexité

L'augmentation continue de la complexité du produit rend la tâche toujours plus difficile et allonge la durée des cycles de développement, la demande du marché augmentant en parallèle cela impose aussi une forte pression sur les cadences de production et les délais de livraison. C'est d'autant plus vrai pour l'industrie aéronautique qui fait face à une demande du marché en augmentation constante ainsi qu'à une évolution des besoins des clients qui impliquent des modifications tardives du produit. La demande croissante implique une montée en cadence et donc le besoin d'adapter rapidement le système de production. L'évolution des besoins clients tend à favoriser les cycles de développement et de production courts, adaptés aux évolutions incrémentales et à la production agile. Une contradiction apparaît entre d'un côté une tendance à favoriser des cycles de développement courts pour répondre aux besoins des clients avant qu'ils n'évoluent, de l'autre une complexité croissante demandant de plus en plus d'efforts et donc de temps pour proposer des architectures maîtrisées. S'ajoutent à cela les contraintes liées à la certification des appareils et à la sécurité qui imposent des tests et simulations poussés. Cette contradiction sera étudiée plus en détail et l'un des enjeux de ces travaux de recherche est d'apporter une réponse permettant de concilier les enjeux économiques et industriels avec le métier d'architecte.

Dans le contexte fortement concurrentiel de l'industrie aéronautique, les constructeurs favorisent donc logiquement une prise de risque minimale qui se traduit souvent par des évolutions incrémentales des produits déjà conçus et dans le meilleur des cas, une extrapolation de ces derniers basés sur des objectifs stratégiques cohérents avec les besoins du marché. Cette stratégie pénalise les architectes avions qui n'ont plus la liberté de proposer des architectures innovantes jugées trop risquées et nécessitant trop d'efforts de conception. Les outils et méthodes développés favorisent une réutilisation des modèles existants et se maintiennent dans le paradigme séquentiel de conception en vigueur. Afin de libérer la créativité des architectes et renforcer la capacité d'innovation architecturale sans remettre en question l'organisation ni l'environnement industriel dans un premier temps, il apparait nécessaire d'agir sur les deux contraintes identifiées : (i) la complexité croissante du produit et (ii) les méthodes d'architectures figées dans le paradigme séquentiel de conception.

La complexité d'un produit peut entre autres être issue du niveau technologique élevé nécessaire à la maîtrise de son comportement, à ses dimensions ou ses caractéristiques physiques extrêmes, au contexte économique ou industriel, au nombre de personnes concernées et à la diversité de leurs compétences, ou encore simplement à la quantité d'éléments qui le composent et interagissent. Les différentes sources de complexité peuvent se cumuler, s'additionner et augmenter la complexité globale d'un système. La définition de la complexité telle qu'énoncée par Remo Badii et Antonio Politi est : « *La complexité est la propriété d'un modèle qui rend difficile la formulation de son comportement général dans un langage donné, malgré un niveau d'information suffisamment complet de ses composants atomiques et la façon dont ils interagissent* » (Badii & Politi, 1993). La complexité n'est donc pas associée selon lui à de l'ignorance mais plutôt à la difficulté de décrire de façon satisfaisante le comportement d'un modèle. Il existe de nombreux travaux dans la littérature qui forment une définition finalement assez vague car elle peut provenir de plusieurs sources, souvent cumulatives. Il n'y pas à ce jour de vision exhaustive communément admise de la complexité mais il existe de nombreuses collections d'ouvrages traitant de ce sujet et d'études spécifiques au domaine. Une étude détaillée des différents aspects de la complexité est proposée au Chapitre 2: Analyse de la littérature, §2.2 « Complexité ».

Les méthodes et processus de conception en vigueur dans une industrie donnée et/ou à une époque donnée composent un paradigme de conception. Le paradigme de conception en vigueur dans l'industrie aéronautique est défini depuis plusieurs dizaines d'années et a permis l'essor de l'aéronautique moderne. Cependant, l'amélioration continue des produits conçus, les innovations technologiques et l'augmentation des contraintes de sécurité et de certification a

imposé aux concepteurs de prendre en compte toujours plus de critères de conception, de technologies et de phénomènes physiques. Cette évolution n'a pas impacté de façon équivalente le paradigme de conception de l'industrie aéronautique qui a vu des évolutions importantes en ce qui concerne ses outils (Digitalisation de l'information, outils de Conception Assistée par Ordinateur, outils de Product Lifecycle Management) mais beaucoup moins les méthodes et stratégies de conception. Le paragraphe suivant définit les limites du paradigme de conception actuelle et propose un cadre d'évolution de celui-ci.

1.1.4 Paradigme de conception

Dans le cas spécifique de l'industrie aéronautique, toutes les sources de complexité mentionnées dans le paragraphe précédent interviennent et se cumulent en conséquence de quoi les concepteurs et plus spécifiquement les architectes n'ont pas les moyens de gérer tous les critères de conception de façon exhaustive. Répartis en centre de compétences, ils sélectionnent les plus pertinents en fonction des objectifs stratégiques de l'entreprise pour atteindre des optimums locaux. Cette organisation a pour intérêt de réduire la complexité perçue du produit car elle permet aux concepteurs de considérer moins de composants, moins d'interactions et d'être interfacés avec moins de personnes aux compétences moins variées que s'ils étudiaient le produit global. Cependant cela ne fait que retarder l'échéance puisque toute la complexité du produit va ressurgir lors de la mise en commun des travaux des différentes entités, générant des incohérences, des problèmes de maturité, des coûts imprévus et plus tard des problèmes de production. En conséquence, les concepteurs prennent en compte les nouvelles contraintes qui apparaissent à ce moment et replacent les concepts optimisés localement dans un contexte plus large. Il s'agit d'un processus itératif de conception classique largement décrit dans la littérature (Cross, 2008; Ulrich & Eppinger., 2008; Leifer & Steinert., 2011) qui consiste à alterner des phases divergentes et convergentes jusqu'à finalement aboutir à un concept globalement satisfaisant.

La proposition faite ici est de s'abstraire partiellement de ce paradigme de conception séquentiel afin de ne plus subir la complexité globale du produit à chaque itération du processus et de devoir jeter une partie du travail réalisé. En théorie, il faudrait être capable de prendre en compte l'intégralité du produit et des critères et contraintes de conception en même temps, cependant c'est aujourd'hui inenvisageable pour un modèle d'une telle complexité. Aussi, la solution plus rationnelle est de déterminer les problématiques principales observées par les concepteurs lors de développements précédents, d'en déduire les critères de conception

prioritaires à intégrer au modèle de conception et de bâtir une méthode permettant de les exploiter. Cette étude a été réalisée par une observation des méthodes de conception et ses utilisateurs dans l'industrie aéronautique et à l'utilisation de méthodes de capture de la connaissance couplées à des méthodes d'élicitation de la connaissance dans le but de hiérarchiser les problématiques identifiées. Cette capture et élicitation de la connaissance sont détaillées dans le Chapitre 3 : Propositions scientifiques.

Cette hiérarchisation a mis en avant une méconnaissance du rôle de l'architecte et de son impact majeur sur le cycle de vie du produit mais aussi le besoin de renforcer les capacités d'interactions entre les acteurs du cycle de développement du produit. Elle a aussi permis d'identifier une faiblesse systématique des méthodes utilisées lors de la conception du système industriel associé au produit puisque, dans une approche séquentielle, la production est perçue comme une conséquence de la conception et en subit donc directement les conséquences. C'est d'autant plus vrai dans le contexte concurrentiel actuel de l'industrie aéronautique où le nombre d'appareils produits/livrés permet de prendre le pouls d'un industriel. Ainsi, des produits victimes de leur succès tels que la famille A320 d'Airbus, initialement conçus pour des productions de quelques dizaines d'appareils se retrouvent commandés à hauteur de plusieurs milliers d'exemplaires. Le système de production atteint rapidement ses limites, malgré de nombreuses campagnes d'optimisations et d'adaptations du système de base, une remise en question de la conception du produit et de son architecture est nécessaire pour une augmentation significative des cadences de production actuelles. Ce constat met en lumière le lien fort entre la conception du produit et celle de son système industriel et la nécessité d'intégrer des critères de conception industriels dès la phase d'architecture du produit. Le rôle de l'architecte dans le cycle de développement est donc central puisqu'il intervient lors de la phase de conception préliminaire qui correspond au moment où les concepts généraux du système à concevoir sont proposés et développés.

Les choix d'architecture réalisés durant cette phase vont donc influencer le reste du développement, plus spécifiquement et c'est ce qui nous intéresse particulièrement ici, la phase de conception détaillée et la phase d'industrialisation. Une architecture candidate développée en phase d'architecture sera retenue ou écartée en fonction de critères de conception permettant de faire un choix cohérent avec la stratégie de l'entreprise (critères économiques, critères technologiques, critères de performances, etc…). Le nombre important de paramètres et d'inconnues à prendre en compte lors de la conception architecturale d'un système complexe génère de l'incertitude quant aux conséquences des choix de conception. Chaque critère permet de réduire cette incertitude en augmentant la maîtrise d'un domaine de conception associé. Par

exemple, l'utilisation d'un critère économique a pour but de permettre un choix de conception pertinent et d'augmenter la maîtrise des conséquences économiques de celui-ci. La pertinence de ces critères est donc cruciale pour garantir la cohérence du développement du produit.

Les travaux de recherche présentés dans ce document ont pour objectif de proposer un nouveau paradigme de conception qui respecterait plusieurs contraintes :

(i) S'abstraire des méthodes de conception séquentielle pour permettre un cycle de développement moins itératif dans le but de converger plus tôt vers une solution.

(ii) Cette solution devra tendre vers un optimum global et l'architecte sera le garant de sa cohérence globale tout au long du cycle de développement.

(iii) La performance industrielle d'une architecture candidate devra être évaluable dès la phase d'architecture afin d'augmenter la cohérence globale du produit sur son cycle de vie.

1.2 AXES DE RECHERCHE

- Axe de recherche 1 – Gérer les interactions entre les vues physique et fonctionnelle du produit

Le premier axe de recherche concerne la méthodologie globale de conception couramment utilisée dans l'industrie aéronautique. La plupart des approches de conception cherchent à structurer et systématiser le procédé de conception en détaillant les étapes successives d'un processus permettant d'aboutir à un produit complet et fonctionnel. Cependant, elles abordent rarement la question de la transition de la vue fonctionnelle à la vue physique du produit réalisée lors de la phase de conception préliminaire et il n'existe pas de consensus à ce sujet. Le rôle des concepteurs impliqués lors de la phase de conception préliminaire, aussi appelés architectes, est d'être garants de la cohérence du produit final en participant à la transition du domaine fonctionnel au domaine physique. En effet, les architectes, à partir d'un ensemble de fonctions de haut niveau du produit et de contraintes de conception, posent les bases du produit à concevoir et font des choix de conception qui impacteront le reste du processus de développement. Ils continuent à être impliqués dans le processus de conception après la phase de conception préliminaire, lors de la conception détaillée et de l'industrialisation du produit, en interagissant avec les différents acteurs de la conception.

Cependant, le manque de formalisation de la transition du domaine fonctionnel au domaine physique rend la communication et la collaboration de plus en plus difficiles au fur et

à mesure de l'évolution du produit. En effet, la vue physique étant vue comme une conséquence de la vue fonctionnelle du produit, ces deux représentations sont décorrélées. Si les architectes ont construit la vue fonctionnelle pour accompagner la construction de la vue physique, ce n'est pas le cas des acteurs impliqués plus tard dans le processus de conception. La maîtrise de la transition de la vue fonctionnelle à la vue physique faciliterait la collaboration entre les architectes et les centres de compétences qui sont impliqués dans le processus de conception et d'industrialisation du produit, renforçant la cohérence de celui-ci.

Une nouvelle approche consisterait à s'extraire du paradigme de conception séquentiel classique et de proposer une méthode de conception collaborative d'un système. Les vues fonctionnelles et physiques seraient construites simultanément permettant de garantir une cohérence de ces deux vues tout au long du développement du produit mais aussi d'assurer une traçabilité des choix de conception réalisés. Les différentes vues du produit ont une caractéristique commune : les flux d'énergie échangés entre les composants et les paramètres physiques mis en jeu. Au sens large, l'approche énergétique permet aussi de représenter les boucles de contrôle en les ramenant à leur forme énergétique (impulsion électrique, signal audio, signal optique, etc…). Ainsi, on peut se demander si une approche énergétique de la conception d'un produit pourrait permettre de représenter le produit de façon exhaustive et de lier les différentes vues d'un produit. Une décomposition du système permettrait de gérer la complexité du produit et apporterait la lisibilité nécessaire à une représentation exhaustive. Exhaustive sous-entend ici entre autres une capacité à représenter les éléments de contrôle complexe à différents niveaux d'abstraction, cet aspect sera spécifiquement développé ici.

- Axe de recherche 2 - Evaluation de performances industrielles d'une architecture candidate

Ce deuxième axe de recherche s'intéresse aux évolutions potentielles des critères d'évaluation des architectures candidates en phase de conception préliminaire. Le paragraphe 1.1.4 décrivant le paradigme de conception actuel de l'industrie aéronautique insiste sur l'importance des critères de conception dans les choix d'architecture réalisés lors de la phase de conception préliminaire. Ceux-ci sont un moyen pratique d'évaluer une solution et d'augmenter la maîtrise du produit à concevoir, à condition d'être définis avec soin pour ne pas au contraire induire des biais logiques. En pratique, seuls quelques critères clés sont utilisés dans le domaine aéronautique : des critères économiques et des critères de performances, plus précisément des critères de masse. Les industriels sont donc capables, par expérience, de corréler ces deux critères et de trier la plupart des solutions candidates très tôt en ne retenant que les solutions les plus rentables du point de vue masse/coût.

Si cette approche permet de trier rapidement et efficacement les solutions d'après des critères effectivement essentiels pour l'industrie aéronautique, elle présente des faiblesses. Elle n'accorde pas la souplesse de conception nécessaire à l'innovation rejetant ainsi des solutions potentiellement innovantes mais pas performantes d'après ces deux critères clés, impliquant une incertitude et donc une prise de risque. De plus, elle limite la capacité d'adaptation du processus de conception à une évolution soudaine du contexte économique ou commercial. Le temps moyen de développement d'un programme avion étant d'une dizaine d'années, c'est prendre le risque de concevoir un produit répondant à des besoins devenus obsolètes lors de sa commercialisation.

Ainsi nous proposons d''étendre les outils des concepteurs en phase de conception préliminaire par l'intégration d'une méthode d'évaluation des performances industrielles d'une architecture candidate. D'autres seraient pertinents à étudier tels qu'un critère de maintenabilité, un critère écologique ou encore un critère de désassemblage et devraient faire l'objet d'études spécifiques. Cependant, par volonté de concentrer les efforts de recherche sur un sujet à la fois, la proposition est restreinte ici à l'évaluation des performances industrielles. Les activités industrielles englobent plusieurs domaines parmi lesquels la fabrication, le stockage, les achats, l'assemblage ou encore la maintenance. Les solutions proposées en phase de conception préliminaire par les architectes ont un impact direct sur l'assemblabilité des composants à différents niveaux (composants élémentaires ou composants majeurs). De plus les problématiques d'assemblage sont aujourd'hui celles qui pénalisent le plus les lignes d'assemblages. De nombreuses modifications de la séquence d'assemblage et de la stratégie industrielles ont déjà été proposées mais leur anticipation dès la phase de conception préliminaire n'a pas encore été étudiée. Aussi, notre proposition se concentrera sur l'évaluation des performances industrielles par l'étude de l'assemblabilité des architectures candidates.

Les méthodes de « Design for X » (DfX) permettent l'optimisation d'un concept pour un paramètre X donné (Design to cost, Design for value, etc…). En ce qui nous concerne, les méthodes de Design for Assembly pourraient être une piste à suivre pour déterminer une méthode adaptée à la problématique de recherche ou adapter une méthode existante au contexte aéronautique. En effet, celle-ci devra être applicable en phase de conception préliminaire et permettre une évaluation correcte de la performance industrielle d'une solution en termes d'assemblabilité. Il conviendra donc de vérifier si des méthodes existantes peuvent être appliquées pour répondre au besoin en phase de conception préliminaire, s'il convient d'en adapter une au besoin ou encore d'en créer une sur mesure.

- Axe de recherche 3 - Définition d'une approche globale de conception architecturale

Les architectes sont impliqués sur l'ensemble du processus de conception et si dans le domaine aéronautique il existe des architectes aux spécialisations diverses (architectes avions, architectes systèmes électriques, architectes industriels, etc…) ce sont les différentes facettes d'un même métier. Le rôle reste le même : garantir la cohérence du produit tout au long de sa conception. Les différents métiers communiquent à l'aide de modèles et de représentations décorrélés qui évoluent au fil du cycle de développement. Cette décorrélation pénalise la communication et donc l'aspect collaboratif du processus de conception. C'est vrai pour les architectes entre les différents métiers et c'est d'autant plus vrai pour les autres acteurs de la conception, ingénieur ou non, qui ne sont souvent impliqués que sur une partie spécifique du développement. Ils n'ont pas la vision d'ensemble que les architectes cherchent à conserver.

La définition d'une approche globale apporterait une cohérence entre les différentes représentations du produit qui seraient alors corrélées pendant la phase de conception préliminaire. Les axes de recherche 1 et 2 vont étudier la possibilité de renforcer les aspects collaboratifs de la conception et de lier les différentes vues du produit. Ce troisième axe de recherche se concentrera sur la création d'un ensemble cohérent liant les différentes propositions grâce à une approche globale de conception architecturale.

1.3 QUESTIONS SCIENTIFIQUES/VERROUS SCIENTIFIQUES:

- Comment lier les modèles fonctionnels et physiques ?

Les modèles fonctionnel et physiques sont déjà liés par les méthodes classiques par un lien unidirectionnel. La décomposition fonctionnelle du produit à concevoir permet de définir des exigences et des contraintes de conception qui vont servir de base à la construction de la vue physique. La vue physique du produit est donc une extrapolation de la vue fonctionnelle, décorrélée de cette dernière. Les deux modèles peuvent donc évoluer indépendamment l'un de l'autre sans garantie de cohérence.

La question est donc ici de déterminer s'il est possible de corréler ces deux vues en les liant lors de la phase de conception préliminaire. Ce lien doit être bidirectionnel et doit pouvoir s'articuler autour de méthodes de conceptions suffisamment robustes pour gérer la forte complexité du produit aéronautique. La stratégie qui sera retenue pour gérer cette complexité devra permettre une modélisation exhaustive du système, notamment des éléments de contrôle.

- Comment évaluer la performance industrielle d'une architecture candidate dès la phase de conception architecturale ?

L'intégration de nouveaux critères de conception en phase de conception architecturale se fait déjà ponctuellement, pour réussir à trancher entre différentes solutions ou lorsque des innovations technologiques ajoutent un degré d'incertitude gênant les concepteurs dans leur choix. Ces critères de choix sont généralement taillés sur mesure pour l'étude en cours et sont spécifiques au contexte, ils ne sont donc généralement pas immédiatement réutilisables pour de futurs développements.

La difficulté est de réussir à déterminer des critères de choix pertinents dès la phase de conception architecturale et qui puissent s'adapter à une évolution du contexte. Par souci de cohérence avec les axes de recherche ci-dessus, ces critères devront être établis en accord avec la production pour encourager la conception collaborative. Cela permettra aussi de confronter les résultats expérimentaux avec le ressenti des équipes de production et les problématiques identifiées sur les lignes d'assemblages dans le but de faire valider l'approche par les différents acteurs du développement.

- Comment lier dans une approche globale de conception les vues fonctionnelle, physique et la performance industrielle ?

Les méthodes retenues pour répondre aux questions de recherche ci-dessus ne seront pas nécessairement directement applicables au produit aéronautique ni compatibles avec l'environnement de conception propre à l'industrie aéronautique. Cet environnement est composé de nombreux acteurs agissant à différents moments du cycle de développement et de nombreuses entreprises à niveaux de responsabilité différents travaillant sur un produit extrêmement complexe. Les approches candidates, si elles ne sont pas applicables en l'état ou présentent des limites, devront donc être développées et enrichies spécifiquement pour permettre leur application. Il sera aussi nécessaire de proposer des exemples d'application représentatifs afin de s'en assurer et de valider les évolutions potentielles des méthodes. Les solutions retenues ne seront pas nécessairement compatibles entre elles à l'origine et nécessiteront donc un effort spécifique. Pour faciliter cette étape de consolidation, il sera important de veiller à ce que les solutions retenues ne soient pas fondamentalement incompatibles. Par exemple, si deux solutions présentent des contraintes d'application ou des postulats contradictoires, il ne sera pas possible de les lier dans une approche globale robuste.

Dans un second temps, il faudra définir le cadre d'application de ces méthodologies, à quel moment du cycle de développement les appliquer et dans quel but. Chacun des axes de recherche permettra de développer des moyens de conception répondant à des besoins spécifiques qui devront être clairement décrits. Une bonne application de la méthodologie globale sera garantie par une description précise du cadre d'application et des avantages et inconvénients de l'approche.

Enfin, comme évoqué dans la description du premier axe de recherche, la création d'un lien entre les vues fonctionnelle et structurelle d'un système complexe sera facilitée par la construction d'une décomposition de ces vues en niveaux d'abstraction. L'objectif est de pouvoir travailler à des niveaux de détail pertinents par rapport au besoin du concepteur et de limiter la complexité perçue du produit. Cependant, un système complexe multi-échelles va nécessairement produire des décompositions fonctionnelles et structurelles vastes. Il sera donc important de valider la possibilité pour le concepteur de se déplacer dans la décomposition du produit au fur et à mesure de sa conception. Cette capacité à pouvoir naviguer dans les niveaux d'abstraction s'accorde avec le besoin de traçabilité exprimé plus tôt puisqu'elle permettra de suivre facilement les origines et les conséquences des choix de conception.

1.4 METHODOLOGIE

1. Etat de l'art des méthodes d'architecture dans l'industrie aéronautique.
2. Etude du processus de conception aéronautique (interviews).
3. Identification des sources de complexité (interviews).
4. Identification des objectifs de recherche.
5. Identification des verrous scientifiques.
6. Examen dans la littérature des méthodes de conception architecturale existantes.
7. Choix des modèles, théories et/ou méthodologies appropriées à l'environnement de conception.
8. Examen dans la littérature des méthodes de conception par approche énergétique existantes.
9. Choix des modèles, théories et/ou méthodologies appropriées à l'environnement de conception.
10. Création d'une approche adressant les sources de complexité identifiées comme prioritaires.
11. Amélioration de l'approche.

12. Expérimentation de l’approche sur un sujet d’étude concret.
13. Analyse des résultats générés par l’utilisation de cette approche, comparaison avec la situation antérieure.
14. Résumé des travaux et des contributions.
15. Critique sur l’approche et sur les limites.
16. Perspectives de recherches futures.

2. CHAPITRE 2: ANALYSE DE LA LITTERATURE

2.1 CONTEXTE

De nombreuses méthodes de conception ont été développées dans des contextes particuliers et/ou pour adresser des problèmes spécifiques. Après avoir précisément décrit le contexte de l'étude et identifié les problématiques que l'on souhaite adresser dans le chapitre précédent, il convient d'analyser les méthodes existantes pouvant répondre à nos besoins ou, le cas échéant, s'il est nécessaire d'en développer ou d'en adapter une. Dans le cadre de notre étude, nous cherchons une ou plusieurs **méthodes applicables sur un produit non existant, en phase de conception préliminaire** et permettant de **modéliser et maîtriser la transition de la vue fonctionnelle à la vue physique du produit**. Aussi, cette méthode doit **permettre la prise en compte de critères de conception liés à la performance industrielle** du produit ou être compatible avec une le permettant. Enfin, elle doit permettre de **s'extraire au moins partiellement du paradigme de conception actuel** qui utilise encore aujourd'hui une conception itérative de façon à réduire la durée du cycle de développement**, favoriser la collaboration** au cours du cycle de vie du produit, **assurer la traçabilité des choix de conception** et **favoriser la créativité et l'innovation** lors de la phase de conception architecturale.

Il n'existe pas de recueil officiel et exhaustif des méthodes de conception existantes, cependant quelques auteurs ont tenté de recenser les plus connues/utilisées et de les organiser en différentes catégories afin de guider les concepteurs vers les méthodes les plus adaptées à leurs besoins (Tomiyama, et al., 2009). Une discipline appelée « Design Science » ou Science de la Conception s'attache à décrire l'activité humaine appelée conception dans le but de la formaliser. Cette discipline étude la conception à travers les théories de la conception et l'acte de conception à proprement parler. Ce dernier y est défini comme une action à entreprendre basée sur les théories de la conception (Matsuoka., 2010). Une classification plus récente, s'appuyant sur cette discipline, étudie un échantillon de 174 méthodes de conception publiées après 2001 (Fig. 1) et les regroupe en 13 clusters (Table 1).

No.	Name of Design Method	No.	Name of Design Method	No.	Name of Design Method
1	Affinity Diagram Method	59	FMMA (Failure Mode and Maintenance Analysis)	117	Performance Evaluation
2	AHP (Analytical Hierarchy Process)	60	Focus Group Interview	118	Personal Analogy
3	AIDA (Analysis of Interconnected Decision Areas) Method	61	Focused-Object Technique	119	Petrinet
4	Algebra Education	62	Forecasting	120	Positioning Method
5	Alphabet System	63	Freelisting	121	Principal Component Analysis
6	Association Diagram Method	64	FTA (Fault Tree Analysis)	122	Process State Table
7	Attribute Listing	65	F-Test	123	Product Life Cycle Management
8	Autoethnography	66	Functional Analysis	124	Protocol Analysis
9	Axiomatic Analysis	67	Fuzzy Inference	125	Pugh Method
10	Backcasting	68	GA (Genetic Algorithm)	126	Purpose Expansion Method
11	Benchmarking	69	Gordon Method	127	QFD (Quality Function Deployment)
12	Bionics Method	70	Grounded Theory	128	Quantification Theory Class I
13	BIOTRIZ	71	HAZOP (Hazard and Operability)	129	Quantification Theory Class II
14	Brainstorming	72	Hierarchicial Neural Network	130	Quantification Theory Class III
15	Brainwriting	73	Histogram	131	Quantification Theory Class IV
16	Business Design Method	74	How to's	132	Questionnaire
17	Canonical Correlation Analysis	75	Hyponymy Analysis	133	Reliability Based Topology Optimization
18	Card Brainstorming	76	ICR (Inform Creat Reflect) Grid	134	Relevance Tree Method
19	Card Brainwriting	77	Idea Sketch	135	Road Map
20	Card Sorting	78	IDEM (Inductive Design Exploration Method)	136	Role Playing
21	Casting Method	79	Identify Mapping Model	137	Rough Sets
22	Catalog Method	80	Incentive Word Method	138	Routes Chart Method
23	Causal Analysis	81	Interaction Matrix	139	SCAMPER (Substitute Combine Adapt Modify Put other purposes Eliminate Rearrange)
24	Commonality Versus Diversity Index	82	Interconnected Neural Network	140	Scenario Method
25	Cellular Automaton	83	Interviews	141	Section Property Method
26	Check Sheet	84	Inverse-Setting Method	142	Section Shape Method
27	Checklist	85	ISM (Interpretive Structual Modeling)	143	Self-Organizing Map
28	CID (Convex Integrated Design) Method	86	KJ (Kawakita Jiro) Method	144	Semantic Differential Method
29	Cluster Analysis	87	Kozane Method	145	Sensitivity Analysis
30	Cocreation	88	KT (Kepner Tregoe) Method	146	Service Blueprint
31	Cognitive Walkthrough Method	89	Laddering Method	147	Set-Theoretic Analysis
32	Cohort Analysis	90	Life Story Method	148	Shape Grammar
33	Collaborative Optimization	91	Linear Programming	149	Simulated Annealing
34	Compatibility Matrix	92	Linkography Mapping	150	Sizing Optimization
35	Control Chart	93	L-System	151	Skit
36	Correspondence Analysis	94	Material Flow Analysis	152	State Transition Diagram
37	Cost-Benefit Analysis	95	Matrix Method	153	Stop & Go Brainstorming
38	Co-Variance Structure Analysis	96	Multidiciplinary Design Optimization	154	Story Boarding
39	Critical Incident Technique	97	MET (Materials Energy Toxicity) Matrix	155	Structured Concept
40	Crossing Method	98	Metaphors	156	Stupa Method
41	Data Distribution	99	Mindmap	157	SWOT (Strengths Weakness Opportunities Threats) Analysis
42	Delphi Study	100	Modified Input-Output Method	158	Symbolic Analogy
43	DEMATEL (Decision Making Trial and Evaluation Laboratory)	101	Mood Board	159	Synectics
44	Direct Analogy	102	Morphological Analysis	160	T.T-HS (Tree Thinking-Harmonic Selection) Method
45	Discriminant Analysis	103	Multi-Dimensional Scaling	161	Taguchi Method
46	Divergent Tree Method	104	Multiple Regression Analysis	162	Task Analysis
47	DSM (Design Structure Matrix)	105	Non-Adaptive Random Search	163	Teaching Method
48	DTM (Disturbance Transformation Matrix)	106	NID (Need Idea Development) Method	164	Technology Road Map
49	Dual Scaling	107	NM (Nakayama Masakazu) Method	165	T-Plan
50	Ethnography	108	Ordinaly Differential Equation	166	TRIZ
51	Experiental Design	109	Paired Link Method	167	t-Test
52	Factor Analysis	110	Pairwise Testing	168	Two-Step Manipulation Method
53	Fault Enumeration Method	111	Parametric Design	169	Value Analysis
54	FFDM (Function Failure Design Method)	112	Pareto Chart	170	Virtual Matter Setting Method
55	Field Work	113	Partial Differential Equation	171	Wants and Needs Analysis
56	Fishbone Diagram	114	Particle Swarm Optimization	172	Work Design
57	Fly-on-the-Wall Observation	115	Path Analysis	173	WTM (Work Transformation Matrices)
58	FMEA (Failure Mode Effect Analysis)	116	Performance Distribution Analysis	174	ZK (Zenji Kawakita) Method

Fig. 1 Liste de 174 méthodes de conception publiées après 2001 (Sakae, Kato, Sato, & Matsuoka, 2016)

Les évaluations des méthodes et leur regroupement au sein des clusters identifiés sont relatifs et permettent de déterminer celles qui peuvent correspondre au besoin du concepteur, en fonction de ce qu'il souhaite réaliser (Génération de solutions, Analyse de problèmes de conception ou évaluation de solutions) et de la manière dont il souhaite le faire (Sakae, Kato, Sato, & Matsuoka, 2016). D'après les travaux qui servent de base à l'étude des sciences de la conception, trois actions sont systématiquement reproduites dans le processus de conception (Matsuoka, 2008; Pahl, Beitz, Feldhusen, & Grote, 2007; Cross, 2008). Ces trois étapes sont « design problem analysis », « idea generation » et « idea evaluation ». Autrement dit, (i) analyse du problème, (ii) génération de solutions et (iii) évaluation de solutions. Ces phases du cycle de développement sont reproduites pour passer progressivement d'un design émergent à un design optimal, transitant par la même occasion progressivement du domaine psychologique au domaine physique (Sakae, Kato, Sato, & Matsuoka, 2016).

Les deux premières catégories « design problem analysis » et « idea generation » peuvent être encore subdivisées en trois catégories chacune (Takashi Asanuma, 2007; Takahashi, 2002).

- Design Problem Analysis:
    - **Classification:** Action de regrouper les éléments de conception par similarités.
    - **Structuration:** Action de structurer les éléments de conception par corrélations.
    - **Formulation:** Expression des relations entre les éléments de conception par des formules mathématiques.
- Idea Generation:
    - **Free Association**: Génération d'éléments de conception de façon libre par le concepteur.
    - **Forced Analogy**: Génération de solutions contraintes par la définition d'un thème de génération d'idées.
    - **Analogy**: Génération de solutions à partir d'un système présentant une fonction proche ou identique comme base de réflexion.

Finalement, le dernier élément de classification des clusters est basé sur la nature des données de conception que les différentes méthodes de conception manipulent lors de leur application, selon qu'elles sont qualitatives ou quantitatives (Yuji Nomura, 2007). Des données qualitatives ne peuvent pas être exprimées sous formes numériques, telles que des échelles

nominales ou ordinales. Des données quantitatives peuvent contenir des données numériques, comme des intervalles ou des ratios.

Table 1. Vue globale de la classification et détail de chaque cluster (Sakae, Kato, Sato, & Matsuoka, 2016).

Cluster				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Matsuoka's Design Thinking	Idea Genereation	Free Association	Qualitative		●		●									
			Quantitative													
		Forced Analogy	Qualitative	●				●								
			Quantitative											▲		▲
		Analogy	Qualitative			●										
			Quantitative													
	Design Problem Analysis	Classification	Qualitative				●	●	▲							
			Quantitative							▲		●				
		Structuration	Qualitative				●	●	▲							
			Quantitative								▲	▲	▲			
		Formulation	Qualitative							▲						
			Quantitative									▲				
	Idea Evaluation		Qualitative											▲		
			Quantitative									● ▲	▲	▲	▲	▲

Les cercles rouges représentent les méthodes du domaine « conception émergente » et les triangles bleus représentent les méthodes du domaine « conception optimale » (Nomura, Ujiie, & Matsuoka, 2007). La « conception émergente » est une approche bottom-up qui considère l'ensemble à partir de ses composants. Etant donné que la conception émergente met en avant de nouveaux éléments de conception, elle est souvent utilisée tôt dans le processus de conception, quand les concepteurs déterminent les concepts et les objectifs du produit final (Conceptual Design) et quand ils décident de la topologie et des matériaux du système à concevoir (Basic Design). A l'inverse, la « conception optimale » est une approche de conception top-down où les composants sont optimisés à partir de la conception globale du produit. Pour cette raison, la conception optimale est principalement adaptée aux étapes de conception tardives telle que l'étape de conception détaillée où le concepteur détermine les détails de la géométrie et des matériaux utilisés. Les évaluations des méthodes et leur regroupement au sein des clusters identifiés sont relatifs et permettent de déterminer celles qui peuvent correspondre au besoin du concepteur, en fonction de ce qu'il souhaite réaliser (Génération de solutions, Analyse de problèmes de conception ou évaluation de solutions) et de la manière dont il souhaite le faire (Sakae, Kato, Sato, & Matsuoka, 2016).

- Le cluster 1 est constitué de 27 méthodes de conception utilisant des « analogies forcées », telles que « Backcasting », « Benchmarking », « Role playing » et « TRIZ ». Toutes ces méthodes de conception sont utilisées pour générer des éléments de conception qualitatifs grâce à un processus cyclique de groupes ou de

discussions privées. Ainsi, les méthodes du cluster 1 appartiennent à la catégorie « conception émergente ».

- Le cluster 2 est constitué de 13 méthodes de conception utilisant « l'association libre », telles que « Brainstorming », « Autoethnography », « Focus Group Interview », and « Critical Incident Technique ». Comme le cluster 1, chaque méthode de conception est utilisée pour générer des éléments de conception qualitatifs à l'aide de discussions individuelles et de groupes. Ainsi, les méthodes du cluster 2 appartiennent à la catégorie « conception émergente ».
- Le cluster 3 est constitué de 7 méthodes de conception impliquant « l'analogie », telle que « Synectics », « Gordon Method » et « Bionics Method ». Elles sont toutes utilisées pour générer des éléments de conception qualitatifs. Ces méthodes s'accompagnent d'activité impliquant un groupe de personnes, indiquant que le cluster 3 appartient aussi à la catégorie « conception émergente ».
- Le cluster 4 est constitué de 33 méthodes de conception utilisées pour « l'association libre » associée à la « classification » et la « structuration », telle que « Affinity Diagram », « Linkography Mapping », « Morphological Analysis » and « Quality Function Deployment ». Chaque méthode de conception implique une discussion de groupe ou avec soi-même pour générer des éléments de conception qualitatifs. Ainsi, le cluster 4 est aussi classé dans la catégorie « conception émergente ».
- Le cluster 5 est constitué des méthodes de conception utilisées pour « l'analogie forcée » associée à la « classification » et la « structuration », telles que « Attribute Listing », « SWOT Analysis », « FTA » and « MET Matrix ». Toutes ces méthodes impliquent un échange faisant appel à des éléments de conception qualitatifs. Pour les mêmes raisons que précédemment, le cluster 5 est classé dans la catégorie « conception émergente ».
- Le cluster 6 est constitué de 7 méthodes de conception possédant des caractéristiques permettant la « classification » ou la « structuration » telles que « ISM », « DSM », « Qualification Theory Type 3 » et « Correspondence Analysis ». Contairement aux clusters précédents, les méthodes du cluster 6 utilisent des éléments de conception quantitatifs. De plus, l'objectif de l'utilisation de ces méthodes est de clarifier les liens entre les différents éléments de conception qui composent un système. Ainsi, le cluster 6 appartient à la catégorie « conception optimale ».

- Le cluster 7 est constitué de 9 méthodes de conception associées à deux approches spécifiques : la « formulation » associée à l'utilisation d'éléments qualitatifs et pour la « classification » associée à l'utilisation d'éléments quantitatifs. Par exemple la méthode « Qualification Theory Type 1 » s'inscrit dans la première approche, et « Factor Analysis », « Cluster Analysis » et « Discriminant Analysis » s'inscrivent dans la seconde. Le seul point commun entre ces méthodes est qu'elles appartiennent à la catégorie « conception optimale ».
- Le cluster 8 est constitué de 11 méthodes de conception utilisées pour de la « formulation » utilisation des éléments de conception quantitatifs, telles que « DTM », « Multiple Regression Analysis », « Canonical Correlation Analysis » et « Fuzzy Influence ». Toutes ces méthodes ont pour but de déterminer les liens entre chaque élément de conception. Ainsi, le cluster 8 appartient à la catégorie « conception optimale ».
- Le cluster 9 est constitué de 9 méthodes de conception couramment utilisées pour la « classification », la « structuration » et la « formulation » en parallèle avec « l'évaluation », telles que « Path Analysis », « Experimental Design », « Self-Organizing Map » et « Sizing Optimization ». Le point commun entre ces méthodes est qu'elles utilisent toutes des éléments de conception quantitatifs. De plus, la plupart des méthodes de conception cherchent à définir le lien entre un système et les éléments qui le composent. Ainsi, le cluster 9 est classé comme « Conception émergente ». Incidemment, il n'y a pas d'autre méthode présentant les mêmes caractéristiques que celles mentionnées ci-dessus, regroupant des méthodes assez diverses au sein d'un même cluster.
- Le cluster 10 est constitué de 6 méthodes de conception permettant la « structuration » associée à « l'évaluation » utilisant des éléments quantitatifs telles que « Cellular Automaton », « Petrinet », « Hierarchical Neural Network » et « Identify Mapping Model ». Toutes ces méthodes appartiennent à la « conception émergente » étant donné qu'elles cherchent à établir les liens entre les éléments de conception.
- Le cluster 11 est constitué de 9 méthodes de conception utilisées pour « l'évaluation » associée à l'utilisation d'éléments qualitatifs telles que « Fly-on-the-Wall-Observation », « Ethnography », « Delphi Study » et « Cognitive Walkthrough Method ». Chacune de ces méthodes est utile pour clarifier les liens

entre les éléments de conception et étudier les aspects utilisateurs. Ainsi, le cluster 11 est classé dans la « conception optimale ».

- Le cluster 12 est constitué de 5 méthodes de conception comprenant des capacités « d'évaluation » utilisant des éléments quantitatifs telles que « t-Test », « Semantic Differential Method » et « Performance Evaluation ». Comme le cluster 11, chaque méthode spécifie les connections entre les éléments de conception. Le cluser 12 appartient donc à la catégorie « conception optimale ».
- Le cluster 13 est constitué de 19 méthodes de conception utilisées pour « l'analogie forcée » en parallèle avec « l'évaluation » telles que « Collaborative Optimization », « Generic Algorithm », « Simulated Annealing » et « Shape Grammar ». Elles appartiennent toutes à la « conception émergente » en raison du fait qu'elles décrivent les relations entre un système et les éléments qui le composent.

Les clusters identifiés par Sakae sont liés à trois objectifs spécifiques de conception (Idea generation, Design problem analysis, Idea evaluation). Les problématiques des architectes englobent ces trois objectifs au fur et à mesure du cycle de développement. Leur rôle est d'analyser et synthétiser les contraintes de conception issues de différentes sources, de proposer des solutions d'architecture et de finalement les évaluer pour les approuver ou les rejeter selon les objectifs de conception. Ainsi, cette classification est plus adaptée à une activité de conception plus restreinte que l'architecture qui gère l'ensemble du produit à concevoir sur une grande partie du cycle de développement. Cette classification aura eu le mérite de nous faire découvrir certaines méthodologies de conception et de confirmer que la classification de ces méthodologies est toujours un sujet de recherche mais ne nous permet pas de faire un choix définitif pour notre activité de recherche. La multiplicité et la diversité de ces méthodologies rend leur compréhension et leur utilisation difficile.

D'autres classifications ont été proposées, en se basant sur le type d'activité (Horváth, 2004; Tomiyama, et al., 2009). Ces classifications présentent l'inconvénient de retrouver les mêmes méthodes dans différentes catégories, aucun élément ne permet au concepteur de choisir l'outil le plus utile à son activité.

Tomiyama, dès 1997, propose de différencier la conception abstraite et concrète. La conception abstraite consiste souvent à définir un problème de conception sous une forme mathématique au sens des algorithmes. Les solutions obtenues sont satisfaisantes du point de vue des mathématiques. Par opposition, la conception concrète consiste à regrouper des études

de cas individuels de conception d'une catégorie de produits spécifiques, puis d'en extraire les points communs entre eux. Des méthodes de conception adaptées à un type de produits peuvent être ainsi obtenues (Tomiyama, et al., 2009).

A partir de cette distinction, une nouvelle classification est introduite en prenant également en compte le caractère général ou individuel des méthodes retenues. Cette classification sera complétée par la suite en introduisant la fréquence d'utilisation de ces DTM en fonction du contexte industriel et académique (Table 2). Les conclusions de ce travail montrent que les méthodes générales et concrètes sont très enseignées ainsi que les méthodes abstraites et individuelles.

Les méthodologies générales et concrètes, qui couvrent un large spectre du processus de conception, offrent une possibilité de structuration de la conception et servent de référence à la réflexion des processus industriels mais restent souvent éloignées des processus appliqués. De plus, le caractère très particulier de chaque entreprise nécessite des adaptations propres à chaque contexte industriel. Par contre les méthodes ayant un objectif bien défini qui permet de satisfaire une activité particulière du processus de conception sont particulièrement développées et introduites dans le monde industriel (TRIZ, QFD, design for X).

Les méthodes abstraites et individuelles se retrouvent également très développées dans le monde industriel car les possibilités offertes aujourd'hui par les mathématiques et l'informatique permettent de trouver des solutions qui tendent vers des optimums, avec des ressources liées à leur mise en œuvre qui sont cohérentes avec les possibilités des industriels.

En conclusion, la finalité et le niveau d'adaptabilité des méthodologies et théories de conception sont les éléments clés qui leur permettent d'être aussi bien enseignées que déployées dans le monde industriel.

Table 2 : classement des méthodologies et théories de conception (Tomiyama, et al., 2009).

	General	Individual
Abstract	• Design theory (GDT, UDT) Widely taught	• Math based methods (optimization, Axiomatic Design, Taguchi Method • Computer programs
Concrete	• Design methodology (Adaptable Design, Characteristics -Properties Model of Weber, Contact and Channel Model of Albers, Emergent Synthesis, Hansen, Hubka & Eder, Integrated Product Development of Andreasen, Koller, Muller, Pahl & Beitz, Roth, Ullman, Ulrich & Eppinger) • Methodology to achieve concrete goals (Axiomatic Design, Design for X, Design Decision Making Methods, DSM, FMEA, Pugh's Total Design, TRIZ, QFD) • Process methodologies (Concurrent Engineering, DSM)	• Design methods Widely taught and used

Une autre classification, celle de Finger et Dixon, propose 6 catégories de DTM (S Finger, 1989a) (S Finger, 1989b) qui sont définies ci-dessous :

- **Modèles descriptifs des processus de conception :** dans cette catégorie, soit les auteurs recueillent des données sur la manière de travailler des concepteurs, soit ils proposent des modèles du processus cognitif liés aux concepteurs. Des modèles descriptifs non fondés sur l'observation formelle du processus de conception ont été également identifié, sont liés au sens intuitif des concepteurs, on retrouve à ce titre entre autres dans cette catégorie, les différentes méthodologies issues de l'école allemande (Koller, 1998; Pahl, Beitz, Feldhusen, & Grote, 2007; Rodenacker, 1991; Roth, 2000).

- **Modèles prescriptifs de la conception :** ils prescrivent comment le processus de conception doit procéder et/ou définissent les attributs que l'artefact de conception doit avoir. On retrouve ici également les travaux allemands liés à l'étude morphologique d'un produit (Pahl, Beitz, Feldhusen, & Grote, 2007) ou des modèles prescriptifs portant sur les artefacts issus de l'activité de conception par exemple "General Design Theory" (Yoshikawa, 1985) ou "Axiomatic Design" (Suh N. P., 2001).

- **Modèles informatiques pour les processus de conception :** sont identifiées ici toutes les méthodes liées aux possibilités offertes par les mathématiques et l'informatique pour l'aide des concepteurs, on peut citer la conception paramétrique et les méthodes basées sur l'intelligence artificielle, la modélisation de produits.

- **Langages, représentations et environnements pour la conception :** la modélisation géométrique, la modélisation des fonctions et des comportements, la modélisation basée sur les caractéristiques.

- **Analyse pour la conception :** méthodes d'optimisation, travaux sur l'interprétation des résultats éléments finis, support d'aide à la décision, analyse des affordances.

- **Design for X**, avec toutes les activités rencontrées au cours du cycle de vie du produit qui peuvent être déclinée de manière simultanée ou non.

Ces travaux ont comme mérite de mettre en avant les objectifs des méthodologies et théories mais n'apporte pas une aide réelle dans le choix de méthodologies par rapport au contexte particulier d'un problème de conception. Les différentes catégories portent sur des activités très différentes. Elles sont aussi bien de l'ordre de théories très générales qui s'appliquent au processus global de conception, comme la première catégorie qui porte sur l'analyse des processus de conception, que de l'ordre de théories très locales correspondant à une activité particulière comme le design for X par exemple. De plus, certaines théories ont des vocations très abstraites pour définir un cadre de travail (General design Theory), pour

permettre de traduire sous forme mathématique des problèmes de conception alors que d'autres sont très applicatives.

Bien que cette classification ait été considérée comme complète en 1989, après presque 30 ans elle a nécessairement besoin d'une mise à jour. Par exemple, de nombreuses théories et techniques (dont certaines existaient à l'époque), comme TRIZ (Altshuller G. , 2002) et QFD (Quality Function Deployment) (Akao, 1990) ne sont pas mentionnées malgré l'intention des auteurs d'être exhaustifs. La classification elle-même pourrait aussi être revue, en particulier à cause des progrès importants qu'ont connu les technologies informatiques durant ces 30 dernières années. Cependant, cette faiblesse de la classification de Finger et Dixon ne nous empêche pas d'en tirer des informations précieuses qui pourront être complétées par des travaux plus récents. Les catégories 1, 2 et 6 nous intéressent et sont toujours d'actualité bien que les méthodes décrites aient pu évoluer depuis. En effet, les catégories 1 et 2 regroupent des méthodes respectivement descriptives et prescriptives de la conception qui pourraient aider pour l'axe de recherche 1 (liaison fonction structure) et la catégorie 6 regroupe des méthodes qui pourraient aider pour l'axe de recherche 2 (évaluation performance industrielle) en scrutant spécifiquement les méthodes liées à l'industrialisation, la production et l'assemblage.

En parcourant la littérature, on constate qu'il existe de nombreuses méthodes applicables en phase de conception préliminaire sur des systèmes non existants. Pour n'en citer que quelques-unes, à titre d'exemple, (i) le Concurrent Engineering (Warmack JP, 1991) qui cherche à réduire les délais de développement d'un produit, (ii) le Design for X (Huang, 1996) qui permet aux concepteurs d'adresser spécifiquement certains critères de conception (tels que coûts, qualité, délais) ou une phase spécifique du cycle de vie du produit (tels que la fabrication des pièces ou l'assemblage) ; (iii) le Design Structure Matrix ou DSM qui peut être utilisé pour gérer la complexité (Browning, 2001; Pimmler & Eppinger, 1994) et (iv) TRIZ qui regroupe des outils et une méthode de créativité basés sur la résolution de contradictions (Altshuller G. , 1984). Ces méthodes ont été développées dans le but de cibler des problèmes spécifiques du processus de conception et pourraient être appliquée pour résoudre le manque de contraintes industrielles dans les étapes de conception préliminaire. Dans la suite du document, différentes approches seront présentées et étudiées dans le but de définir si elles sont compatibles avec les besoins de ces travaux de recherche. L'objectif est de comprendre si des méthodes existantes peuvent être directement appliquées en réponse aux problématiques identifiées et/ou s'il est nécessaire de les adapter ou de développer de nouvelles méthodes de conception. Dans le cadre de cette thèse, nous sommes à la recherche d'une méthode permettant de générer des solutions, d'évaluer des architectures et de donner un cadre de conception. Cependant, la plupart sont

établies d'après les travaux de Pahl & Beitz (Pahl, Beitz, Feldhusen, & Grote, 2007) et suivent un paradigme de conception linéaire qui implique un lien unidirectionnel du domaine fonctionnel vers le domaine physique, étant donné que les choix de conception sont dérivés des fonctions attendues du produit.

2.2 COMPLEXITE

Une première analyse des méthodes de conception candidates peut être réalisée en fonction de leur capacité ou non à gérer la complexité du système à concevoir. En effet, l'une des contraintes de notre étude est liée au domaine aéronautique et à la complexité inhérente au produit avion. La méthode globale de conception proposée devra donc être capable de gérer la complexité d'un système aéronautique, il est donc nécessaire de la définir correctement afin de justifier le choix des méthodologies candidates.

La définition de la complexité telle qu'énoncée par Remo Badii et Antonio Politi est : « La complexité est la propriété d'un modèle qui rend difficile la formulation de son comportement général dans un langage donné, malgré un niveau d'information suffisamment complet de ses composants atomiques et la façon dont ils interagissent » (Badii & Politi, 1993). La complexité n'est donc pas associée à de l'ignorance mais plutôt à la difficulté de décrire de façon satisfaisante le comportement d'un modèle. Il existe de nombreux travaux dans la littérature qui forment une définition finalement assez vague car elle peut provenir de plusieurs sources, souvent cumulatives. Il n'y pas à ce jour de vision exhaustive communément admise de la complexité mais il existe de nombreuses collections d'ouvrages traitant de ce sujet. Les travaux de (Perlis, Sayward, & Shaw., 1981; Aida, 1985; Stein., 1989; Bunge., 1963) traitent de la complexité en général et de la façon de l'aborder selon le domaine d'activité, selon un axe philosophique pour certains (Trappl., 1986; Berry., 1994; Chapman., 1984), mathématique pour d'autres (Foster & Martin, 1966; Börger., 1989). D'autres se concentrent sur des facettes spécifiques de la complexité et se concentrent sur la compréhension de la complexité restreinte à ce domaine. L'étude de (Anderson, Arrow, & Pines., 1988) présente l'économie comme un système complexe, (Casti & Karquist, 1985) étudient des modèles mathématiques pouvant décrire la complexité, (Gottinger & Leinfellner., 1978) abordent la complexité de la prise de décision dans les rapports sociaux et moraux entre les individus. (Pattee., 1973) a cherché à comprendre la nature et la dynamique des systèmes complexes organisés hiérarchiquement dans le but de comprendre l'origine de la vie et des êtres vivants. Les travaux de (Bennett., 1990) sont relatifs à la complexité dans la physique, (Bremermann, 1974) cherche à formaliser les

complexités liées à la compréhension du fonctionnement du cerveau humain. Chacun de ces travaux aborde différents aspects de la complexité et bien que des parallèles puissent être dressés entre différents domaines, l'étude de la complexité est souvent propre au domaine d'activité, au contexte et à l'époque. Les complexités rencontrées aujourd'hui par des ingénieurs aéronautiques sont différentes de celles rencontrées par des ingénieurs automobiles il y a un demi-siècle.

En effet, la complexité d'un produit peut entre autres être issue du niveau élevé technologique nécessaire à la maîtrise de son comportement, à ses dimensions ou ses caractéristiques physiques extrêmes, au contexte économique ou industriel, au nombre de personnes concernées et à la diversité de leurs compétences, ou encore simplement à la quantité d'éléments qui le composent et interagissent. Aussi, de nombreuses sources de complexité différentes peuvent se cumuler, elles ne sont pas toujours facilement identifiables et des stratégies spécifiques s'appliquent pour les gérer. Il existe autant de définitions de la complexité que de domaines où elle peut être observée. Un des enjeux de cette étude sera d'analyser les sources de complexité auxquels sont soumis les concepteurs dans l'industrie aéronautique et comment les adresser. Il est donc nécessaire de correctement décrire la complexité, les sources de complexité potentielles, de les hiérarchiser et de classifier les méthodes connues de gestion de la complexité.

2.2.1 Définition de la complexité

Il n'existe pas de définition précise et universelle de la complexité qui couvre la signification que peut avoir ce terme dans tous les domaines où elle peut être observée. Certaines tentatives de définitions ont cependant été formulées en fonction des objectifs que la complexité peut gêner à atteindre. Par exemple dans les problématiques d'optimisation, la complexité peut être définie par l'importance des efforts nécessaires à la formulation d'un problème d'optimisation et à l'identification de la (ou des) solution(s) optimale(s). La complexité peut être causée par une forte compétitivité du marché, générant de l'incertitude et de la volatilité, une évolution de l'offre, la globalisation, une économie complexe, des dynamiques sociologiques et technologiques, une augmentation des attentes des clients combinés à la possibilité pour eux de comparer les produits facilement et pour les compagnies le besoin d'augmenter leur compétitivité (Elmaraghy, Elmaraghy, Tomiyama, & Monostori.; Tolio, et al., 2010).

Weber (Weber C. , 2005c) étudie la complexité à travers le développement de produit. Il postule qu'il n'existe pas de conception générale de la complexité et qu'il ne serait peut-être même pas possible d'en développer une. Pour le citer « la complexité est trop complexe pour être conceptualisée ». La 1ère difficulté d'après lui est le manque d'outils permettant de mesurer la complexité, de lui donner une valeur absolue. Un autre facteur est l'aléatoire ou l'incertitude comme source de complexité qu'il est difficile de gérer ou réduire.

Nam P. Suh, le créateur de l'« Axiomatic Design », définit la complexité dans son ouvrage « Complexity in Engineering » comme « *Une mesure de l'incertitude dans la compréhension de ce qu'on cherche à savoir ou dans la satisfaction d'une exigence fondamentale* » (Suh N. P., Complexity in Engineering, 2005). Cette définition de la complexité, issue de l'Axiomatic Design, implique que l'incertitude est une cause principale de la complexité.

2.2.2 Classifications de la complexité

Il existe différentes classifications de la complexité dans la littérature, l'objectif étant d'analyser la complexité pour mieux la comprendre et donc mieux la gérer. D'après les travaux de Suh (Suh N. P., Complexity in Engineering, 2005), la complexité peut être fonction du temps ou complètement indépendante du temps selon que système étudié évolue ou non en fonction du temps. Il décrit donc une classification de la complexité en quatre catégories : (i) Time-independent real complexity, (ii) Time-independent imaginary complexity, (iii) Time-dependent imaginary complexity et (iv) Time-dependent periodic complexity.

D'après Kim (Kim S. , 2004), il existe quatre causes à la complexité dont la classification présente des similitudes avec l'Axiomatic Design. Ces causes sont le couplage, le découplage, l'incertitude et la difficulté de conception et sont liés aux concepts complexité réelle et imaginaire. La figure ci-dessous (Fig. 2) illustre cette classification :

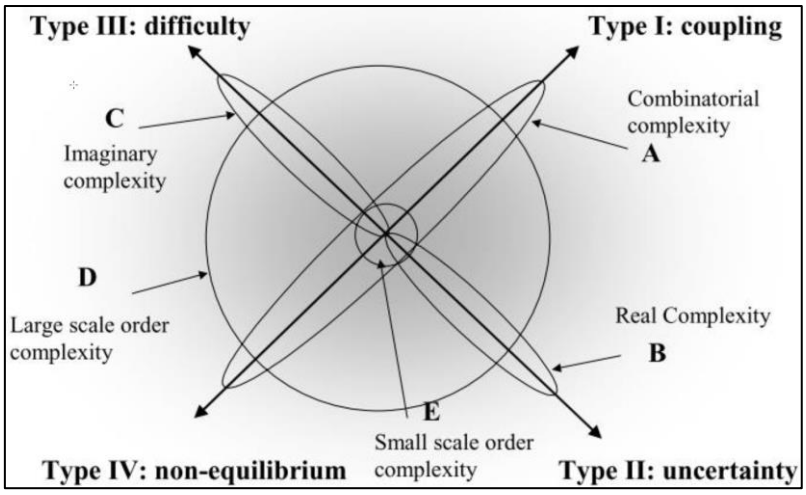


Fig. 2 Classification de la complexité de (Kim S. , 2004) basée sur l'Axiomatic Design.

Weber (Weber C. , 2005b), de son côté, spécifiquement dans le cadre de la conception produit, divise la complexité en deux catégories : la « connectivité » et la « diversité » comme illustré ci-dessous (Fig. 3). Dans le cas de la connectivité, la complexité est générée par la nature et le nombre de connexions tandis que dans le cas de la diversité, la complexité est liée à la nature et au nombre d'éléments composants le système étudié (Weber C. , 2005c).

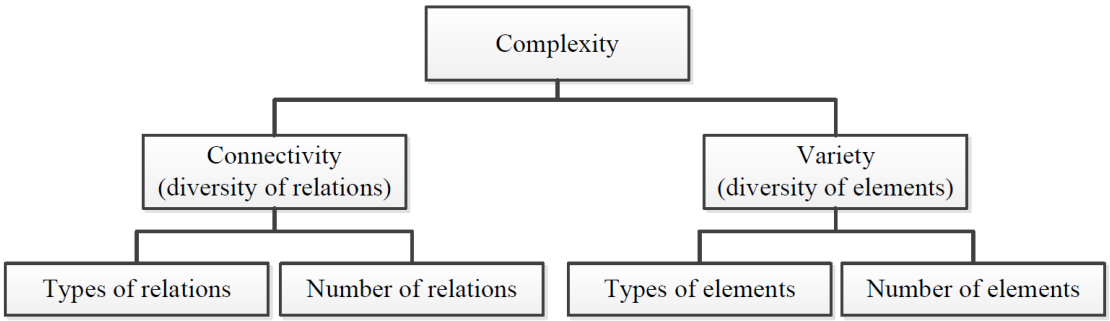


Fig. 3 Catégorisation de la complexité du développement d'un produit d'après les travaux de (Weber C. , 2005c).

Weber (Weber C. , 2005b) divise la complexité selon 5 dimensions : (i) complexité numérique, (ii) complexité relationnelle/structurelle, (iii) complexité « variationnelle », (iv) complexité de la discipline, (v) complexité organisationnelle. Les trois premières dimensions sont liées au produit tandis que les deux dernières sont liées au processus de conception (Fig. 4). L'accent est mis sur le développement du produit et le processus

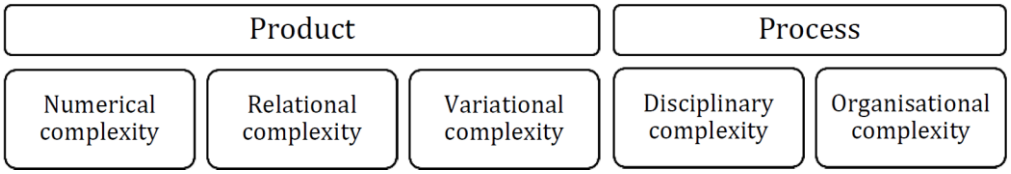


Fig. 4 Cinq dimensions de la complexité d'après (Weber C. , 2005c).

2.2.3 Solutions potentielles de gestion de la complexité

Suh (Suh N. P., Complexity in Engineering, 2005) pense que la meilleure façon de gérer la complexité est de la réduire ou de l'éliminer. D'après la classification de la complexité qu'il a établie et que nous avons détaillée précédemment, il existe une complexité réelle et une complexité imaginaire. Suh explique qu'en rédigeant les équations de conception de façon exhaustive, il ne sera plus nécessaire de suivre un processus de conception empirique par essais et erreurs et que la complexité sera réduite.

Au contraire, ElMaraghy et al. pensent que la complexité ne doit pas nécessairement être réduite mais qu'il suffit de la gérer, la complexité n'étant pas un aspect forcément négatif de la conception d'un produit. Non seulement la complexité peut être source de nouveauté et de créativité, mais il est possible de la gérer et de la tourner à l'avantage du concepteur dans le but de définir un produit qui sera compétitif sur le marché. La complexité du produit peut aussi servir de protection à une entreprise, rendant l'imitation moins évidente. C'est notamment le cas pour les industries aéronautiques dont les produits sont suffisamment complexes pour que leur reproduction le soit aussi. Ainsi, en suivant cette logique, il serait plus pertinent d'apprendre à gérer la complexité plutôt que de chercher à la réduire ou l'éliminer.

Afin de résoudre la complexité, le concepteur cherche d'abord à comprendre le système et les sources de complexité qu'il peut présenter. Des méthodes connues telles que le design for manufacturing ou « l'Engineering Collaborative Negotiation (ECN) » peuvent aider dans ce but. Les méthodes de développement de produit telles que le V-Model peuvent aider à gérer la complexité pendant le processus de développement du produit.

Dans notre cas, la complexité se traduit par la nature multi-échelles du système qui implique une représentation à différents niveaux de décomposition. Corréler les fonctions, la structure et le processus industriel pourrait être une façon de gérer cette complexité. Certains auteurs ont proposé des méthodes permettant de lier les différentes vues d'un produit. Dans un premier temps, nous allons déterminer des approches permettant de lier les vues fonctionnelle et physique. Les méthodes de représentation du processus industriel seront explorées plus loin dans cette analyse de la littérature. Cependant cette stratégie pose aussi deux questions auxquelles il va falloir répondre : Comment appliquer ces méthodes sur un système multi-échelles ? Et comment se déplacer dans les niveaux de l'arborescence ?

2.3 THEORIES DE MODELISATION, METHODOLOGIES ET APPROCHES

2.3.1 Axiomatic Design (AD)

En restreignant la recherche aux méthodes permettant de modéliser et gérer ce lien dans les deux sens, on constate qu'il n'existe pas de méthode standard à ce jour malgré quelques tentatives. La méthode d'Axiomatic Design par exemple, proposée par Suh (Suh N. P., 1990), aborde notamment cette question à travers l'hypothèse selon laquelle la conception implique une interaction entre le besoin décrit par la fonction et les moyens décrits par le ou les composants qui la remplissent (Suh N. P., 2001). Cependant, cette méthodologie est toujours linéaire et plus adaptée à l'analyse de composants qu'à celle du système global (Alavizadeh, 2010). En effet, la hiérarchisation des fonctions définissant des systèmes complexes implique une multiplication des exigences fonctionnelles qui sont nécessaires à la bonne application de la méthode. Elle est donc difficilement applicable sur les systèmes de systèmes présentant de nombreuses sources de complexité, tel que le produit aéronautique.

L'Axiomatic Design est une théorie assez répandue définie par Suh en 1990. Son objectif est « d'établir une base scientifique visant à améliorer les activités de conception en fournissant aux concepteurs une base théorique basée sur la logique, des outils un cheminement de pensée rationnel » (Suh N. P., 1990). D'après l'Axiomatic design, la conception implique d'alterner entre « ce que l'on cherche à réaliser » et « comment on choisit de répondre au besoin ». Le monde de la conception est composé de quatre domaine : domaine client, domaine fonctionnel, domaine physique et domaine du process (Fig. 5). Chaque domaine décrit le domaine représenté à sa droite qui cherche alors à satisfaire les exigences du domaine représenté à sa gauche (Suh N. P., 2001).

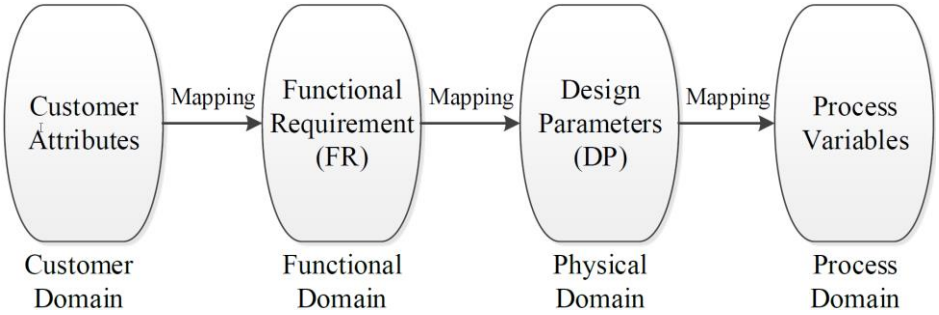


Fig. 5 Axiomatic Design (Suh N. P., 2001).

Le domaine client est défini par les besoins client. Dans le domaine fonctionnel, les besoins client sont exprimés sous la forme d'exigences fonctionnelles (Functional Requirements – FR) et de contraintes. Dans le domaine physique, les paramètres de conception

(Design Parameters – DP) sont le moyen retenu pour satisfaire les exigences fonctionnelles. Enfin, dans le domaine du process, les variables de process sont définies à partir des DPs.

Du point de vue de la conception du produit, les FRs, ce que l'on cherche à réaliser, sont des spécifications de conception qui sont satisfaites par des paramètres de conception. L'incertitude liée à la définition de ces paramètres de conception créée de la complexité quant à la satisfaction des tolérances et niveaux de précision requis.

L'Axiomatic Design présente deux axiomes majeurs :

1. *Axiome d'indépendance :* Maintenir l'indépendance des exigences fonctionnelles. Lors de la création des liens entre les FRs et les DPs, chaque FR doit pouvoir être satisfait sans affecter les autres FRs.
2. *Axiome d'information :* Minimiser la quantité d'information d'un concept. S'il y a plus d'un concept qui satisfait les mêmes FRs et confirme l'axiome d'indépendance, le meilleur est celui qui contient le minimum d'information.

L'Axiomatic Design peut être utilisé dans la conception intégrée. La relation entre le domaine physique et le domaine du process créé un lien entre le produit et le process. Ainsi, les variables du procédé de fabrication sont définies par les paramètres de conception clés. De plus, en créant le modèle structurant cette relation, un zigzag s'opère entre les domaines fonctionnel et physique du produit, tel que montré Fig. 6. La décomposition du système est réalisée à travaux les domaines fonctionnel et physique en parallèle. L'étude démarre au plus haut niveau de conception préliminaire quand il y a suffisamment d'informations pour décrire les fonctions attendues du produit. Ensuite, à partir d'un FR0 issu du domaine fonctionnel, on décrit le concept et détermine le DP correspondant dans le domaine physique. On retourne alors vers le domaine fonctionnel où l'on décompose le FR0 d'origine en FR1 et FR2 qui, ensemble, satisfont FR0. Cette approche dite en « zigzag » continue de décomposer le domaine fonctionnel en sous-fonctions jusqu'à ce que FR0 puisse être satisfaite (Suh N. P., 2001). Cette approche est l'une des bases de réflexion de ces travaux de recherche pour l'élaboration d'une méthode de conception architecturale applicable à l'aéronautique. Les détails de cette approche sont expliqués au chapitre 4.

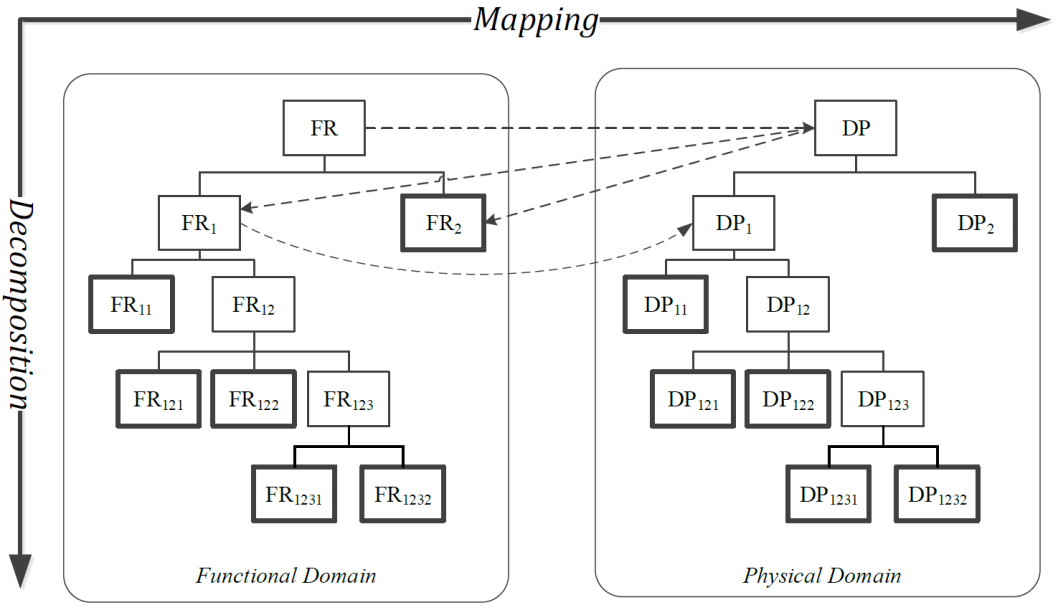


Fig. 6 Approche en zigzag de l'Axiomatic Design (Suh N. P., 2001).

2.3.2 Function-Behavior-Structure (FBS)

La méthode FBS, pour Function-Behavior-Structure, a été introduite par John Gero en 1990. Cette méthode a pour objectif de modéliser un système à partir de ses fonctions, son comportement et sa structure. La fonction y est définie comme un intermédiaire entre les besoins du client et le comportement du système. Le comportement décrit les attributs qui sont dérivés de la structure. La structure comprend les composants du système et leurs relations. Il y a huit processus décrits dans le cadre de la méthode FBS.

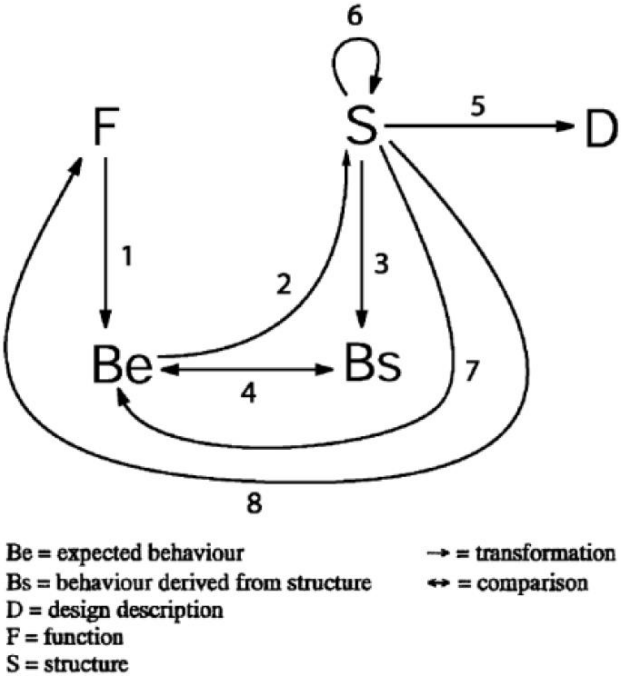


Fig. 7 La structure de l'approche FBS (Gero, 1990).

Tout d'abord, les exigences de conception (exprimées par la fonction (F)) sont transformées en un comportement attendu du système (Be). Le comportement attendu devient le comportement désiré qui est la solution structure (S). Le comportement observé (Bs) est issu de la structure. Le quatrième processus est l'évaluation par la comparaison entre le comportement attendu (Be) et le comportement observé (Bs) du système. Comparer Bs et Be permet de relever la différence entre les objectifs de conception et le résultat du concept fini. L'objectif du concepteur est de minimiser cette différence, on comprend qu'un système qui ne se comporte pas tel qu'il a été conçu peut ne pas correctement satisfaire les fonctions identifiées et donc les besoins du client. La cinquième étape est la documentation qui permet de créer la description du concept (D). Finalement, si le comportement observé du système est jugé insatisfaisant, trois boucles itératives permettent d'agir sur les variables de la structure, du comportement attendu et des fonctions afin d'améliorer le système (Gero & Kannengiesser, 2004).

Dans une autre publication de Gero (Gero & Kannengiesser, 2004), la notion de « situated FBS framework », qui peut se comprendre comme « environnement d'application FBS » est introduite. Elle comprend trois environnements de conception appelés environnement attendu, environnement interprété et environnement extérieur.

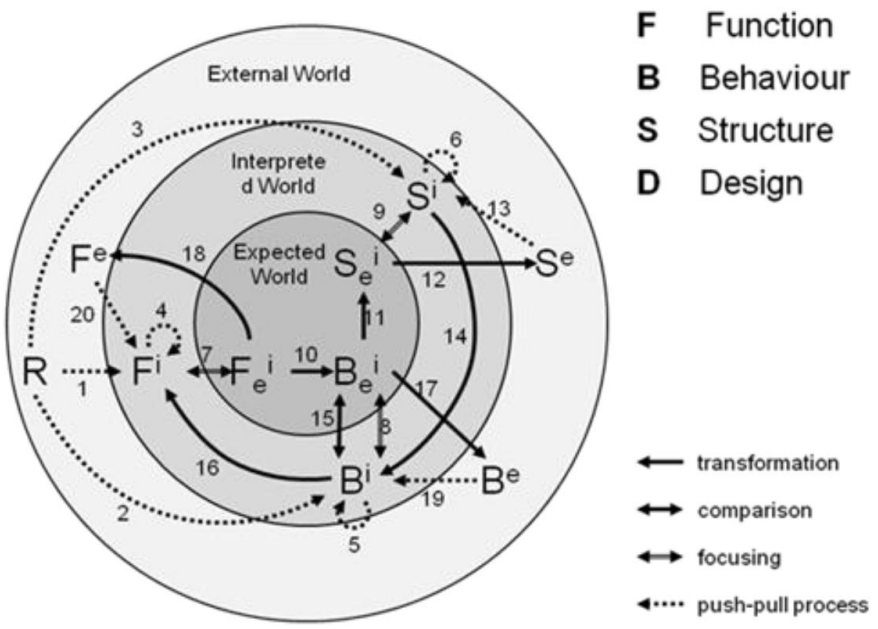


Fig. 8 Mise en situation du cadre d'application de l'approche FBS (Gero & Kannengiesser, The situated function-behaviour-structure framework., 2004).

Par une approche systématique, le concepteur utilisant l'approche FBS commence par la fonction du produit et par conséquent le comportement du système afin de définir la structure

adaptée et donc la conception du produit (Gero & Mc Neill, 1998; Gero & Kannengiesser, 2004).

La méthode FBS propose une approche systématique de la modélisation des produits. Elle divise un système en différents domaines basés sur ses fonctions, sa structure et son comportement. Elle rend donc possible son intégration avec l'Axiomatic Design dans le but de créer une approche adaptée aux besoins des concepteurs. De plus elle est adaptée à la conception de systèmes complexe et, moyennant quelques modifications, pourrait être utilisée pour enrichir les processus de modélisation d'un système. Cependant, notre étude chercher à définir une méthode applicable en phase de conception préliminaire durant laquelle les fonctions et les grands ensembles du système sont définis. Il n'est donc pas possible de suivre les étapes du processus FBS au-delà du comportement attendu du produit. Néanmoins, la logique de boucles entre les différents domaines identifiés du produit (Fonctions, Comportement, Structure) pourrait être réutilisée dans la création d'une méthode applicable en phase de conception préliminaire, dans le but d'aider le concepteur à faire émerger de nouvelles architectures cohérentes. Nous reviendrons sur cet aspect des travaux de recherche au Chapitre 4 : Liaison fonction/Structure.

2.3.3 Theory of Inventive Problem Solving (TRIZ)

TRIZ est un système algorithmique qui a été développé par Genrich Altshuller et ses collègues pendant plus de 50 ans dans l'ancienne Union Soviétique (Altshuller G. , 1984). En étudiant des centaines de milliers de brevets et d'inventions à travers différents champs d'application il a pu définir une théorie qui définit des schémas récurrents propres au processus d'innovation et aux problèmes que ces innovations ont permis de résoudre. A partir de contradictions identifiées dans la réalité ou bien dans des situations irrationnelles ou imprévisibles, la méthode TRIZ permet de résoudre des problèmes et d'accompagner un processus d'innovation. TRIZ est aujourd'hui reconnue comme une méthodologie de résolution de problèmes efficace et permet de guider les concepteurs vers une première ébauche de solution idéale et promouvoir la performance d'un produit en résolvant des contradictions.

La méthode TRIZ est aussi régulièrement associée à d'autres méthodologies de conception dans le but de créer des approches synergiques. Par exemple, L'Axiomatic Design peut être associé avec TRIZ pour améliorer le cadre de la méthode TRIZ et le rendre plus robuste (Kim & Cochran, 2000; Wu, Zhou, & Kong, 2019). En exploitant spécifiquement les outils proposés par TRIZ permettant d'enrichir l'Axiomatic Design, la spécification des Design

Parameters (DPs) peut être affinée. TRIZ peut aussi être associée avec la méthode QFD (Quality Function Deployment) pour améliorer le processus d'innovation en apportant une évaluation de la qualité des concepts émergeants (Caligiana, Liverani, Francia, Frizziero, & Donnici, 2017) ou encore avec la méthode DFSS (Design For Six Sigma) permettant d'intégrer la voix du client final dans le processus de conception et d'innovation.

Si la méthodologie TRIZ peut être un vecteur d'innovation architecturale elle ne répond cependant pas aux problématiques de cette étude en ce qui concerne la gestion de la complexité et la difficulté à conserver la cohérence du produit tout au long du développement. Les principes applicatifs de TRIZ impliquent que le résultat d'application de la méthode est dépendant de la connaissance et de l'expertise de l'utilisateur qui décelera plus ou moins exhaustivement les contradictions ou les incohérences du système étudié ainsi que les solutions innovantes permettant de les résoudre.

2.3.4 Model-Based Systems Engineering (MBSE)

L'INCOSE (INternational COuncil on Systems Engineering) décrit le MBSE comme « *une application formalisée de la modélisation pour supporter la création des exigences du système, la conception, l'analyse, la vérification et la validation des activités qui démarrent en phase de conception préliminaire et continuent au cours du développement jusque dans les phases tardives du cycle de vie* » (INCOSE, 2007). Le MBSE ou Model-Based System Engineering est basée sur l'idée de faire évoluer la conception de systèmes aujourd'hui basée sur des documents vers une conception des systèmes basée sur des modèles, comme son nom l'indique. La logique actuelle est plutôt de concevoir, construire puis tester un produit avant de faire des itérations pour aboutir à un optimum. Un document texte est soumis à interprétation ce qui peut entraîner des erreurs qui se répercutent sur toute la chaîne de production. La communauté scientifique de l'ingénierie système estime que le futur serait de modéliser et tester avant de construire (Do & Cook, 2012). La bonne application du MBSE offre la possibilité de construire un modèle représentatif du système en cours de développement qui servira à tester et analyser de très nombreuses fois le produit avant de lancer la production. Il s'agit d'une méthode cadrée qui s'articule autour de la modélisation exhaustive du système à concevoir et des logiques d'interconnections des composants, des systèmes et des fonctions du produit (Chami & Bruel, A Survey on MBSE Adoption Challenges, 2018). L'évolution générale des produits complexes en systèmes de systèmes met en évidence les limitations des méthodes basées sur les documents dites DBSE (Document-Based Systems Engineering) et renforce

l'intérêt de l'application du MBSE. L'approche offre aussi la possibilité de concevoir des systèmes étant donné qu'il s'appuie sur un jeu de fonctions pour modéliser les contraintes entre les différents composants du système et les lier entre eux. A partir de cette représentation, il est possible de choisir des composants respectant les contraintes et les interactions modélisées.

L'application du MBSE demande une formation importante des ingénieurs, lesquels peuvent opposer une grande résistance au changement. Il s'agit d'une des plus importantes problématiques lors du déploiement du MBSE dans une entreprise aujourd'hui (Chami & Bruel, 2018). L'une des initiatives de l'INCOSE est d'accompagner les entreprises qui souhaitent déployer les outils et méthodes MBSE pour leurs activités. Les entreprises doivent aussi engager un changement global pour intégrer les outils et les bonnes pratiques nécessaires mais aussi engager un processus de digitalisation de leurs données étant donné que la construction des modèles nécessaires à l'application du MBSE demande de nombreuses données de conception. Cela implique aussi un fort engagement tôt dans le processus de conception afin de construire des modèles robustes et exhaustifs qui seront exploitables tout au long du développement. L'intérêt du MBSE est de partager des modèles communs de conception (modèles des exigences et des architectures, modèles de comportement …), ce qui facilite la collaboration des différents métiers/disciplines/partenaires qui utilisent des outils de conception différents. Ces modèles communs assurent la cohérence des flux de données et ainsi des interfaces du système. Par contre, le MBSE ne fournit pas les éléments méthodologiques pour orienter ou structurer la conception du système (ce que permet l'approche énergétique qui sera présentée dans la section suivante, section 4.3.2). Enfin, il n'existe pas d'outil qui fasse aujourd'hui consensus bien que plusieurs logiciels disponibles sur le marché permettent d'appliquer les principes du MBSE.

2.4 METHODOLOGIES DE CONCEPTION BASEES SUR UNE APPROCHE ENERGETIQUE

Un des constats de l'étude du cycle de développement du produit aéronautique est la décorrélation entre les différentes vues du produit, notamment les vues fonctionnelle, physique et industrielle. Le point de départ de la conception d'un produit est d'identifier les fonctions attendues de celui-ci. Une fonction est définie comme un processus, une action ou une tâche à travers lequel un système transforme un élément de base tel qu'un matériau, une énergie ou un signal en un autre élément par le biais d'une ou plusieurs entités (Barker & Longman, 1992). Cette définition est utilisée pour exprimer les fonctions attendues du produit à différents niveaux d'abstraction, des fonctions globales au niveau macroscopique et des fonctions plus

restreintes au niveau des composants élémentaires (Pahl, Beitz, Feldhusen, & Grote, 2007; Stone & Wood, 2000). Celles-ci vont borner la conception du système et permettre de construire la vue physique du produit à l'issue d'une série de phases de génération de solutions divergentes/convergentes jusqu'à aboutir à un optimum global. Enfin, le système industriel doit être mis en place pour lancer la production du système conçu, nécessitant la création d'une vue industrielle du produit ayant pour but d'assembler les composants définis dans la vue physique. Ces différentes vues ne sont pas corrélées, c'est-à-dire par exemple qu'une modification du système industriel n'implique pas une modification des vues fonctionnelles et physiques. Les différentes vues évoluent donc indépendamment les unes des autres en divergeant nécessairement au fur et à mesure du cycle de développement. Les différents acteurs du cycle de développement sont alors gênés dans leur collaboration étant donné que la cohérence globale du produit n'est pas garantie et qu'ils n'étudient donc pas le même système. Maîtriser la transition du domaine physique au domaine fonctionnel facilitera la collaboration entre les architectes et les centres de compétences avec lesquels ils interagissent durant la conception et l'industrialisation du produit. Cela renforcera la cohérence globale du processus de conception.

Un point commun aux différentes phases du cycle de vie du produit est la gestion des flux d'énergie qui le traversent. Le domaine fonctionnel décrit les transformations des flux d'énergie requis pour remplir les fonctions attendues du produit. Le domaine physique quant à lui définit les composants qui transforment effectivement ces flux d'énergie, formant le système décrit par les fonctions exprimées précédemment. Finalement, la nature des flux d'énergies qui circulent entre les composants détermine les opérations nécessaires à l'assemblage du produit final. Il existe des approches énergétiques dans la littérature qui pourraient nous permettre d'approcher la conception d'un système complexe par cet axe. Il existe des modèles comme le « bond graph » (Paynter, 1961; Borutzky, 2010) et le « four-pole/multi-pole » (Oppelt, 1972) qui ont des domaines d'applications restreints. Le modèle « bond graph » est utilisé pour décrire un système à partir d'un produit existant, donc de la rétro conception. Sans produit de départ connu, le modèle « bond graph » est inefficace. Le modèle « four-pole/multi-pole » est particulièrement utilisé pour les systèmes électriques, de contrôle et d'acoustique et décrit le comportement dynamique d'un système qui transmet de la puissance (Oppelt, 1972). De fait, ce modèle est utile pour décrire le comportement d'un système mais n'aborde pas le lien entre les exigences fonctionnelles et la structure physique du produit étudié.

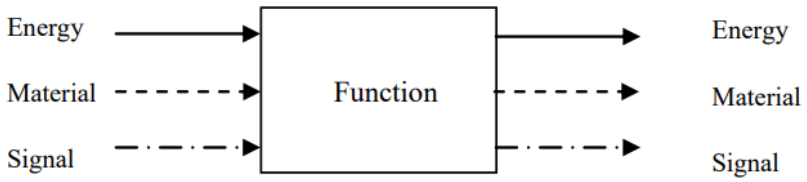


Fig. 9 Modèle boîte noire

Les travaux de 2016 de Malmiry (Malmiry R. B., 2016), eux aussi inspirés par une approche énergétique, cherchent à décrire un système industriel en y intégrant des indicateurs de coût par l'utilisation d'un second modèle complémentaire, le « Function Behavior Structure » ou FBS (Gero, 1990). Ce modèle est alors utilisé pour identifier les paramètres liés au flux d'énergie principal du système et à les assigner aux différents composants physiques et fonctionnels. En utilisant le « Characteristics-Properties Modelling » ou CPM (Weber C. , 2007), il est alors possible de récupérer les propriétés des entités élémentaires du système qui sont liées aux caractéristiques principales de celui-ci. En y associant les coûts et les tolérances de production, le coût, la productivité et le risque de chaque étape de l'assemblage peuvent être évalués (Malmiry R. B., 2016). L'approche de Malmiry a pour objectif final de caractériser le système industriel par des critères de coûts et le déroulement de la méthode jusqu'à ce que le niveau de détail nécessite l'étude d'un système existant. Elle pourra donc au moins en partie servir d'inspiration pour le développement d'une méthode énergétique applicable en phase de conception préliminaire. Parmi les méthodes permettant une description du système industriel, le CDfA propose une approche énergétique du problème (Favi & Michele, 2012) et a été conçu pour être appliqué durant la phase de conception préliminaire ce qui en fait un bon candidat pour être complémentaire avec l'approche CTOC dans le but d'évaluer la performance industrielle des architectures candidates.

2.4.1 Modèle CTOC

Un modèle d'approche énergétique propose par Pailhes et al. en 2007 appelé modèle CTOC (Converter, Transmitter, Operator, Control) a spécifiquement pour but d'aborder la transition du domaine fonctionnel au domaine physique d'un système (Pailhes, Sallaou, & Nadeau, 2007). Ce modèle est basé sur l'observation selon laquelle différentes natures de flux d'énergie d'entrées/sorties peuvent être agrégées en un seul flux d'énergie qu'il est possible de relier aux différents paramètres physiques du système. Par exemple, un flux de signal sera transporté sous formes d'ondes ou d'impulsions électriques, un flux de matériel sera vu comme des formes mécaniques ou cinétiques (Malmiry R. B., 2016).

La seconde proposition du modèle CTOC est basée sur les travaux d'Altshuller, plus spécifiquement la méthode TRIZ (Altshuller G. , 1984). Le système est décomposé en entités spécifiques qui permettent au concepteur de se concentrer sur le jeu de fonctions juste nécessaires à la description du système étudié : Convertir, Transmettre, Opérer et Contrôler. Comme illustré sur la Fig. 10, Le flux d'énergie associé à la fonction étudiée traverse ces entités et décrit le chemin énergétique minimum pour remplir la fonction. Dans le but de représenter le système de façon exhaustive, ces entités peuvent être liées à une référence externe commune (par exemple le sol) ou interne (par exemple la main de l'utilisateur). Des composants d'interaction peuvent être utilisés pour représenter des éléments de jonctions ou pour lier une entité à la référence.

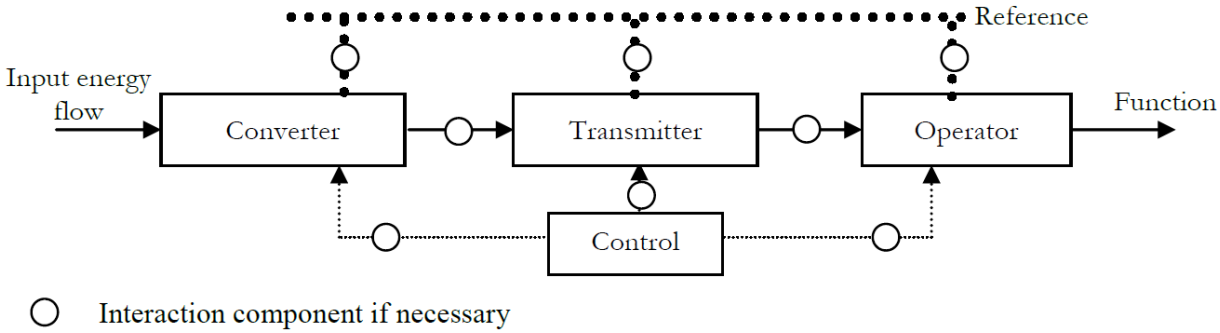


Fig. 10 Vue énergétique de la loi TRIZ d'intégralité des parties d'un système (modèle CTOC) (Pailhes, Sallaou, & Nadeau, 2007).

L'approche CTOC est intéressante pour ces travaux de recherche pour deux raisons. La première est qu'elle est applicable durant la phase de conception préliminaire, juste après l'identification des fonctions externes du produit. La seconde est que les propositions de cette méthodologie sont de se concentrer sur un flux d'énergie principal et une représentation minimale suffisante pour décrire le système pour associer des composants fonctionnels avec des composants physiques. Cette modélisation peut aider à mettre en avant les solutions de conception potentielles en décrivant la façon de remplir une fonction. Une fois les domaines fonctionnels et physiques liés, il est plus facile d'imaginer des alternatives de conception remplissant les mêmes fonctions et/ou agrégeant des composants. Dans la suite de ce manuscrit, nous appliquons la méthode CTOC à un système complexe remplissant de nombreuses sous-fonctions de l'avion, ce qui peut être considéré comme un système de systèmes, avec une organisation industrielle complexe. Cependant, cette méthode n'a pas été appliquée à des produits complexes mettant en jeu autant de flux d'énergie que dans notre exemple, ce qui nécessite d'en valider l'applicabilité à un produit tel qu'un aéronef. Finalement, la partie

Contrôle de cette modélisation n'a pas été développée dans la littérature, il conviendra donc d'étudier cet aspect spécifique de l'approche lors de l'application.

2.4.2 Concurrent designing ou conception intégrée

Dans le paradigme de développement classique d'un produit, la fabrication est une conséquence de la conception, les deux domaines étant des départements séparés. Cette séparation, voire parfois cet isolement, mène à un processus de développement long et coûteux. Dans les approches traditionnelles, l'implication du département de production a lieu alors que 75% du coût final du développement est déjà engagé (voir Fig. 11). La découverte de difficultés lors de l'industrialisation du produit peut forcer le concepteur à reconcevoir le produit et/ou le système industriel, relançant des cycles de conception itératifs jusqu'à définir un optimum global satisfaisant. C'est à la suite de ce constat, généralement exacerbé par les montées en cadences des industriels et par une autocritique de leurs développements passés, que le principe Concurrent Designing, ou conception intégrée, fut introduit.

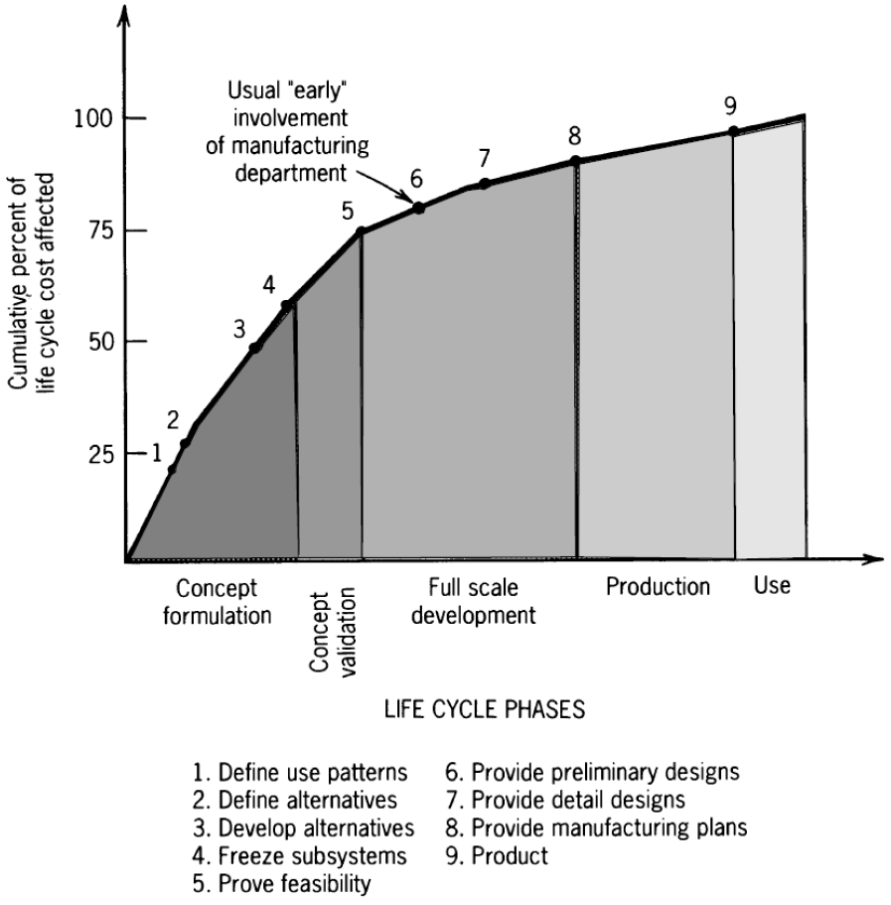


Fig. 11 Phases du cycle de vie (Liu & Yang, 2001)

Dans la littérature, beaucoup de termes ont été utilisés pour décrire des approches similaires à la conception intégrée tels que « Integrated Product/Process Design » (IPPD), « Integrated Product and Process Design and Development » (IP^2D^2) (Magrab, Gupta, Mccluskey, Sandborn, & Group, 2010), conception simultanée (simultaneous design) ou encore fusion de conception (design fusion) (Fox, et al., 1992). Des concepts proches ont aussi été développés « comme le Design for Manufacturing » (DfM) et le Design for Assembly (DfA) que nous détaillerons plus loin dans le document (Voir paragraphe 2.5.2). Cette section est une vue générale de ces méthodes et concepts qui a pour but de borner le domaine de la thèse mais ne propose pas une étude approfondie ou exhaustive de la conception intégrée.

2.4.2.1 Integrated Product and Process Design (IPPD)

Tel que décrit par Magrab et al. (2010) dans l'ouvrage « Integrated Product and Process Design and Development » (IP^2D^2), les objectifs globaux d'une équipe IP^2D^2 sont les suivants :

- Amélioration de la satisfaction client.
- Minimiser les coûts de production tout en maximisant le profit.
- Raccourcissement du Time-to-market, la durée de mise en service d'un produit conçu.
- Niveau de qualité élevé.
- Réduction des coûts de développement du produit.
- Rentabilité de l'usine élevée avec un minimum de modifications à la volée.
- Minimiser les espaces de production, la logistique et l'inventaire des matières premières et produits finis.
- Utilisation plus importante de l'automatisation et rentabilisation du matériel existant.
- Suppression des reconceptions et modification du design.
- Elargissement de la gamme de produits, avec notamment plus de variété.
- Implication précoce des fournisseurs.

Ainsi, l'objectif final est la « productibilité » qui décrit la facilité de production d'un système par le biais des facteurs suivants :

- La Conception, de la première à la dernière phase de conception du produit et de son système industriel.

- La Planification et la satisfaction des besoins clients en logistique, vente et service après-vente.
- La Qualité incluant les huit dimensions proposées par (Garvin, 1987).
- Le Coût incluant les coûts de produits, les frais généraux et les coûts indirects, les couts cachés, les coûts de conception et de production, et les frais de maintenance.

Le produit et son système industriel sont fortement liés et doivent donc être conçus de façon collaborative. La Table 3 ci-dessous illustre les facteurs de conception à prendre en compte dans l'élaboration du produit et des procédés de fabrication/assemblage associés. Certains éléments se recoupent et des exigences du produit sont satisfaites par le système industriel, et inversement. Cette façon de modéliser le produit et son système industriel ainsi que leur intrication par le biais d'exigences est à la base du Concurrent Designing.

De nombreux exemples dans la littérature confirment les avantages du Concurrent Designing et décrivent les outils qu'il est possible de coupler à ce concept (Giudice, Ballisteri, & Risitano, 2009) (Badhrinath & Rao., 1996) (Chang, Silva, & Bryant., 1999) (Hsiao, 2002). Ces outils permettent partiellement de résoudre un des problèmes identifiés par les concepteurs à savoir l'implémentation des principes du Concurrent Designing dans le paradigme de conception classique qu'ils connaissent décrit plus tôt.

Table 3 Les facteurs de conception du produit et de son système industriel (Magrab, Gupta, Mccluskey, Sandborn, & Group, 2010).

Product Design	Process Design
Function, usability	Responsiveness
Performance characteristics	Delivery date to customers
Environment	Packaging and shipping
Features	Adaptability to variability in materials and process conditions
Technology/innovation required	Integration of new process technology into existing system with minimum disruption and cost
Analysis and simulation	Maximum responsiveness to surges in demand
Prototypes	Minimum changeover time and cost
Producibility	Maximum production flexibility
Material selection	Quick turnaround capability
Manufacturing methods	Maximum product family
Handling and presentation	Design-dependent
Fabrication/assembly	Assembly methods
Number of parts and part variation	Waste
Documentation/engineering drawings	Manufacturing methods
Human factors/ergonomics	Materials
Appearance and style (aesthetics)	Factory characteristics
Configuration	Material handling and flow
Modularity	Work station design (ergonomics)
enhancements	Manufacturing equipment capabilities and Reliability
Degree of standardization	Floor layout
Reliability	Plant location
Patents	Safety
	Training of factory personnel
	Waste management
	Production
	Quality control
	Capacity/production rate
	Production planning, scheduling, and purchasing
	Transition into production of existing products
	Outsourcing of parts and subassemblies
	Suppliers
	Documentation

Un aspect de l'IPPD est le « Material Design », ou conception des matériaux, et son intégration dans le développement du couple produit/système industriel. Cette discipline inclue la sélection des matériaux qui est une étape du choix de solution nécessaire à l'atteinte des performances du système à concevoir (Ashby, Bréchet, Cébon, & Salvo, 2004), à la conception intégrée de matériaux et structures dans une modélisation multi-échelles (McDowell & Olson, 2009) et à l'intégration de matériaux (McDowell, et al., 2010). Un autre aspect de l'IPPD est la prise en compte de critères commerciaux issus des marchés (Andreasen., Integrated Product Development, 1987) (Andreasen., 1994) (Andreasen, Hansen, & Mortensen, 1996) (Godot, 2013). Ces aspects de l'IPPD (Conception des matériaux et critères commerciaux) ne sont pas détaillés dans cette thèse car non pertinents pour l'étude.

La littérature propose plusieurs exemples d'applications de l'IPPD sur des systèmes que l'on peut considérer comme complexes ou présentant des complexités de conception. Wang & Wright (Wang & Wright, 1996) proposent une version de l'IPPD pour la conception de pièces électromécaniques où les départements de conception mécanique et électriques doivent se

coordonner et coopérer et où les outils de CAO doivent être intégrés. D'autres exemples d'applications incluent la conception d'un transporteur civil à rotors basculants (tiltrotor) (Mavris, Baker, & Schrage, 1997), la conception et l'optimisation d'un moteur d'avion (Chang, Silva, & Bryant, Concurrent Design and Manufacturing for Mechanical Systems., 1999), la conception d'un banc de test pour radio Pico (Odell & Wright, 2002), la conception d'ordinateurs portatifs (Finger, Konda, & Subrahmanian., 1995) et la conception et l'implémentation de centrale solaires thermodynamiques de Fresnel (Malmiry & Perry, 2013). Dans cette thèse **(**Chapitre 4 : Liaison fonction/Structure et

Chapitre 5 : Intégration de critères de performance industrielle**)**, l'étude d'un aéronef est réalisée pour modéliser les vues fonctionnelle, physique et industrielle du système. Un aéronef est un système extrêmement complexe car il présente de très nombreuses sources de complexité différentes, l'étude se concentrera donc sur les niveaux d'abstraction supérieurs du produit pour traiter les grands sous-ensembles de celui-ci. Cela représente un bon exemple d'application car il démontrera la capacité de la méthode proposée à modéliser un produit complexe tout en ne dépassant pas un niveau de complexité critique nécessitant des outils numériques.

2.4.2.2 Concurrent engineering

Le Concurrent Engineering (CE) est un concept qui ne doit pas être confondu avec le Concurrent Designing (Conception Intégrée). La Conception Intégrée est un sous-ensemble du Concurrent Engineering. Le CE a une approche opérationnelle et inclut les considérations de l'entreprise. C'est une approche qui se concentre sur la réduction du lead time et l'amélioration de la qualité par l'intégration des différents processus liés au cycle de vie du produit tel que la planification, la conception, la production, la livraison, l'exploitation et la fin de vie du produit (Prasad, 1996). La figure suivante (Fig. 12) illustre l'application de cette approche à une entreprise intégrant un système de production. Cela permet de donner un cadre pour l'ensemble du processus de conception selon différents points de vue. Le CE peut être considéré comme une vision globale dont la Conception Intégrée est une partie (Parsaei & Sullivan, 1993).

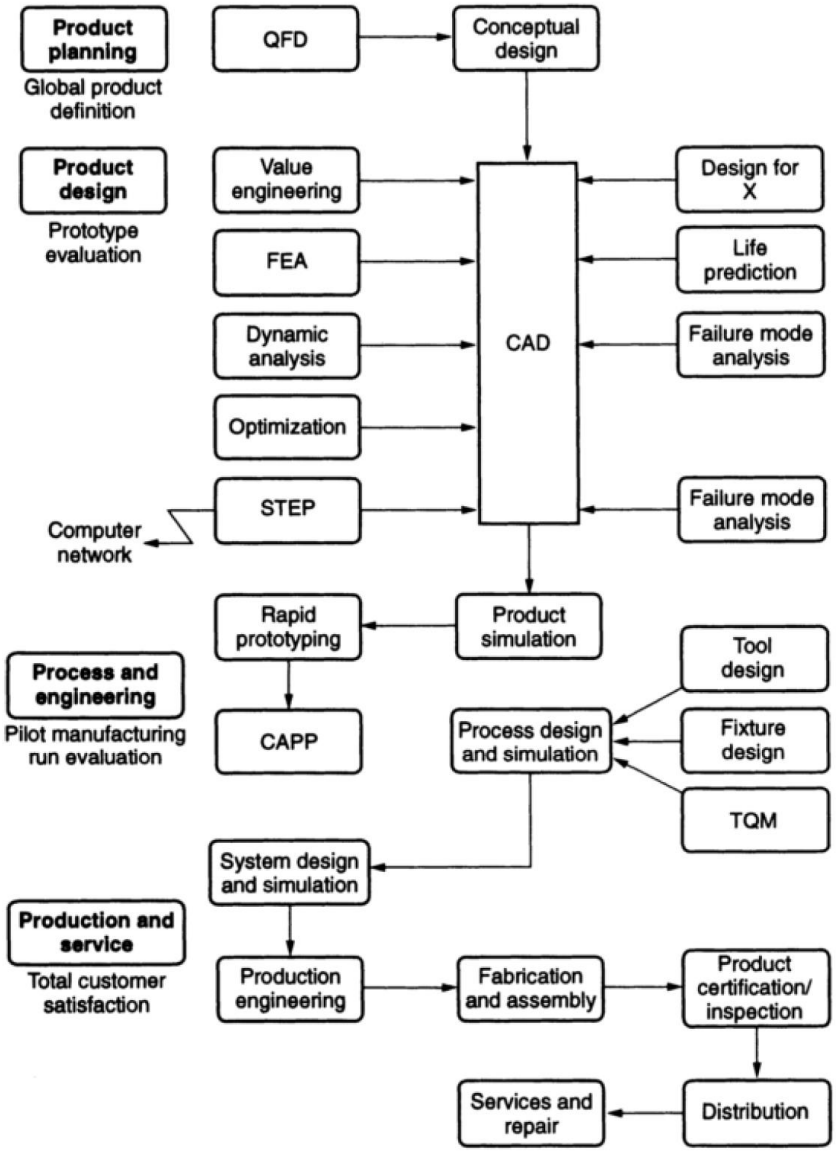


Fig. 12 Systematic concurrent engineering (Wang B. , 1997)

L'objectif du CE est d'être réactif par rapport aux évolutions du marché. La réactivité se mesure par deux critères : La capacité à répondre aux demandes du marché en raccourcissant le cycle de production et la capacité à répondre aux opportunités du marché en raccourcissant le cycle de développement du produit. La réactivité est une caractéristique clé de la réussite d'une entreprise (Wang B. , 1997).

L'objectif est de créer un lien entre la conception du produit, les méthodes et la fabrication du produit. La création d'un tel lien couplé à des méthodes de conception intégrée permettrait d'impliquer les équipes manufacturing dès les phases de conception préliminaire, très tôt dans le processus de conception du produit. Les coûts de conception, qui représentent environ 70% des coûts de développement du produit, seraient réduits et le développement du produit serait plus rapide.

Ces travaux de recherche s'inscrivent dans une approche de concurrent engineering, l'objectif final étant de proposer une méthode applicable au contexte aéronautique, en phase de conception préliminaire, permettant de répondre aux problématiques des architectes. Ces derniers sont en interfaces avec de nombreux acteurs du cycle de développement du produit. Ils ont donc nécessairement besoin de méthodes et d'outils collaboratifs permettant d'impliquer dès que possible différents centres de compétence et de prendre en compte leur besoin dans la définition d'une architecture globale cohérente. Ces travaux se concentrent sur la création d'un lien entre la conception préliminaire (domaine fonctionnel), la conception détaillée (domaine physique) et l'assemblage (domaine industriel) d'un système complexe. Cette analyse de la littérature nous permet d'explorer les méthodes existantes afin de définir s'il convient d'adapter des méthodologies existantes ou d'en développer une nouvelle.

2.5 DESIGN FOR X

2.5.1 Design for X (DfX)

Comme expliqué plus tôt, la manufacturabilité est l'une des préoccupations principales de l'IPPD. L'approche spécifique consistant à concevoir un produit en prenant en compte sa manufacturabilité s'appelle le Design for Manufacturing (DfM). Une approche voisine, le Design for Assembly (DfA), met en jeu les contraintes d'assemblage dans le processus de conception. Enfin, le Design for X (DfX) est un nom générique donné à la famille de méthodologies de conception ayant un objectif prédéfini. Le X représentant une propriété spécifique telle que le coût, la qualité, le lead time, l'efficacité, etc… ou une phase du cycle de vie du produit telle que la production, l'assemblage, etc. (Huang, 1996) (Tichem, 1997).

L'objectif du DfM est d'introduire le critère de productibilité tôt dans le processus de conception afin de minimiser le lead time et les coûts de développement tout en conservant la satisfaction des besoins clients (Liu & Yang., 2001). La satisfaction client implique de respecter les performances, la qualité, les délais de livraisons, les services et l'esthétique du produit (Garvin, 1987).

De nombreuses études ont été réalisées à ce sujet, plusieurs d'entre elles présentent le concept du DfM, ses avantages et ses applications (Boothroyd, Product design for manufacture and assembly, 1994; Kuo, Huang, & Zhang, 2001; Nowak, et al., 2004; O'Driscoll, 2002). Certains se sont concentrés sur les stratégies d'implémentation du DfM dans différentes stratégies de conception (Swift & Booker, 2003), D'autres ouvrages traitent de la sélection des méthodes et matériaux à partir d'une classification des méthodes et une sélection d'attributs

pertinents (Ashby, Bréchet, Cébon, & Salvo, 2004; Edwards, 2003; Lovatt & Shercliff, 1998; Swift & Booker, 2003).

2.5.2 Design for Assembly (DfA)

Le Design for Assembly (DfA) est tout aussi intéressant que le DfX dans le cadre de la conception intégrée. Pour la plupart des produits, l'opération d'assemblage est inévitable en raison des mouvements relatifs des composants, des différences de matériaux, des stratégies de production des sous-composants, des possibilités de maintenance ou d'amélioration, de la différenciation des fonctions, des contraintes d'accessibilité et des critères de coût (Boothroyd & Alting, 1992). L'objectif du DfA est de réduire le nombre de composants qui nécessitent d'être assemblés, d'assurer une facilité d'assemblage des composants et de réduire le coût total tout en satisfaisant les exigences fonctionnelles du produit final (Selvaraj, Radhakrishnan, & Adithan., 2009). Plusieurs articles et ouvrages traitent de ce sujet et proposent des exemples d'applications (Andreasen, Kähler, & Lund, 1988; Boothroyd & Alting, 1992; Boothroyd & Dewhurst, 1984; Redford, 1994).

L'approche DfA se concentre sur la conception par des contraintes d'assemblabilité tandis que le DfM a une approche plus générale de la conception intégrée. Cependant, les deux approches partagent la même philosophie, à savoir remettre en question la conception du produit à partir de contraintes de conception ou d'exigences liées au système industriel. Une interconnexion est nécessaire pour concevoir simultanément le couple produit/système industriel à différents niveaux d'abstraction.

2.5.3 Conceptual Design for Assembly (CDfA)

Les méthodes dites de « Design for Assembly » (DFA) ont été développées dans les années 80 et sont aujourd'hui bien connues et couramment utilisées dans l'industrie (Zha, Du, & Qiu, 2001; Boothroyd, Dewhurst, & Knight, Product Design for Manufacture and Assembly, 2002). Cependant, ces méthodes sont laborieuses à déployer et ne sont souvent pas applicables avant d'atteindre les étapes avancées du processus de conception ou sur des systèmes existants dans le cadre d'un retro engineering ou d'une campagne d'optimisation de produit.

Pour résoudre cette limitation, Stone et McAdams ont présenté une méthode intéressante basée sur une approche modulaire du système (Stone, Wood, & Crawford., 2000) dans laquelle le concepteur utilise la définition de la structure fonctionnelle du produit dans le but d'analyser les caractéristiques d'assemblabilité. Cette définition étant disponible tôt dans le

développement d'un système, l'approche permet l'application des techniques de DfA dès la phase de conception préliminaire.

La méthode de « Conceptual Design for Assembly » ou CDfA a été développée par Claudio Favi (Favi & Michele, A method to optimize assemblability of industrial product in early design phase: from product architecture to assembly sequence., 2012) et optimise l'assemblage d'une architecture modulaire à partir d'une approche énergétique. Comme l'auteur l'explique, cette méthode ne peut être appliquée que sur des produits modulaires. Récemment, le CDfA a été utilisé pour identifier des modifications potentielles de l'architecture d'un produit dans le but d'en améliorer les performances industrielles. Cette utilisation détournée de la méthode a été faite en considérant les modules fonctionnels du produit et leurs interactions.

2.6 CONCLUSION

En début de chapitre, nous avons présenté les critères de notre recherche d'un ensemble de méthodes adaptées à l'étude. Pour rappel, nous cherchons des méthodes applicables sur un produit non existant, en phase de conception préliminaire et permettant de modéliser et maîtriser la transition de la vue fonctionnelle à la vue physique du produit. Elles devront permettre la prise en compte de critères de conception liés à la performance industrielle du produit. Enfin, elles devront favoriser la collaboration au cours du cycle de vie du produit, assurer la traçabilité des choix de conception et favoriser la créativité et l'innovation lors de la phase de conception architecturale.

L'étude de la complexité dans le contexte de ces recherches a permis d'établir le fait que la problématique principale de la conception des systèmes complexes se traduit par leur nature multi-échelles. Les systèmes de systèmes sont composés de nombreux composants interconnectés à différents niveaux d'abstraction du produit ce qui rend leur modélisation et leur conception difficile. Cela a permis de mettre en avant un autre critère de choix des méthodes candidates pour cette étude : la capacité à représenter un système multi-niveaux et à évoluer dans les différents niveaux d'abstraction de la représentation obtenue.

La littérature propose de nombreuses méthodologies de conception répondant à des problématiques variées et certaines d'entre elles répondent en partie aux critères de choix énoncés. Il apparait que les méthodes permettant de lier les différentes vues du produit au cours du développement semblent être les plus à même de répondre aux besoins de cette étude et

certaines méthodes énergétiques peuvent permettre d'atteindre cet objectif. L'approche MBSE est intéressante de par le cadre robuste qu'elle propose pour les concepteurs et les entreprises mais deux critères nous empêchent d'approfondir cette approche. Tout d'abord, cette étude se concentre sur la phase de conception préliminaire et les problématiques associées à cette étape du développement d'un produit, phase durant laquelle le MBSE ne peut pas pleinement exprimer sa valeur ajoutée. Aussi, la bonne application du MBSE nécessite un changement profond de l'entreprise et des méthodes de gestion des données digitalisées qui justifierait d'une étude à part entière. Deux méthodes identifiées, le CTOC et le CDfA, sont basées sur une approche énergétique et proposent respectivement de lier les vues fonctionnelle et physique du produit et d'intégrer des critères d'évaluation de la performance industrielle en phase de conception préliminaire. Ces deux méthodes semblent correspondre aux critères de choix énoncés à l'exception de leur applicabilité à des systèmes complexes. En effet, la littérature ne propose que des exemples d'application sur des systèmes assez simples, il est donc probable que leur application à des systèmes complexes nécessite des développements spécifiques. La suite de l'étude propose une analyse approfondie du contexte de l'étude qui permettra d'identifier les verrous scientifiques, de préciser les axes de recherche et d'énoncer des propositions de recherche.

3. CHAPITRE 3 : PROPOSITIONS SCIENTIFIQUES

3.1 DESCRIPTION DE LA DEMARCHE

Dans le chapitre précédent, analyse de la littérature, nous avons décrit le contexte de ces travaux de recherche visant à définir une méthodologie d'architecture. Celle-ci doit permettre aux architectes de renforcer l'aspect collaboratif du travail d'architecture mais aussi d'évaluer des architectures candidates en termes de performances industrielles.

Afin de proposer des axes de recherche cohérents avec les besoins des architectes, il est nécessaire de les identifier précisément au préalable. C'est pourquoi, dans ce chapitre, nous allons commencer par définir la connaissance (§ 3.2.1) et les moyens utilisés pour la capturer (§ 3.2.2). L'objectif est de réussir à capturer les besoins et limitations des architectes et de leurs outils et méthodes. Nous expliquerons ensuite comment cette connaissance une fois capturée sera élicitée puis analysée afin d'être formalisée et permettre d'isoler des axes de recherche pertinents (§ 3.2.3). Ces derniers seront alors détaillés afin de borner avec exactitude les ambitions de la thèse présentée ici et les verrous scientifiques qu'elle cherche à lever (§ 3.3.1). Enfin, nous proposerons des solutions à ces verrous qui seront validées ensuite par une application concrète (§ 3.3.2 et § 3.3.3).

3.2 CAPTURE, ELICITATION ET ANALYSE DE LA CONNAISSANCE

3.2.1 Gestion de la connaissance (Knowledge Management)

Toute connaissance possède une part tacite et une part explicite (Grant, 2007). La connaissance tacite est personnelle et spécifique à un contexte. En pratique il s'agit de connaissances acquises par expérience ou apprentissage, possédées par des individus ou des groupes de personnes. Elle est complexe à formaliser et à communiquer (Polanyi, 2009). La connaissance explicite peut se transmettre par un langage formel, systémique (Polanyi, 2009). Une partie de la connaissance tacite, lorsqu'elle est formalisée (sous forme écrite ou orale par exemple) devient explicite. Le format de capture de connaissance a une incidence sur le ratio de connaissance tacite/explicite récoltée. En effet, de la connaissance formalisée par des équations, des formules, des règles systémiques sont particulièrement explicites. A l'inverse, une transmission orale, schématisée ou vulgarisée de la connaissance peut être soumise à interprétation, dépendante du langage ou encore ne pas être absolument exhaustive, conservant une partie de la connaissance sous forme tacite. Certains types de connaissances sont adaptés à certains formats de transmissions de connaissance et il n'est donc pas toujours possible

d'utiliser toutes les méthodologies disponibles. Dans le but de définir nos axes de recherche, il nous est nécessaire de s'intéresser à l'ensemble de la connaissance visée, identifier la part de connaissance tacite et la part de connaissance explicite pour finalement formaliser autant que possible la connaissance tacite afin de la rendre explicite. Ce processus s'appelle l'élicitation de la connaissance. Qu'elle soit tacite ou explicite, il existe trois types de connaissance d'après Milton (Milton, 2007): Conceptuelle, Procédurale et Appliquée.

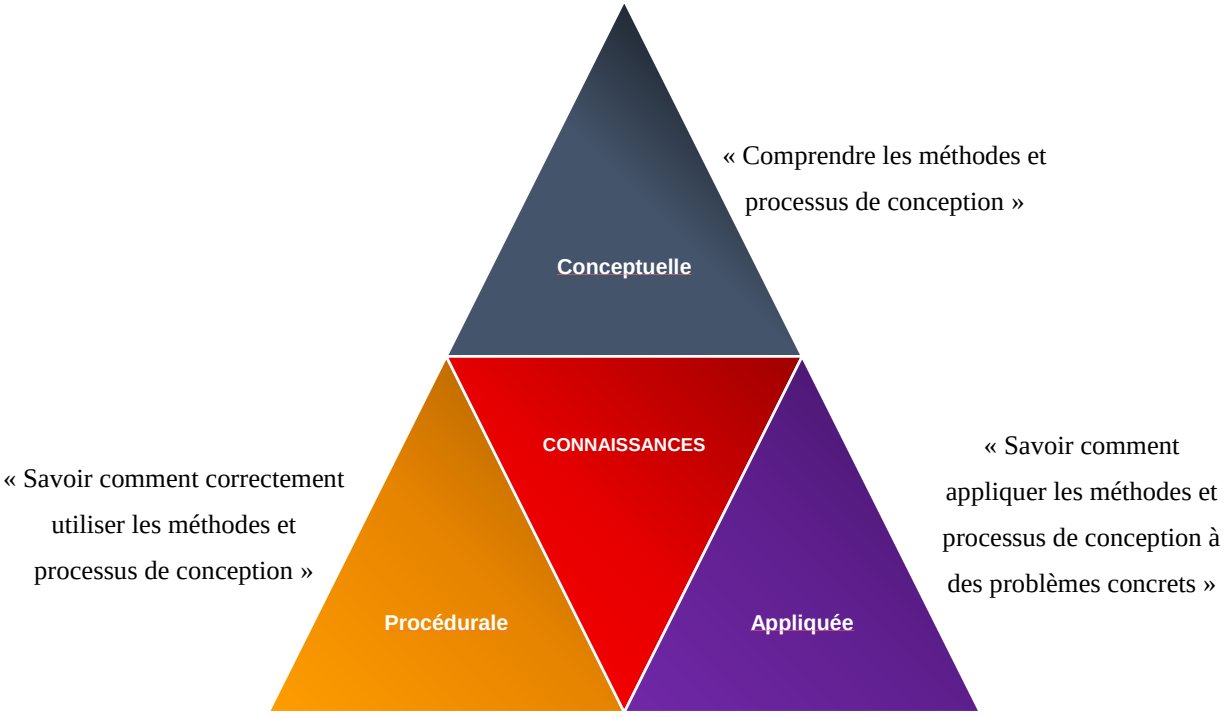


Fig. 13 Représentation des trois types de connaissance (Milton, 2007)

Dans ses travaux, Milton (Milton, 2007) a établi une classification des méthodes de capture de connaissance en fonction des objectifs de l'utilisateur et de la nature des connaissances à capturer. Certaines méthodologies de capture de connaissance permettent en effet de récolter des parts plus ou moins importantes de connaissance tacite et explicite, allant de la connaissance procédurale à la connaissance conceptuelle. Etant donné que nous cherchons à comprendre l'environnement global d'architecture industrielle, tous les types de connaissances sont précieux. Il est cependant préférable de privilégier la récolte de connaissances explicites afin de faciliter le travail de post-traitement, c'est pourquoi nous nous orientons vers les méthodes capturant une plus grande part de connaissance explicite que tacite. La part de connaissance tacite qui pourrait être capturée sera formalisée autant que possible dans le but de maximiser la part de connaissance explicite, dont il est possible de faire des représentations afin de l'exploiter plus simplement.

D’après la Fig. 14, la méthode permettant de capturer principalement de la connaissance explicite et couvrant les différents types de connaissances est l’Interview Structurée ou Interview semi-structurée. Cela s’explique par le fait que la nature de l’information récoltée dépend principalement des questions préparées et de la capacité ou non à produire un échange ouvert pendant l’interview. Il s’agit des techniques d’interview classiques couramment utilisées au début d’un projet pour capturer les connaissances élémentaires sur un sujet. Ces techniques aident à comprendre les activités principales et les problèmes inhérents à un domaine mais aussi de mieux connaitre les acteurs de ce domaine par la création d’un dialogue avec eux. Cette méthode est donc adaptée à notre besoin de récolte d’information mais elle nécessite une préparation attentive des questions et du déroulement des interviews afin d’éviter les biais connus de cette méthode. Etant donné que nous cherchons à établir un dialogue, nous nous orientons vers la méthode d’interview semi-structurée, privilégiant les questions ouvertes laissant plus de liberté à l’interlocuteur de s’exprimer. Les autres méthodes de récolte de connaissances sont moins adaptées à notre besoin étant donné qu’elles ne couvrent pas tous les types de connaissances et ont tendance à récolter une part plus importante de connaissance tacite (que l’on cherche à minimiser). En effet, le domaine de recherche est vaste et les interlocuteurs potentiels présentent des compétences très variées ce qui complexifie la tâche de récolte de connaissances étant donné qu’elle est peu bornée. L’utilisation de la méthode d’interview semi-structurée a le double avantage de permettre de récolter tous les types de connaissances. De plus, le questionnaire pourra évoluer au fur et à mesure de la compréhension du domaine de recherche pour mieux cibler les connaissances pertinentes pour le sujet.

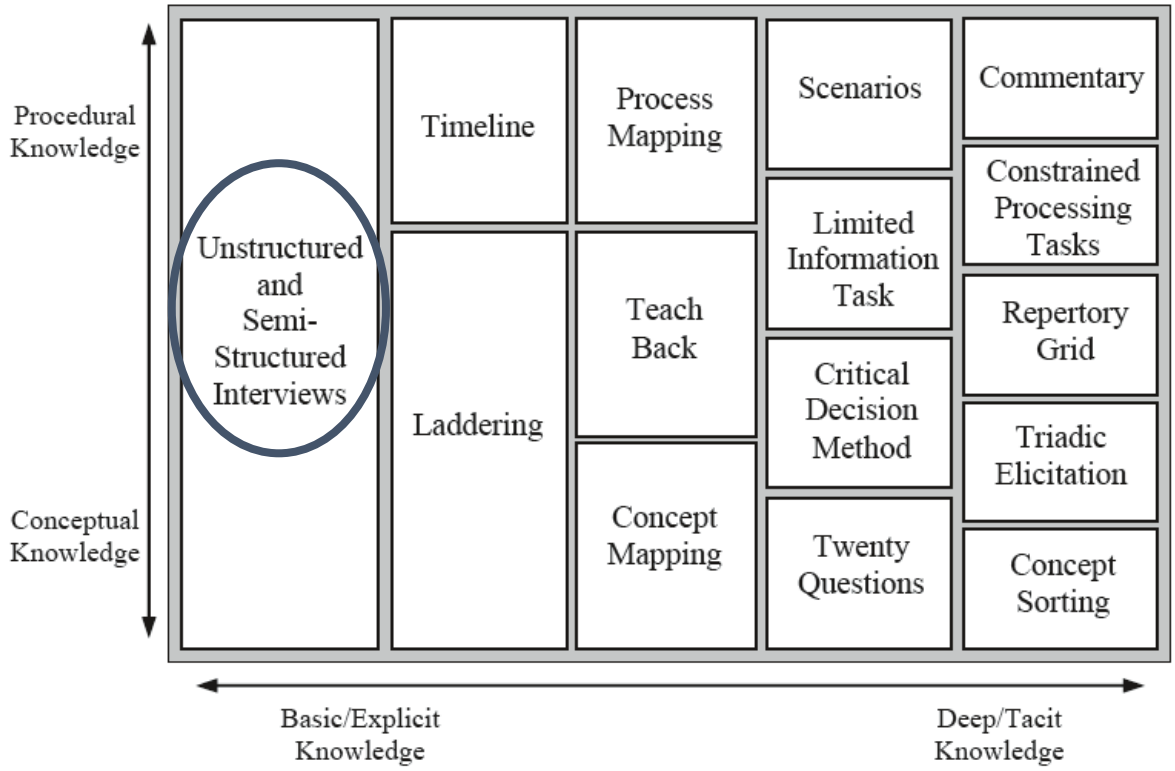


Fig. 14 Techniques utilisées dans la capture des différents types de connaissances (Milton, 2007).

3.2.2 Processus de capture de la connaissance

3.2.2.1 Description de la méthode d'Interview Semi-Structurée

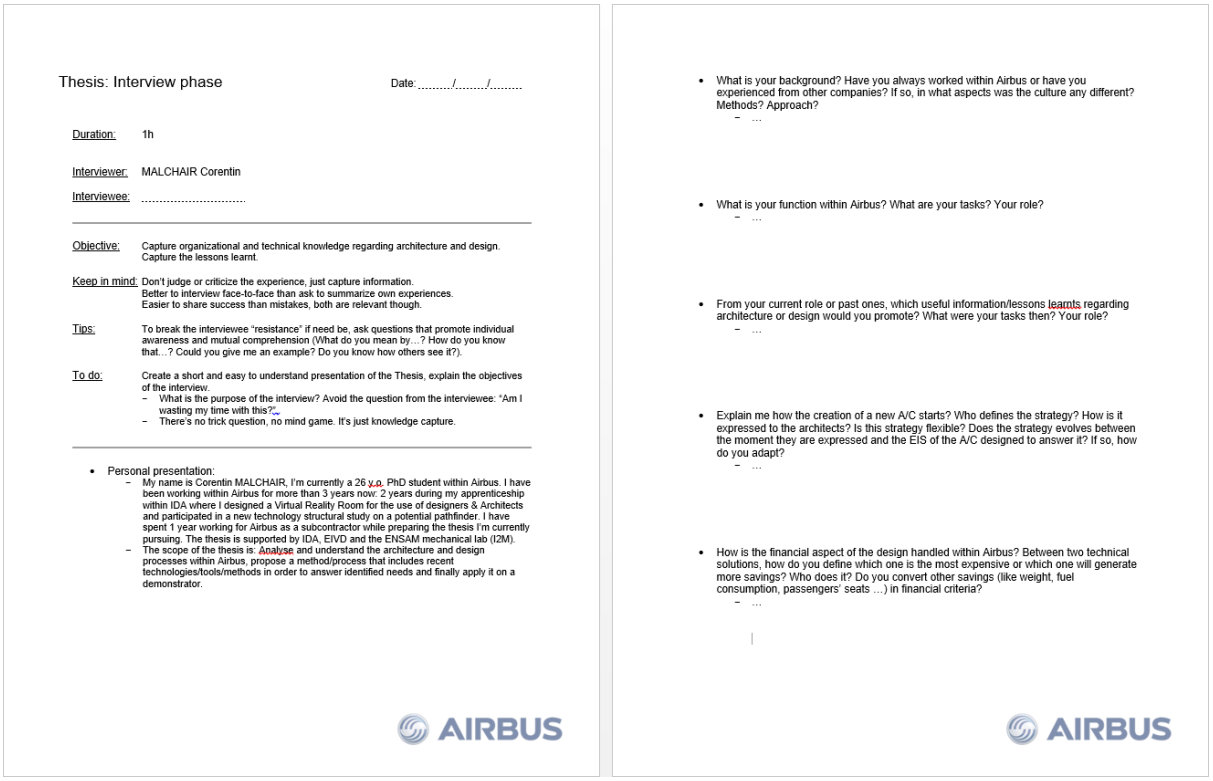
La méthode d'interview semi-structurée consiste en un échange entre deux personnes au moins, structuré par un questionnaire préétabli. L'objectif de ce questionnaire est double : obtenir les réponses aux questions posées et établir un dialogue. En effet, l'intérêt de cette méthode est de produire un dialogue constructif avec l'interlocuteur dans le but d'obtenir des informations et/ou des connaissances qui ne sont pas connues à l'avance. L'organisateur de l'interview doit veiller à ce que le dialogue ne s'éloigne pas trop du sujet d'études, les questions servent à borner le domaine de l'échange lors de l'interview.

En effet, un questionnaire uniquement composé de questions fermées produira exclusivement des réponses explicites (oui/non) tandis que des questions ouvertes amèneront à la création d'un dialogue et donc à produire en partie des réponses tacites. La mise en place d'un dialogue est préférable pour cette étude étant donné que nous cherchons à construire une vision étendue du contexte dans lequel les architectes sont amenés à travailler. Nous cherchons aussi à comprendre les problématiques principales auxquelles ils sont confrontés qui ne sont pas déterminées avant les interviews. Cette inconnue implique de poser des questions ouvertes et d'établir un dialogue afin d'inciter les interlocuteurs à s'exprimer sur leurs problématiques,

ce qui a pour conséquence de récolter de la connaissance tacite. Cependant, la bonne application de cet outil nécessite une bonne dose de préparation si l'on veut éviter les écueils connus des interviews mais aussi éviter de récolter des réponses biaisées. En effet, les questions posées durant les interviews peuvent orienter le dialogue et influencer les réponses obtenues. Afin d'obtenir des réponses objectives et factuelles, il faut donc préparer avec une attention particulière une liste de questions plus ou moins ouvertes et prendre en compte la culture de la compagnie et les spécificités de langage pour éviter toute confusion.

3.2.2.2 Préparation du questionnaire

L'objectif de cette récolte de connaissance est d'analyser et de comprendre le contexte de la phase d'architecture de l'industrie aéronautique ainsi que de définir les problématiques majeures auxquelles sont confrontées les acteurs de la conception préliminaire. Ainsi, le champ d'exploration est large et couvre potentiellement tous les domaines de la conception préliminaire. Le questionnaire a donc été établi de façon à présenter les objectifs de recherche et à impliquer l'interlocuteur. L'objectif est de créer un dialogue ouvert où la personne interviewée pourra exprimer les problématiques majeurs selon lui, cohérentes avec le champ de recherche décrit. En plus de cette approche, les questions préparées amèneront l'interlocuteur à parler de son rôle et de ses expériences. Ces questions auront pour but de renforcer le dialogue mais aussi de mieux comprendre le contexte d'architecture aéronautique ainsi que son évolution.



Thesis: Interview phase Date: ...../...../.....

Duration: 1h

Interviewer: MALCHAIR Corentin

Interviewee: .....

Objective: Capture organizational and technical knowledge regarding architecture and design. Capture the lessons learnt.

Keep in mind: Don't judge or criticize the experience, just capture information. Better to interview face-to-face than ask to summarize own experiences. Easier to share success than mistakes, both are relevant though.

Tips: To break the interviewee "resistance" if need be, ask questions that promote individual awareness and mutual comprehension (What do you mean by…? How do you know that…? Could you give me an example? Do you know how others see it?).

To do: Create a short and easy to understand presentation of the Thesis, explain the objectives of the interview.
- What is the purpose of the interview? Avoid the question from the interviewee: "Am I wasting my time with this?"
- There's no trick question, no mind game. It's just knowledge capture.

- Personal presentation:
  - My name is Corentin MALCHAIR, I'm currently a 26 y.o. PhD student within Airbus. I have been working within Airbus for more than 3 years now: 2 years during my apprenticeship within IDA where I designed a Virtual Reality Room for the use of designers & Architects and participated in a new technology structural study on a potential pathfinder. I have spent 1 year working for Airbus as a subcontractor while preparing the thesis I'm currently pursuing. The thesis is supported by IDA, EIVD and the ENSAM mechanical lab (I2M).
  - The scope of the thesis is: Analyse and understand the architecture and design processes within Airbus, propose a method/process that includes recent technologies/tools/methods in order to answer identified needs and finally apply it on a demonstrator.

AIRBUS

- What is your background? Have you always worked within Airbus or have you experienced from other companies? If so, in what aspects was the culture any different? Methods? Approach?
  - …
- What is your function within Airbus? What are your tasks? Your role?
  - …
- From your current role or past ones, which useful information/lessons learnts regarding architecture or design would you promote? What were your tasks then? Your role?
  - …
- Explain me how the creation of a new A/C starts? Who defines the strategy? How is it expressed to the architects? Is this strategy flexible? Does the strategy evolves between the moment they are expressed and the EIS of the A/C designed to answer it? If so, how do you adapt?
  - …
- How is the financial aspect of the design handled within Airbus? Between two technical solutions, how do you define which one is the most expensive or which one will generate more savings? Who does it? Do you convert other savings (like weight, fuel consumption, passengers' seats …) in financial criteria?
  - …

AIRBUS

Fig. 15 Echantillon du questionnaire d'interview semi-structurée.

Le questionnaire ainsi préparé permettra de récolter toutes sortes de connaissances (conceptuelle, procédurale, appliquée) qui devront ensuite être analysées afin de transformer les connaissances tacites en connaissances explicites. Cette étape dite d'élicitation de la connaissance fera émerger une définition précise du contexte de la phase d'architecture aéronautique et dégagera les problématiques majeures des acteurs de la conception préliminaire. Ces derniers sont définis dans le panel d'interlocuteurs.

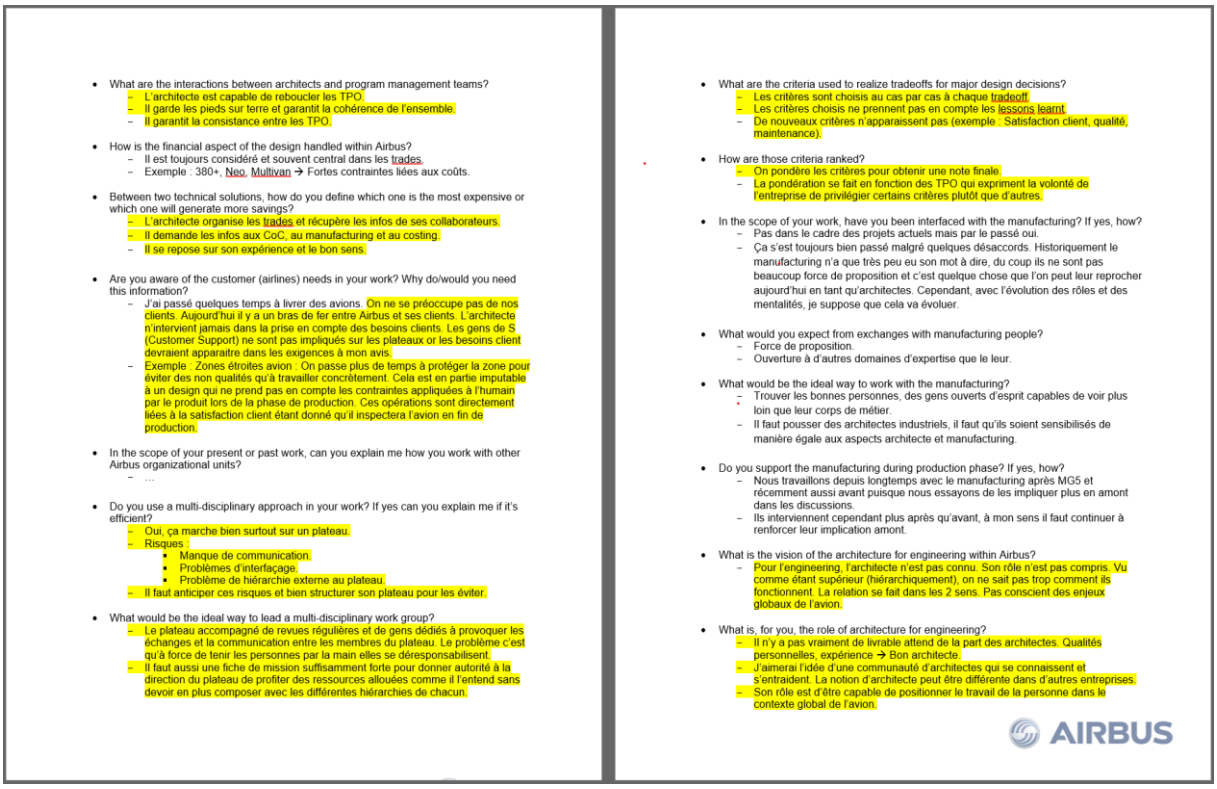
3.2.2.3 Définition du panel d'interlocuteurs

L'utilisation de la méthode d'interview (structurée ou semi-structurée) nécessite aussi de définir l'échantillon à interroger. Cet échantillon doit être suffisamment varié pour éviter de surreprésenter une opinion et suffisamment important pour être représentatif et proposer des opinions différentes. Afin de respecter ces contraintes, un échantillon de 21 personnes a été déterminé, regroupant 14 rôles ou domaines différents impliqués dans la conception préliminaire. Ceux-ci sont : Architecte EWIS (Electrical Wiring Interconnecting System), Architecte voilure, Architecte OAD (Overall Aircraft Design), Architecte industriel, expert méthodes conception, Coûts, Future Projects, Strategy, Opérabilité, Systèmes, Innovation d'entreprise, Structure, Intégration des systèmes de Propulsion et le Procurement. Afin de s'assurer de bien définir le contexte et les problématiques de conception, plusieurs architectes

ont été interrogés et leurs réponses ont été agrégées afin de ne pas surreprésenter leur opinion dans l'analyse des résultats finaux.

3.2.2.4 Résultats des interviews semi-structurées

Ces interviews permettent de récolter une grande quantité d'informations. En effet, une prise de notes et un enregistrement audio ont été réalisés pour chaque échange afin d'en retranscrire l'intégralité par la suite. L'intérêt de cette méthode est de pouvoir se concentrer sur l'entretien pendant qu'il a lieu et de l'analyser par la suite tout en récoltant un maximum de données brutes. Cependant, l'information récoltée est sauvegardée sous forme de comptes-rendus d'interviews dans lesquels la connaissance est principalement explicite, partiellement tacite (voir Fig. 14Fig. 16). Afin de l'analyser et donc de l'utiliser pour exprimer des objectifs de recherche pertinents, il convient au préalable de transformer la connaissance tacite en connaissance explicite. Pour ce faire, il existe plusieurs méthodes adaptées à différentes natures de données récoltées, nous allons donc définir laquelle serait appropriée pour notre besoin.



- What are the interactions between architects and program management teams?
  - L'architecte est capable de reboucler les TPO.
  - Il garde les pieds sur terre et garantit la cohérence de l'ensemble.
  - Il garantit la consistance entre les TPO.
- How is the financial aspect of the design handled within Airbus?
  - Il est toujours considéré et souvent central dans les trades.
  - Exemple : 380+, Neo, Multivan → Fortes contraintes liées aux coûts.
- Between two technical solutions, how do you define which one is the most expensive or which one will generate more savings?
  - L'architecte organise les trades et récupère les infos de ses collaborateurs.
  - Il demande les infos aux CoC, au manufacturing et au costing.
  - Il se repose sur son expérience et le bon sens.
- Are you aware of the customer (airlines) needs in your work? Why do/would you need this information?
  - J'ai passé quelques temps à livrer des avions. On ne se préoccupe pas de nos clients. Aujourd'hui il y a un bras de fer entre Airbus et ses clients. L'architecte n'intervient jamais dans la prise en compte des besoins clients. Les gens de S (Customer Support) ne sont pas impliqués sur les plateaux or les besoins client devraient apparaitre dans les exigences à mon avis.
  - Exemple : Zones étroites avion : On passe plus de temps à protéger la zone pour éviter des non qualités qu'à travailler concrètement. Cela est en partie imputable à un design qui ne prend pas en compte les contraintes appliquées à l'humain par le produit lors de la phase de production. Ces opérations sont directement liées à la satisfaction client étant donné qu'il inspectera l'avion en fin de production.
- In the scope of your present or past work, can you explain me how you work with other Airbus organizational units?
  - ...
- Do you use a multi-disciplinary approach in your work? If yes can you explain me if it's efficient?
  - Oui, ça marche bien surtout sur un plateau.
  - Risques :
    - Manque de communication.
    - Problèmes d'interfaçage.
    - Problème de hiérarchie externe au plateau.
  - Il faut anticiper ces risques et bien structurer son plateau pour les éviter.
- What would be the ideal way to lead a multi-disciplinary work group?
  - Le plateau accompagné de revues régulières et de gens dédiés à provoquer les échanges et la communication entre les membres du plateau. Le problème c'est qu'à force de tenir les personnes par la main elles se déresponsabilisent.
  - Il faut aussi une fiche de mission suffisamment forte pour donner autorité à la direction du plateau de profiter des ressources allouées comme il l'entend sans devoir en plus composer avec les différentes hiérarchies de chacun.

- What are the criteria used to realize tradeoffs for major design decisions?
  - Les critères sont choisis au cas par cas à chaque tradeoff.
  - Les critères choisis ne prennent pas en compte les lessons learnt.
  - De nouveaux critères n'apparaissent pas (exemple : Satisfaction client, qualité, maintenance).
- How are those criteria ranked?
  - On pondère les critères pour obtenir une note finale.
  - La pondération se fait en fonction des TPO qui expriment la volonté de l'entreprise de privilégier certains critères plutôt que d'autres.
- In the scope of your work, have you been interfaced with the manufacturing? If yes, how?
  - Pas dans le cadre des projets actuels mais par le passé oui.
  - Ça s'est toujours bien passé malgré quelques désaccords. Historiquement le manufacturing n'a que très peu eu son mot à dire, du coup ils ne sont pas beaucoup force de proposition et c'est quelque chose que l'on peut leur reprocher aujourd'hui en tant qu'architectes. Cependant, avec l'évolution des rôles et des mentalités, je suppose que cela va évoluer.
- What would you expect from exchanges with manufacturing people?
  - Force de proposition.
  - Ouverture à d'autres domaines d'expertise que le leur.
- What would be the ideal way to work with the manufacturing?
  - Trouver les bonnes personnes, des gens ouverts d'esprit capables de voir plus loin que leur corps de métier.
  - Il faut pousser des architectes industriels, il faut qu'ils soient sensibilisés de manière égale aux aspects architecte et manufacturing.
- Do you support the manufacturing during production phase? If yes, how?
  - Nous travaillons depuis longtemps avec le manufacturing après MG5 et récemment aussi avant puisque nous essayons de les impliquer plus en amont dans les discussions.
  - Ils interviennent cependant plus après qu'avant, à mon sens il faut continuer à renforcer leur implication amont.
- What is the vision of the architecture for engineering within Airbus?
  - Pour l'engineering, l'architecte n'est pas connu. Son rôle n'est pas compris. Vu comme étant supérieur (hiérarchiquement), on ne sait pas trop comment ils fonctionnent. La relation se fait dans les 2 sens. Pas conscient des enjeux globaux de l'avion.
- What is, for you, the role of architecture for engineering?
  - Il n'y a pas vraiment de livrable attend de la part des architectes. Qualités personnelles, expérience → Bon architecte.
  - J'aimerai l'idée d'une communauté d'architectes qui se connaissent et s'entraident. La notion d'architecte peut être différente dans d'autres entreprises.
  - Son rôle est d'être capable de positionner le travail de la personne dans le contexte global de l'avion.

AIRBUS

Fig. 16 Extrait du compte-rendu brut d'une interview. Les réponses potentiellement riches de connaissances sont surlignées.

3.2.3 Représentation de la connaissance.

3.2.3.1 Méthodes de représentation de la connaissance.

Il existe différentes façons de représenter la connaissance en fonction des objectifs (Clarifier, éduquer, décrire, communiquer, partager, etc…). De manière classique, la connaissance est représentée par des mots (du texte), des graphiques (diagramme, dessins, images) et des symboles (ou des équations). Dans le cadre de nos recherches, la représentation de la connaissance est un moyen de formaliser, synthétiser et présenter de façon claire ce qui a été capturé pendant la phase d'élicitation de la connaissance, pendant les interviews. L'objectif final étant de définir des problématiques majeures ou récurrentes et d'en déduire des axes de recherche prioritaires. Dès que l'on parle de représenter la connaissance d'un domaine spécifique, qu'elle soit conceptuelle ou procédurale, le regroupement de concepts sous formes d'arbres ou de tableaux permet d'obtenir une vue générale du sujet.

Les cartes de concepts (Concept maps) ou cartographies de concepts (Concept mapping) sont des représentations très populaires à partir du moment où la récolte de connaissances est suffisamment avancée pour permettre le regroupement en concepts et de construire des représentations. Novak (Novak, 2010) écrit par exemple que les cartes de concepts servent d'« outils facilitateurs dans les écoles et les entreprises » car ils encouragent « l'apprentissage cohérent » (*meaningful learning).* Hoffman et Lintern (Robert R Hoffman, 2006) accordent de nombreux avantages à cette représentation étant donné qu'elle peut servir de « réceptacle vivant (*dynamique*) de connaissances d'experts pour encourager le partage de connaissance et la préservation des connaissances » et « d'interfaces pour les systèmes intelligents ». Un inconvénient de cette méthodologie est qu'elle nécessite un jeu de données important pour justifier son application parfois fastidieuse. Prendre le temps de construire une représentation de la connaissance est moins intéressant lorsque le jeu de données est restreint.

Une autre méthode permettant d'analyser des données qualitatives est le « Thematic Content Analysis Process ». Elle est souvent appliquée à l'étude de connaissances contenues sous formes de textes, tels que les comptes-rendus d'interviews. Le chercheur examine alors attentivement la donnée pour identifier des thèmes communs, des sujets, des idées et/ou des modèles récurrents. Cette méthodologie ne permet pas une analyse absolument objective de la donnée étant donné qu'il n'est pas garanti que deux individus identifient les mêmes thèmes au sein d'un jeu de données. Si elle est applicable sur des jeux de données plus ou moins grands, plus celui-ci est important, plus les thèmes seront nombreux et potentiellement difficiles à classer par ordre d'importance. A l'inverse, plus le jeu de données est restreint, plus cette approche permet d'analyser rapidement de la connaissance récoltée tout en permettant une certaine souplesse dans l'identification des thèmes.

L'interview semi-structurée est la méthodologie retenue pour récolter une grande quantité d'informations et rencontrer les acteurs du processus de conception ce qui générera de la connaissance contenue sous forme de texte. Les méthodes de Concept mapping et Process mapping ne sont pas les plus adaptées à notre étude étant donné que le jeu de données récoltées est plutôt restreint (moins de 30 comptes-rendus d'interviews). La méthodologie « Thematic Content Analysis Process », adaptée à l'analyse de ce format de connaissance, permettra de faire émerger des concepts, des problématiques associées et les liens entre les différents résultats d'interviews.

3.2.3.2 Description de la méthode retenue : Thematic content analysis process.

L'application de la méthode de « Thematic Content Analysis Process », revient à parcourir de la connaissance tacite brute et à identifier des concepts liés au sujet de recherche. Dans le cadre de nos recherches, le contexte étant le processus de conception architecturale dans le domaine aéronautique et ses acteurs, nous avons cherché à identifier toutes les réponses qui pouvaient avoir un lien avec le sujet ou simplement être riches pour l'étude. La figure ci-dessus présente un extrait d'un compte-rendu dans lequel des éléments de connaissances potentiellement pertinents sont surlignés en jaune (Fig. 16). Une fois ces éléments identifiés sur l'ensemble du jeu de données étudié, la méthode consiste à chercher systématiquement des concordances entre les différents comptes-rendus d'interview dans le but de définir des concepts récurrents et donc potentiellement pertinents.

Cette méthode est adaptée à l'analyse de données manuscrites bien que son application soit fastidieuse. Elle permet de prendre en compte les connaissances issues de sources très différentes et de faire émerger des connaissances globales. De plus, la concaténation des idées et sujets redondants sous forme de catégories explicites simplifie des données initialement complexes.

Le processus d'application étape par étape de cette méthodologie est le suivant :

1. Se familiariser avec les données (lire et relire les documents).
2. Annoter l'ensemble des données, relever les passages pertinents, précieux ou utiles pour le sujet de recherche.
3. Chercher spécifiquement des thèmes récurrents dans l'ensemble des données permettant de synthétiser l'information.

4. Vérifier les thèmes pour s'assurer qu'ils correspondent à la donnée brute, supprimer les redondances.
5. Définir et nommer précisément les thèmes.

Par exemple, considérons les extraits d'interviews suivants :

1. « Airbus identifie très bien les critères de performance de ses solutions. Les architectes ont quelques critères à disposition mais il en faut encore plus, c'est en train de changer. ».
2. « Il faut faire évoluer les éléments de trade offs, comprendre les avantages et inconvénients d'une solution pour Airbus, pour le client et le ratio entre les deux. ».
3. « Trop peu de critères sont pris en compte dans les choix de conception, par conséquent l'estimation des coûts n'est pas représentative de la réalité. Les coûts opérationnels ne sont pas bien maîtrisés. **Le département Opérabilité doit être plus supporté et impliqué dans la conception du produit** dans le but de l'améliorer. Nous utilisons les mêmes critères de conception depuis plus ou moins 40 ans. Je crois que nous devons introduire de nouveaux critères et évaluer leur priorité. Le poids est trop important aujourd'hui, ça devrait être un ratio entre le poids et d'autres critères plutôt que de devoir trancher entre le poids ou le reste.

Ces réponses proviennent d'interlocuteurs représentant des rôles/métiers/responsabilités différents mais ils mettent le doigt sur un problème qui semble commun. En suivant l'approche du « Thematic Content Analysis Process », on peut voir émerger un premier thème « prise de décision multicritères » qui regroupe ces réponses et en synthétise la connaissance. On peut voir émerger un second thème, « **Conception collaborative** » qui regroupe à nouveau une partie de la connaissance tacite contenue dans ces réponses. En reproduisant cette logique pour chaque compte-rendu d'interview et en croisant les thèmes identifiés afin d'éviter les redondances on réussit à identifier les thèmes majeurs de la connaissance récoltée grâce aux interviews. La connaissance est alors explicite et il est possible de l'exploiter. En écartant les thèmes qui ne sont pas liés au sujet de recherche, on peut établir une liste de thèmes regroupant les connaissances pertinentes récoltées grâce aux interviews.

Cette liste est présentée ci-dessous (voir Fig. 17), les résultats y sont classés en fonction du nombre de fois où le thème est identifié dans l'ensemble des interviews. Les résultats sont rangés dans un ordre décroissant d'occurrences, de la plus importante à la plus faible. En

première analyse, on constate que plus des deux tiers de la connaissance capturée est comprise dans les dix premiers thèmes.

Topic	Occurrence (/19 interviewees)
Concurrent Engineering.	x10
Cost management.	x8
Architect role.	x8
Needs analysis (Customer's needs).	x7
Difficult data sharing.	x7
Multicriteria decision making for a complex product.	x6
Design for Manufacturing.	x6
Architect's deliverables.	x6
Tools are complex, not suitable and not integrated.	X5
Design for Value.	X5
Process unsuitable for the complexity of the product.	X4
Iterations loops too long.	X3
Expression and management of requirements.	X3
Safety VS innovation paradigm.	X3
Develop KM for design.	X3
Global strategy diffusion at a local level.	X3
Uncomplete global vision of the product.	X2
Digitalisation.	X2
Complex product integration simulation tools.	X2
MBSE.	X2
Procurement in cost analysis	x2
Promote diversity in the company.	x1

68

30

Fig. 17 Liste des concepts identifiées classés par occurrence.

3.2.3.3 Priorisation des concepts et problématiques identifiées :

Comme présenté en introduction de ce chapitre, la connaissance a été capturée à l'aide de la méthode d'interview semi-structurée, grâce à des questionnaires et la mise en place d'un dialogue avec les acteurs du cycle de développement du produit. Une partie de cette connaissance capturée se présentait sous une forme tacite qu'il a donc fallu éliciter de façon à la rendre explicite et plus facilement utilisable. Le paragraphe précédent s'est attaché à représenter la connaissance élicitée dans un format plus pratique à manipuler que les comptes-rendus d'interviews intégralement manuscrits : la catégorisation de la connaissance en thèmes classés par occurrence. Cette première partie des travaux permet déjà d'avoir un aperçu des contraintes et problématiques récurrentes que subissent les acteurs du cycle de développement

dans le domaine aéronautique lors des phases de conception préliminaire. L'objectif successivement de cette récolte, analyse, synthèse puis représentation de la connaissance, est de déterminer des axes de recherche prioritaires basés sur les retours des acteurs du processus de conception architecturale pour le domaine de l'industrie aéronautique. Comme montré ci-dessus (Fig. 17), vingt-deux thèmes différents ont émergé de l'analyse des comptes-rendus d'interviews, ceux-ci doivent maintenant être analysés.

Une première étape de cette analyse est de réduire le nombre de thèmes à traiter pour ne garder que ceux qui concernent un maximum d'utilisateurs. Cette synthèse permettra de manipuler et de regrouper plus facilement les thèmes restants, mais une partie de la connaissance capturée ne sera pas analysée. En partant du postulat selon lequel la forte occurrence d'un thème implique une forte importance pour les acteurs du processus de conception architecturale on peut classer les problématiques par ordre d'importance. Plus un thème, et donc des problématiques associées, est évoqué régulièrement, plus on peut supposer qu'il s'agit d'un axe de recherche prioritaire. Cela permet d'aboutir au classement par occurrence présenté ci-dessus (Fig. 17) et nous choisissons de nous concentrer sur les dix premiers thèmes les plus récurrents (regroupant donc plus des deux tiers des thèmes relevés) et d'essayer d'identifier les verrous de différentes natures associés à ces thèmes.

Afin de vérifier ce postulat et valider la pertinence des thèmes dégagés, nous présentons les résultats de l'analyse des entretiens aux personnes interrogées et leur donnons la possibilité de réaliser leur propre classement par le biais d'un sondage. Ce sondage a été envoyé systématiquement aux personnes interviewées (Voir annexe 1), ce qui a permis de définir un classement subjectif des dix thèmes les plus importants pour les acteurs du processus de conception architecturale. Les résultats sont présentés ci-dessous :

Rank	Keywords ranking (Raw)	Keywords ranking (normalised)
#1	Design for Value.	Design for Value.
#2	Needs analysis (Customer's needs).	Needs analysis (Customer's needs).
#3	Multicriteria decision making for a complex product.	Multicriteria decision making for a complex product.
#4	Architect's deliverables.	Architect role.
#5	Architect role.	Design for Manufacturing.
#6	Design for Manufacturing.	Architect's deliverables.
#7	Concurrent Engineering.	Cost management.
#8	Cost management.	Concurrent Engineering.
#9	Simple, integrated and suitable tools.	Simple, integrated and suitable tools.
#10	Data sharing.	Data sharing.

Fig. 18 Résultats des sondages envoyées aux personnes interviewées.

La première colonne (raw) présente le classement issu des résultats bruts du sondage, la seconde colonne (normalized) présente le classement issu des résultats normalisés du sondage

pour lequel les réponses des différents architectes ont été agrégées afin de ne pas surreprésenter leur opinion. Plusieurs architectes représentant le même métier ont été interrogés, leurs différentes réponses ont été regroupées et une moyenne des résultats a permis de normaliser leur poids dans le classement final. On constate que les deux classements sont assez proches, si ce n'est que le thème « Architect's deliverables » perd deux places au profit de « Architect's role » et de « Design for Manufacturing » dans le classement normalisé, ce qui est cohérent avec le fait que les opinions de plusieurs architectes ont été regroupées.

Le résultat du classement subjectif issu des sondages est que l'ordre des thèmes est différent du classement initial construit à partir des occurrences ce qui semble indiquer que le postulat exprimé plus tôt est au moins partiellement faux. Si l'occurrence d'un thème reflète bien une problématique des acteurs du développement, il ne permet cependant pas d'établir de classement relatif entre les différents sujets. Ainsi, le classement par occurrence permet de dégager les problématiques communes à de nombreux acteurs du cycle de développement tandis que le classement subjectif permet de les hiérarchiser. La formalisation des enjeux scientifiques et la suite de l'analyse ne se concentreront donc pas que sur les dix premiers thèmes retenus pour le sondage et nous chercherons à regrouper certains thèmes sous un axe de recherche commun.

3.3 FORMALISATION DES ENJEUX SCIENTIFIQUES IDENTIFIES

3.3.1 Analyse des problématiques principales identifiées

Une seconde application de la méthodologie de « Thematic Content Analysis Process » est alors réalisée dans le but de réduire la connaissance représentée à un minimum de thèmes qui engloberont plusieurs des problématiques identifiées et serviront à orienter les efforts de recherche dans une direction cohérente avec les besoins réels des utilisateurs.

La connaissance récoltée grâce aux interviews a été analysée et synthétisée sous la forme de plusieurs thèmes. Les thèmes sont classés par ordre de priorité, objectivement en termes d'occurrences relevées dans les comptes-rendus d'entretiens et subjectivement d'après le retour des personnes sondées. Cette représentation de la connaissance analysée va à présent pouvoir servir à préciser les verrous scientifiques que cette thèse cherche à lever.

En étudiant le jeu de données et en cherchant à identifier des liens entre les problématiques, certains éléments de regroupement apparaissent.

- Deux thèmes s'intéressent spécifiquement aux métiers d'architectes et leur place dans le cycle de développement : « Architect's role » et « Architect's deliverables ».
- Quatre thèmes ont trait au cycle de développement et aux contraintes associés au paradigme de conception en vigueur dans l'industrie aéronautique : « Concurrent Engineering », « Difficult Data sharing », « Complex & not integrated tools » et « Long iteration loops ».
- Sept thèmes adressent directement des problématiques liées aux méthodes et outils de conception utilisés ainsi qu'aux contraintes et limitations qu'ils présentent : « Cost Management », « Needs Analysis », « Multicriteria Decision Making », « Design for Manufacturing », « Design for Value », « Unsuitable Process » et « Expression & Management of requirements ».
- Les thèmes restants ne permettent pas de dégager de problématique commune évidente et ne représentent pas des problématiques récurrentes parmi les réponses des personnes interrogées (faible occurrence).

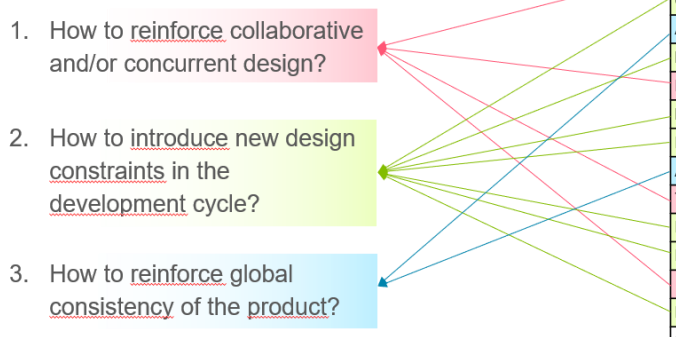
Pour chacun de ces regroupements, une vérification est réalisée dans les comptes-rendus d'interviews manuscrits afin de s'assurer que le propos exprimé par la personne interrogée était bien cohérent avec le thème global dégagé. Ces recoupements permettent d'exprimer plusieurs questions scientifiques.

Comme représenté ci-dessous (Fig. 19), les thèmes 1, 5, 9 et 12 font émerger une première question : **„Comment renforcer les aspects collaboratifs de la conception préliminaire ? "**. Ces thèmes font en effet allusion aux difficultés qu'ont les différents acteurs de la conception architecturale à échanger des données complexes, à développer des outils et des méthodes communs. Une méthode de conception architecturale favorisant la collaboration pourrait donc renforcer la synergie des équipes de conception architecturale et l'échange de données.

Les thèmes 2, 4 6, 7, 10, 11 et 13 font émerger une seconde question : **„Comment introduire de nouveaux critères de conception dans le cycle de développement d'un produit dans le contexte considéré"**. Ici, les réponses des interlocuteurs montrent que selon les domaines, les ingénieurs regrettent de ne pas avoir tous les critères de conception dont ils pourraient avoir besoin pour faire des choix pertinents. Ce manque d'informations lors de la conception préliminaire du produit se traduit par un manque de créativité et de liberté dans le

processus qui génère des frustrations, exprimées ici. Une méthode permettant de prendre en compte de nouveaux critères de conception pourrait répondre à cette frustration.

Les thèmes 3 et 8 font finalement émerger une troisième question : **„Comment renforcer la cohérence globale du produit ? “**. Le rôle de l'architecte dans l'industrie aéronautique est de garantir la cohérence du produit au cours de son développement. La méconnaissance du rôle de l'architecte et de ses livrables par les acteurs de la conception architecturale du produit est révélateur d'une faiblesse du cycle de développement du produit et des méthodes de conception associées.



Topic	Occurrence (/19 interviewees)
Concurrent Engineering.	x10
Cost management.	x8
Architect role.	x8
Needs analysis (Customer's needs).	x7
Difficult data sharing.	x7
Multicriteria decision making for a complex product.	x6
Design for Manufacturing.	x6
Architect's deliverables.	x6
Tools are complex, not suitable and not integrated.	X5
Design for Value.	X5
Process unsuitable for the complexity of the product.	X4
Iterations loops too long.	X3
Expression and management of requirements.	X3
Safety VS innovation paradigm.	X3
Develop KM for design.	X3
Global strategy diffusion at a local level.	X3
Uncomplete global vision of the product.	X2
Digitalisation.	X2
Complex product integration simulation tools.	X2
MBSE.	X2
Procurement in cost analysis	x2
Promote diversity in the company.	x1

Fig. 19 Emergence des questions scientifiques issues du recoupage des thèmes identifiés.

Les autres thèmes et problématiques identifiés sont pertinents mais, afin de limiter le champ d'exploration de ces travaux de recherches et en accord avec les analyses de priorité de ces thèmes, nous limiterons l'étude à ces questions. Les méthodes et outils qui seront développés pour y répondre pourront servir à adresser certains des thèmes non pris en compte par effet de bord, mais ce ne sera pas la priorité de l'étude. Cependant, cette connaissance récoltée pourra servir à alimenter de futurs sujets de recherche ou à mettre en avant certaines problématiques du développement du produit aéronautique, information précieuse pour une entreprise engagée dans une démarche d'amélioration continue.

La suite du document va à présent mettre en avant les approches proposées et développées dans ces travaux de recherche.

3.3.2 Première proposition - Gérer le lien entre la vue fonctionnelle et la vue physique du produit en phase de conception préliminaire.

Les architectes sont les garants de la cohérence globale du produit au cours de son développement. Ce sont eux qui réalisent les premières ébauches du produit final, proposent des concepts et des scénarios qui seront ensuite approfondis lors de la phase de conception détaillée. Leur responsabilité leur impose donc de s'impliquer tout au long du cycle de développement et de s'adapter aux différentes représentations du produit, qu'elles soient fonctionnelles, physiques ou industrielles. Cependant, leurs interlocuteurs ne sont pas toujours habitués à cet exercice et ne travaillent même souvent qu'avec une vue partielle du produit. Cette différence de conceptualisation du produit amène les architectes à ne pas toujours pouvoir échanger facilement avec les autres acteurs du développement de produit, générant des incompréhensions, des incohérences, parfois des erreurs.

De plus, les représentations du produit évoluent au fur et à mesure de son développement et ne sont donc pas du tout figées. La représentation physique du système est une extrapolation de sa représentation fonctionnelle à un instant donné (lorsque l'on fige des concepts architecturaux ou que l'on réalise des choix de solution). Ainsi, lorsque la structure du produit est détaillée en phase de conception détaillée, les choix réalisés n'impactent pas nécessairement en retour l'arborescence fonctionnelle réalisée plus tôt. Cette construction désynchronisée des différentes vues du produit entraîne des incohérences, perturbant la collaboration entre les acteurs du développement travaillant avec des vues différentes du système, ce qui gêne donc les architectes dans leur mission de garantie de la cohérence globale du produit.

Une autre faiblesse de cette désynchronisation des vues d'un système est mise en évidence pour la conception de systèmes complexes multi-niveaux. En effet, et c'est particulièrement vrai dans l'aéronautique, la conception d'un produit présentant de nombreuses fonctions et composants élémentaires s'accompagne généralement d'une volonté de mutualisation ou d'hybridation de fonctions/composants. Que ce soit pour simplifier une conception trop lourde, faciliter la production, la maintenance, pour des critères de masse ou de compacité, la mutualisation de composants peut souvent apporter des solutions intéressantes ou innovantes. Ce travail demande un effort particulier, souvent lors de campagnes d'optimisation du produit ou de rétroconception. Au cours de cet exercice, les concepteurs vont chercher à identifier des fonctions remplies par plusieurs composants et/ou plusieurs composants répondant à une fonction similaire pour envisager de les regrouper. La désynchronisation des

vues du produit ne facilite pas cet exercice et n'apporte pas un cadre favorable à l'innovation architecturale par la modularisation.

Ainsi, la première proposition consiste à créer un lien entre les vues fonctionnelle et physique du produit, en cherchant à les construire simultanément pour conserver cette corrélation au fil du développement du produit et favoriser la cohérence globale de celui-ci. Cette nouvelle façon de représenter le produit en phase de conception préliminaire pourrait favoriser l'innovation architecturale et renforcer les aspects collaboratifs du développement, mais nécessite un cas d'application pour en vérifier l'adéquation avec le contexte d'étude et l'applicabilité à un système multi-niveaux.

3.3.3 Seconde proposition - Intégrer des critères de performance industrielle en phase de conception préliminaire :

Les critères traditionnels pris en compte par les ingénieurs aéronautiques sont les critères de performances. La performance doit ici être entendue dans un sens global, étant donné qu'elle comprend les performances aérodynamiques (masse, profil aérodynamique) et les performances économiques (coûts direct, coût indirect). Les critères secondaires ou indirects ne sont généralement pas étudiés par manque de temps, par besoin d'efficacité et par souci de priorité stratégique. En effet, étudier des solutions innovantes en prenant en compte des critères originaux nécessite de fastidieuses campagnes de recherche et des études approfondies tout en s'accompagnant d'une importante prise de risque pour le constructeur aéronautique qui devra s'assurer de la certification de son produit. Prendre en compte ne serait-ce qu'un seul critère renforcerait la maîtrise du produit et donc sa cohérence. De plus, cela offrirait la possibilité aux ingénieurs d'envisager de nouvelles solutions et de les comparer aux solutions plus traditionnelles. Afin de limiter le champ de recherches, nous choisissons de nous concentrer sur la prise en compte d'un seul nouveau critère de conception. D'après les observations de l'environnement de conception aéronautique, d'après les retours d'expérience des produits développés par Airbus et par les problématiques identifiées lors des entretiens, nous décidons d'étudier la prise en compte des contraintes industrielles lors de la phase de conception architecturale.

Si l'on considère les travaux de Liu (R. Liu, 2001), on constate que, traditionnellement, 75% des coûts finaux d'un développement sont déjà engagés à la fin de la validation des concepts, alors que les équipes de production ne sont pas encore impliquées dans le processus de conception (voir Fig. 20). Ainsi, prendre en compte les contraintes industrielles plus tôt

permettrait de réduire les incohérences en phase de production et donc de réduire le nombre d'itérations nécessaires. Une implication précoce des équipes de production réduirait donc le temps de développement global, les coûts indirects générés en phase d'architecture et donc la valeur du produit. Cela permettrait aussi de renforcer la collaboration entre le bureau d'études et les équipes de production tout en apportant une meilleure maîtrise de la complexité du produit.

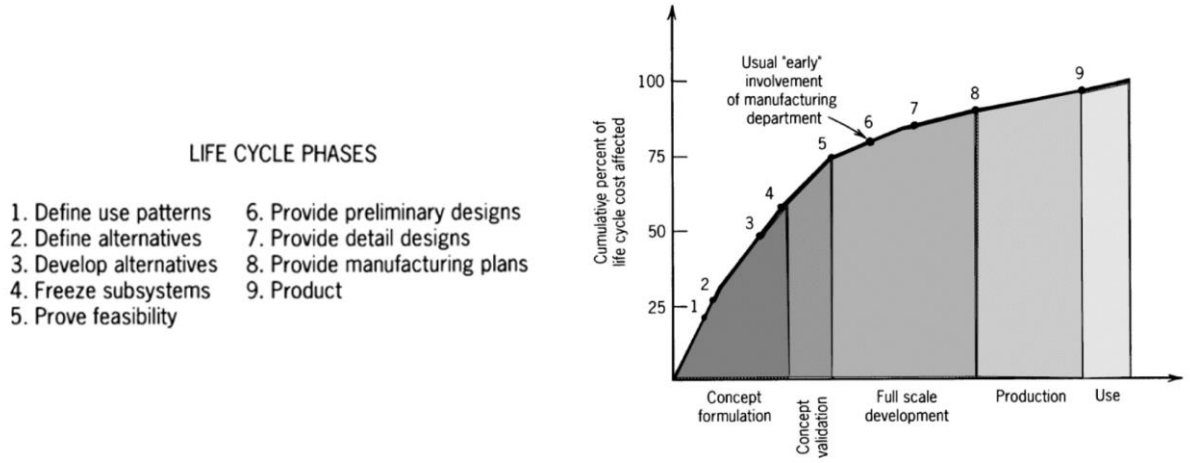


Fig. 20 Phases du cycle de vie du produit (R. Liu, 2001).

La seconde proposition est donc de définir une méthode de conception permettant d'impliquer les équipes de production lors de la conception architecturale du produit. Cette méthode permettra d'intégrer les contraintes industrielles aux critères de conception existants et être compatible avec les outils et méthodes issus de la première proposition.

3.3.4 Troisième proposition - Définition d'un nouveau paradigme de conception préliminaire.

Le paradigme de conception en vigueur dans l'industrie aéronautique a été décrit plus tôt. Pour rappel, il est séquentiel et itératif ce qui a pour avantage d'être un processus robuste et permettant de gérer la complexité du produit au détriment d'une durée de développement très longue et d'un manque d'agilité des outils et méthodologies de conception utilisées.

La nouvelle approche globale proposée doit s'inscrire dans le paradigme de conception actuel au risque d'être inadaptée, inapplicable et incohérente. En restreignant l'étude à l'étape de conception préliminaire ou conception architecturale, il est possible de se concentrer sur une petite partie du cycle de développement et des contraintes associées. En l'occurrence, les contraintes de la phase de conception préliminaire sont le faible niveau de détail du produit à cette étape du développement et la difficulté à produire une représentation exhaustive, fiable et

robuste dans le temps du produit. En effet, toute représentation du produit à cette étape de sa conception est amenée à évoluer au fur et à mesure que ses composants sont détaillés ce qui impose une forte contrainte de robustesse à cette représentation afin d'être exploitable lors des étapes ultérieures du développement. La contrainte d'exhaustivité de la représentation est liée à la nature multi-niveaux du produit étudié, celui-ci étant composé de composants majeurs, eux-mêmes constitués de sous-ensembles définis par des composants élémentaires interagissant les uns avec les autres à différents niveaux d'abstraction. Les données d'entrée de la phase d'architecture sont des concepts plus ou moins détaillés, des technologies et des objectifs stratégiques de l'entreprise. La phase d'architecture doit aboutir à la livraison d'une représentation suffisamment détaillée pour pouvoir estimer la faisabilité du produit final et évaluer sa capacité à répondre aux exigences et aux objectifs stratégiques de l'entreprise. Les représentations et les choix de conception réalisés durant cette phase du développement doivent permettre aux équipes de conception détaillée d'approfondir le niveau de description du produit par itérations successives jusqu'à la pièce élémentaire dans le but de valider les choix de conception réalisés, réaliser des simulations précises du comportement du produit final et préparer la production.

Fort de ces constats et pour poursuivre l'exploration des propositions faites précédemment, nous proposons l'approche suivante :

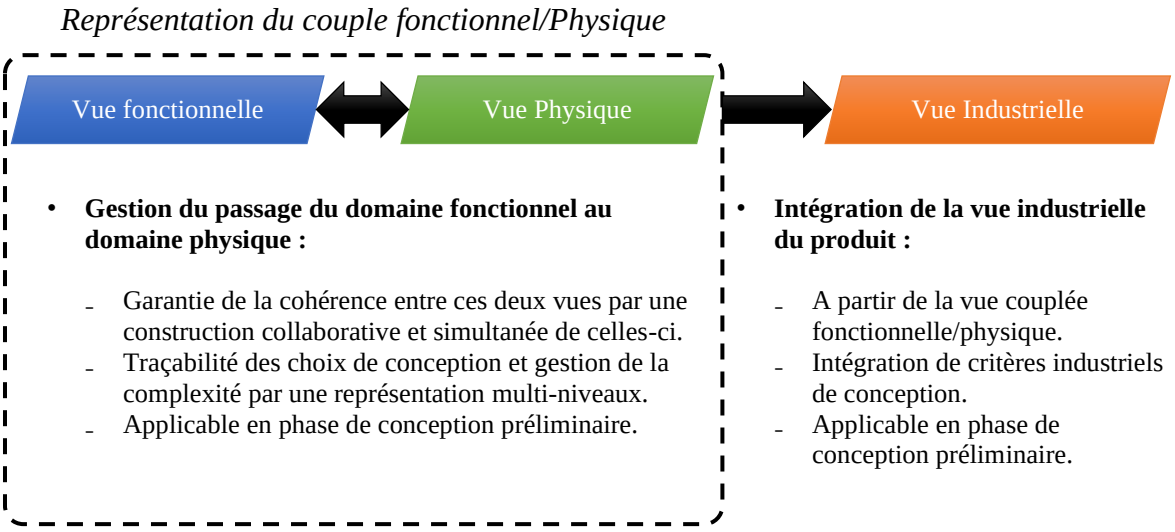


Fig. 21 Représentation générale de l'approche globale de conception

La première proposition décrite plus haut consiste à construire simultanément les vues fonctionnelle et physique pour s'extraire du paradigme de développement actuel dans lequel la vue physique du produit est une conséquence de la vue fonctionnelle et où les méthodes de gestion de la transition de l'un à l'autre ne font pas consensus. Le résultat de cette construction

simultanée est une représentation du couple Fonctionnel/Physique (Fig. 21 ci-dessus). Afin de respecter la contrainte d'exhaustivité de cette représentation et en cohérence avec la nature multi-niveaux et la complexité du produit, la construction des vues fonctionnelle et physique se fera par niveaux d'abstractions successifs, en partant du niveau d'abstraction le plus élevé jusqu'au niveau d'abstraction le plus bas requis. C'est ce qu'on appelle une approche Top/Down.

Ces choix posent de nouvelles questions : (i) *Comment construire simultanément les vues fonctionnelles et physiques ?* et (ii) *Les méthodes permettant de construire des représentations multi-niveaux d'un produit sont-elles compatibles avec la complexité du produit étudié ?*

Enfin, la seconde partie de l'approche concerne l'intégration de la vue industrielle du produit dans la phase de conception préliminaire et donc l'introduction de critères de performances industrielles. Nous proposons d'intégrer ces critères au couple Fonctionnel/Physique construit plus tôt, afin de lier véritablement les différentes vues du produit. Pour rappel, nous avons restreint les critères de performances industrielles aux critères d'assemblabilité du produit et de ses composants étant donné que l'assemblage du produit représente une problématique majeure de la phase de production. Il s'agit du cœur de métier de l'industriel partenaire de ces travaux de recherche (Airbus assemble le produit final avant de le livrer). De plus, les architectes avion comme les architectes production ont une influence directe sur les performances d'assemblage selon les choix de conception qu'ils font, ce qui en fait donc un critère de performance pertinent pour notre étude et pour leur intégration en phase d'architecture.

La question posée précédemment reste valable : (iii) *Comment intégrer des critères d'assemblabilité en phase de conception préliminaire ?* mais l'approche globale pose aussi la question suivante : (iv) *Comment lier la vue industrielle du produit au couple Fonctionnel/Physique ?*

3.4 CONCLUSION

Dans ce chapitre 3, propositions scientifiques, nous avons détaillé les méthodes et outils qui ont été employés pour récolter de la connaissance. L'utilisation d'interviews semi-structurées a permis d'obtenir de la connaissance principalement tacite et difficile à exploiter. Celle-ci a été ensuite analysée et synthétisée pour devenir explicite et être exploitable plus simplement grâce à la méthode de « Thematic Content Analysis Process ». Cette connaissance,

représentée sous formes de thèmes a ensuite été priorisée de façon à déterminer les sujets représentant un fort intérêt pour les acteurs du domaine de recherche, la conception architecturale.

Les thèmes prioritaires dégagés par des sondages et des classements objectifs ont fait émerger des questions scientifiques servant de base aux travaux de recherche de cette thèse. A travers ces questions, la contrainte de la complexité reste une composante importante du contexte de l'étude qu'il sera nécessaire de prendre en compte. Des propositions ont été faites pour y répondre et nous les détaillerons dans les chapitres suivants. Tout d'abord la gestion de la transition de la vue fonctionnelle à la vue physique par une synchronisation de leurs constructions en phase de conception préliminaire. Ensuite, l'élaboration d'une méthode permettant de prendre en compte les contraintes industrielles, exprimées par les équipes de production, dès les phases de conception architecturales. Enfin, la définition d'un nouveau paradigme de conception et d'une méthode associée, permettant de lier les différentes vues d'un produit complexe (fonctionnelle, physique, industrielle) et répondant aux problématiques identifiées dans l'analyse du contexte de conception. Les deux premières propositions doivent être compatibles pour s'inscrire dans l'approche globale de cette dernière proposition afin d'être appliquées sur un problème de conception concret et résoudre des problématiques actuelles de l'industrie aéronautique.

4. CHAPITRE 4 : LIAISON FONCTION/STRUCTURE

4.1 INTRODUCTION

Le chapitre précédent nous a permis d'approfondir notre compréhension des enjeux du développement de produit dans le contexte étudié ainsi que des problématiques majeures de ses acteurs. Le travail bibliographique du chapitre 2 a apporté une vision d'ensemble des méthodologies de conception, des différentes approches de la conception d'un produit et des stratégies de gestion de la complexité. Ces travaux permettent de proposer une première analyse de l'environnement de conception dans l'industrie aéronautique, de ses contraintes et des problématiques prioritaires des acteurs de la conception préliminaire. Cette analyse a permis de poser certaines questions et de faire des propositions pour y répondre. Les deux premières questions « *Comment renforcer les aspects collaboratifs de la conception préliminaire ?* » et « *Comment renforcer la cohérence globale du produit ?* » nous amènent à proposer la définition d'une nouvelle méthodologie de conception qui permettrait de lier les visions fonctionnelles, physiques et industrielles du produit tout en permettant une forte traçabilité des choix de conception. Une troisième question soulevée par l'analyse « *Comment introduire de nouvelles contraintes de conception dans le cycle de développement ?* », jugée trop vague a été restreinte pour réduire l'espace de recherche. Ainsi, la question plus spécifique « Comment introduire et prendre en compte les contraintes industrielles d'assemblage du produit dès la phase de conception préliminaire ? » permet de proposer une méthodologie de conception impliquant les équipes industrielles très tôt dans le cycle de développement, renforçant ainsi l'aspect collaboratif de la conception et le rôle des architectes en tant que garants de la cohérence globale du produit. Cette dernière approche devra être compatible avec la première proposition, s'inscrivant ainsi dans une méthodologie globale de conception permettant de lier les vues fonctionnelle, physique et industrielle du produit dans le contexte étudié.

Dans ce chapitre, la méthodologie permettant de créer et gérer la transition de la vue fonctionnelle à la vue physique est décrite. La première partie expliquera le choix de la méthodologie retenue, ses avantages et limitations dans le contexte de l'étude. La suite du chapitre cherchera à lever les limitations de cette méthodologie, notamment la capacité à favoriser l'hybridation de solutions et l'innovation dès la phase de conception préliminaire ainsi que la représentation des éléments de contrôle. Un cas d'application de la méthodologie permettra de valider l'applicabilité de la méthodologie à un système multi-niveaux et de vérifier la possibilité de naviguer dans la représentation globale du système, permettant une traçabilité des choix de conception.

4.2 DE LA FONCTION A LA STRUCTURE

4.2.1 Dans la litterature

L'analyse de la littérature nous aura permis de faire un tour d'horizon des méthodes de conception existantes et des approches plus ou moins originales qui pouvaient être utiles à nos travaux de recherche. Beaucoup de méthodologies ne sont pas applicables en phase de conception préliminaire ou n'adressent qu'une partie des problématiques relevées plus tôt. Nous cherchons ici un moyen de gérer la transition de la fonction à la structure, de créer un lien fort entre ces deux vues et de le maintenir au cours de la conception pour conserver une corrélation entre elles. L'une des conclusions de cette analyse est qu'il n'existe pas de consensus dans la littérature en ce qui concerne la transition de la fonction vers la structure malgré des travaux intéressants comme la méthodologie d'Axiomatic Design de Suh ou le FBS de Gero. En phase de conception préliminaire, les vues fonctionnelles et physiques sont en cours de construction et beaucoup de paramètres ne seront pas disponibles avant la phase de conception détaillée.

Ces constats nous amènent à nous tourner vers les méthodologies de conception et de représentation basées sur une approche énergétique. En effet, une analyse des flux d'énergies est possible dès la phase de conception architecturale et ces flux, basés sur des contraintes physiques resteront valables tout au long du cycle de développement. Des méthodologies basées sur une approche énergétique existent dans la littérature mais elles n'ont pas été appliquées à des systèmes du niveau de complexité d'un aéronef dont la particularité est de présenter de nombreux flux d'énergies, souvent hybridés ou regroupés. Leur application au contexte de l'étude va donc nécessiter de vérifier leur applicabilité. Elles représentent une piste intéressante pour la création d'un lien entre les différentes vues du produit et la mise en place d'une approche globale de conception architecturale.

4.2.2 Approche énergétique

Le point de départ du processus de conception est d'identifier les fonctions du produit. Une fonction est définie comme un processus, une action ou une tâche par lesquels un système transforme un élément de base tel qu'un matériau, une énergie ou un signal en un autre élément à travers une ou plusieurs entités (Barker & Longman, 1992). Cette définition est utilisée pour exprimer des fonctions à différents niveaux d'abstraction (Pahl, Beitz, Feldhusen, & Grote, 2007; Stone & Wood, 2000).

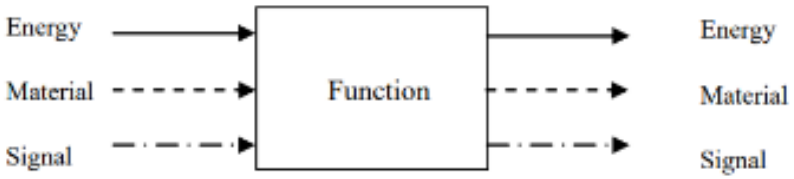


Fig. 22 Modèle boîte noire

Les flux d'énergie convertis, transformés et opérés par le produit et ses composants représente un point commun entre les différentes phases du cycle de vie du produit. Le domaine fonctionnel décrit la transformation des flux d'énergie requis pour remplir les différentes fonctions du produit. Le domaine physique définit les composants qui supportent et transforment les flux d'énergie. Enfin, les flux d'énergie qui circulent entre les composants définissent les opérations d'assemblage nécessaires à la réalisation du produit. Deux composants reliés par un flux d'énergie mécanique vont nécessiter une opération d'assemblage, pour transmettre ou reprendre un effort par exemple. En résumé :

- La vue fonctionnelle décrit les actions attendues du système sur les flux d'énergie.
- La vue physique décrit la solution retenue pour agir comme attendu sur les flux d'énergie.
- La vue industrielle décrit les opérations de fabrication et d'assemblage nécessaires à la réalisation des solutions conçues pour agir sur les flux d'énergie.

Prenons un exemple concret pour illustrer ce propos et mieux comprendre le cycle de vie d'un composant étudié selon un point de vue énergétique. Pour cet exemple, nous étudierons un élément emblématique de tout aéronef, la fonction de vol associée à la génération de portance. Pour garder cet exemple simple, nous n'aborderons pas encore les différences entre les surfaces aérodynamiques mobiles ou fixes et ne ferons pas de distinction entre les surfaces aérodynamiques du fuselage et celles de la voilure. Si l'on considère ce composant d'un point de vue énergétique, on obtient le modèle boîte noire suivant :



Fig. 23 Modèle boîte noire d'une surface aérodynamique.

- **La fonction de la surface aérodynamique** est de générer de la portance. Comme tout élément d'un aéronef en mouvement en contact avec l'air, les surfaces aérodynamiques génèrent inévitablement de la traînée, force opposée à la poussée.

Si l'on cherche à gagner de l'altitude, la traînée et le poids sont des forces indésirables. Les contraintes associées à la fonction de portance d'une surface aérodynamique sont donc de maximiser la portance tout en minimisant sa masse et la traînée induite.

- **La vue physique d'une surface aérodynamique** va donc définir son matériau, ses dimensions et les points d'interface nécessaires à la transmission des efforts entre les pièces connectées et la géométrie de la surface aérodynamique. Des calculs d'optimisation seront nécessaires pour définir le bon ratio entre la quantité de matière nécessaire, la masse minimale de la pièce, les efforts maximums qu'elle peut supporter et son comportement aérodynamique attendu.
- **La vue industrielle de cette pièce** va finalement définir les opérations de fabrication nécessaires à la réalisation de cette pièce telles qu'elle a été spécifiée dans la vue physique. Notamment la faisabilité ou non des géométries définies ainsi que leur coût. Elle déterminera aussi les opérations d'assemblage nécessaires à son assemblage sur le système global de façon à ce qu'elle génère et transmette les efforts de portance et de poussée, tel que décrit par la fonction exprimée initialement.

Cet exemple permet d'illustrer le fait que l'étude énergétique d'un composant permet d'établir une représentation commune aux différentes vues d'un composant. Ainsi, nous proposons d'utiliser une approche énergétique pour représenter le comportement attendu d'un système complexe.

Le travail de Malmiry, réalisé en 2016 (Oppelt, 1972), inspiré par une approche énergétique, cherche à décrire un système industriel et intégrer des indicateurs de coût par le biais d'un second modèle : le « Functional Behaviour Structure » ou FBS (Gero, Design Prototypes: A Knowledge Representation Schema for Design., 1990). Ce modèle permet d'identifier les paramètres liés au flux d'énergie principal du système et à les relier aux composants fonctionnels et physiques du système. En utilisant la modélisation « Characteristic-Properties » ou CPM (Weber C. , CPM/PDD - An Extended Theoretical Approach to Modelling Products and Product Development Processes. Proceedings of the 2nd German - Israeli Symposium on Advances in Methods and Systems for Development of Products and Processes., 2005a), il est possible de récupérer les propriétés des entités élémentaires du système qui sont liées aux caractéristiques principales de celui-ci. En associant les coûts de production et les tolérances à ces caractéristiques, le coût, la productivité et le risque de chaque étape du

processus d'assemblage peuvent être évalués (Oppelt, 1972). Cependant, l'approche de Malmiry est une description et non une conception d'un système ce qui nécessite de le connaître à l'avance ou d'être suffisamment avancé dans le processus de conception.

4.2.3 Modèle CTOC

Un modèle d'approche énergétique proposé par Pailhes et al. En 2007, appelé le modèle CTOC (Convertisseur, Transmetteur, Opérateur, Contrôle), est spécifiquement conçu pour gérer la transition du domaine fonctionnel au domaine physique du système (Favi & Michele, A method to optimize assemblability of industrial product in early design phase: from product architecture to assembly sequence., 2012). Ce modèle est basé sur l'observation selon laquelle différentes natures d'entrées et sorties peuvent être agrégées en un unique flux d'énergie qui sera lié aux paramètres physiques. Par exemple, un flux de signal sera transporté sous forme d'ondes ou d'impulsions électriques, un flux matériel sera vu sous la forme d'énergie mécanique ou cinétique.

La deuxième proposition du modèle CTOC est basée sur la méthode TRIZ proposée par Altshuller (Altshuller G. , 1984). Le système est décomposé en entités spécifiques et permet au concepteur de se concentrer sur les fonctions juste nécessaires pour le décrire : Convertir, Transmettre, Opérer et Contrôler. Le flux d'énergie associé avec les fonctions représentées croise ces entités et décrit le chemin énergétique minimal pour les remplir. Dans le but de représenter le système de façon exhaustive, ces entités peuvent être liées à une référence externe (ex. : le sol) ou une référence interne (ex. : la main de l'utilisateur). Ces composants d'interaction peuvent être utilisés pour représenter des éléments de jonction ou pour lier une entité à la référence.

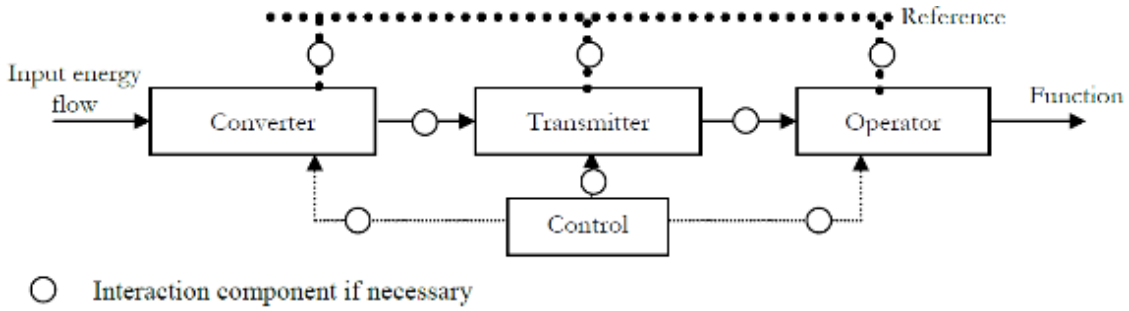


Fig. 24 Vision énergétique de la loi d'intégralité des parties d'un systèmes de la méthode TRIZ (Modèle CTOC) (Pailhes, Sallaou, & Nadeau, 2007)

L'approche CTOC apporte deux avantages à cette étude. D'abord, elle est applicable dès la phase de conception préliminaire juste après l'identification des fonctions externes du

produit. Deuxièmement, les propositions de la méthodologie de se concentrer sur le flux d'énergie primaire et une représentation minimale requise pour décrire le système sont compatibles avec l'objectif de lier les composants fonctionnels et les composants physiques. Cette modélisation peut aider à mettre en avant les alternatives de conception en décrivant la façon de remplir une fonction. Une fois les domaines fonctionnels et physiques liés, il est facile d'imaginer des alternatives de conception remplissant les mêmes fonctions et/ou d'agréger des composants. Ci-dessous, nous appliquons la méthode CTOC à un système complexe remplissant de nombreuses sous-fonctions, considéré comme un système de systèmes, couplé à une organisation industrielle complexe.

Les étapes d'application de la représentation et de la conception par la méthode CTOC sont les suivantes :

1. Le concepteur commence par choisir la fonction sur laquelle il souhaite travailler. Il est nécessaire de commencer par les fonctions de haut niveau du système afin de descendre ensuite dans les niveaux d'abstraction. Ce passage multi niveaux fera l'objet de réflexions ultérieures.
2. Le concepteur choisit ensuite les types d'énergie nécessaires pour réaliser la fonction. Ces choix seront directement liés aux choix d'architecture du système et aux contraintes imposées par le cahier des charges. Le choix d'une énergie embarquée va par exemple nécessiter l'intégration d'un stockage dépendant de la nature de l'énergie à stocker : un réservoir pour de l'énergie fossile, une batterie pour de l'énergie électrique, ...

Le concepteur doit ensuite répondre à plusieurs questions pour compléter le modèle CTOC :

3. Par quel phénomène physique va-t-on opérer la fonction ?
4. L'énergie d'entrée est-elle sous la bonne forme pour être opérée ou bien nécessite-t-elle une conversion ?
5. L'énergie d'entrée, convertie ou non, nécessite-t-elle une transmission spécifique jusqu'à la zone où sera opérée la fonction ?
6. Sur quels éléments faut-il appliquer un contrôle pour s'assurer du bon fonctionnement du système ?
7. La plupart des systèmes étant soumis à la gravité et opérés dans un environnement spécifique, une liaison à une référence est-elle nécessaire (liaison roue/sol pour une automobile ou liaison coque/eau et hélice/eau pour un bateau par exemple) ?

Cependant, la littérature ne propose pas d'exemple d'application de cette méthode à des produits complexes impliquant de nombreux flux d'énergie, ce qui nécessite d'adapter son

applicabilité à un produit tel qu'un aéronef. De plus les couplages entre flux d'énergie n'ont pas été abordés non plus car les exemples présentés sont tous orientés vers des systèmes énergétiques avec un flux principal unique.

4.3 L'APPROCHE CTOC APPLIQUEE A DES SYSTEMES COMPLEXES

4.3.1 Systèmes Couplés, Découplés et Hybridés

Le couplage est un terme utilisé pour indiquer que des composants assurant le passage d'un flux énergétique associé à une fonction donnée d'un système, sont directement associés au passage d'un autre flux énergétique associé à une autre fonction. Un système couplé sera fortement interdépendant alors qu'un système découplé présentera des composants fonctionnant indépendamment les uns des autres d'un point de vue des logiques architecturales liées à l'utilisation du CTOC.

Les caractéristiques d'un système couplé sont :

- Fortes connections entre les composants du système.
- Certaines parties du système sont directement dépendantes les unes des autres.
- Un changement dans une zone impacte d'autres zones du système.
- Le nombre de composants est optimisé.
- La résilience de l'ensemble diminue au fur et à mesure que la complexité et le nombre de composants augmentent.

Les caractéristiques d'un système découplé sont :

- Les connections entre les composants du système sont faibles.
- Certaines partes du système fonctionnent indépendamment les unes des autres.
- Un changement dans une zone n'a que peu ou pas d'impact sur d'autres zones du système.
- Le nombre de composants n'est pas optimisé.
- La résilience augmente au fur et à mesure que des composants sont ajoutés au système.

Dans la réalité, les architectures présentent généralement des systèmes couplés et découplés profitant des avantages et des inconvénients de chaque cas selon le besoin. Des architectures couplées peuvent donc émerger lors de la conception de systèmes complexes avec par exemple la voilure d'un aéronef qui selon le cas d'exploitation participera plus à la fonction

de génération de portance ou à la fonction de génération de traînée. Cette architecture couplée exploite donc un flux d'énergie cinétique unique provenant de la poussée du moteur pour répondre à plusieurs fonctions avec un même composant. Il est possible de mutualiser des composants, comme le moteur de l'aéronef qui produit principalement de la poussée pour permettre à un système de se déplacer dans une direction mais peut aussi permettre de générer de la portance et donc permettre de se déplacer verticalement. A l'inverse, il est possible de découpler des fonctions avec par exemple le dirigeable ou un moteur sert à produire un déplacement horizontal tandis que l'élévation du système est réalisée par une différence de densité en exploitant la poussée d'Archimède. Enfin, un système hybride se définit par l'intégration de sources d'énergies différentes ou la mise en jeu de phénomènes physiques différents mais participant à une fonction commune. L'exemple le plus courant est celui de l'automobile hybride combinant un moteur à combustion interne et un moteur électrique participant à la fonction de déplacement du véhicule.

De nombreuses architectures d'aéronefs ont été imaginées au cours du développement de l'aéronautique et plus largement de l'aérospatiale moderne (voir Fig. 25 ci-dessous). Tout appareil capable de s'élever ou de circuler dans les airs est un aéronef (Larousse en ligne). Tout aéronef doit lutter contre la gravité s'il veut s'élever dans les airs et contre les forces de friction qui génèrent de la traînée s'il veut acquérir de la vitesse. Selon les solutions techniques envisagées il peut s'agir de systèmes exploitant principalement de la poussée (missiles, fusées), principalement de la portance (deltaplane, ballon sonde) ou une combinaison des deux. Cette dernière catégorie comporte aussi bien les systèmes exploitant la poussée de différents types de moteurs (avion de ligne moderne, ékranoplan, ailes volantes, hydravion) que ceux exploitant les propriétés d'un fluide spécifique (ballon à air chaud, dirigeable à hélium). On comprend donc qu'il est possible de catégoriser des architectures très différentes mais répondant à une fonction commune, celle de permettre le vol contrôlé dans l'air. L'application de l'approche CTOC peut-elle permettre de discriminer des architectures et de mettre en avant les choix de conception réalisés ? L'approche peut-elle donc être un vecteur d'innovation architecturale ?

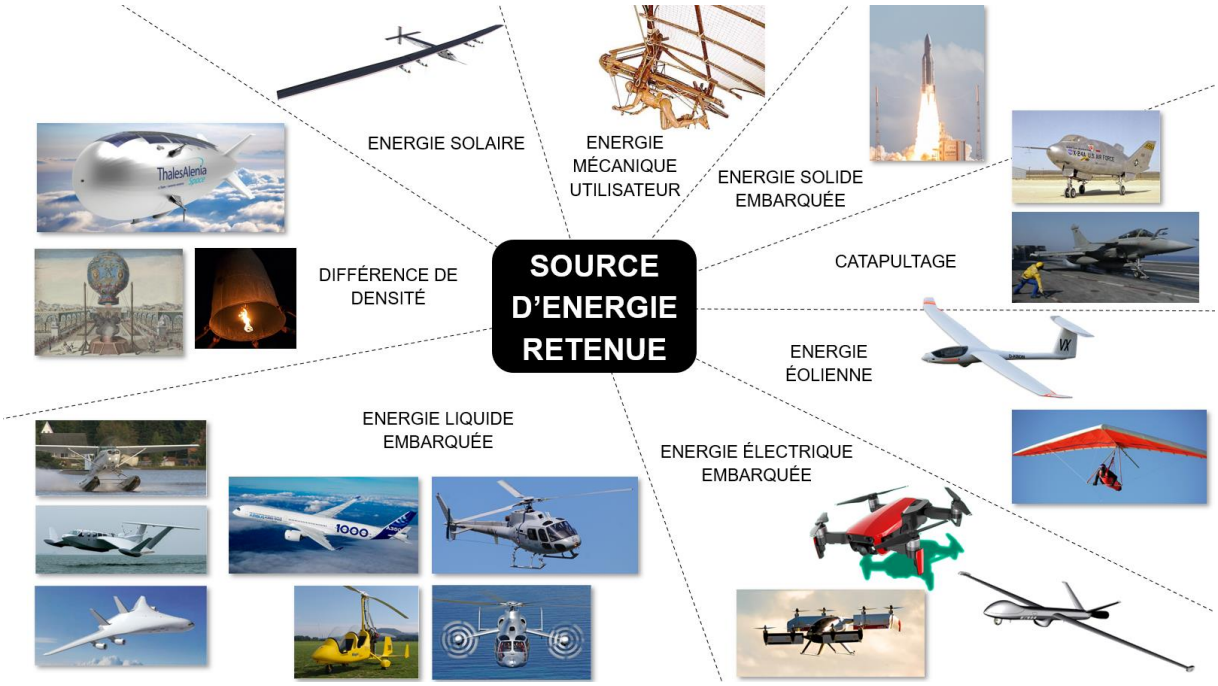


Fig. 25 Exemples d'architectures d'aéronefs et leur source d'énergie associée.

4.3.2 Processus de Conception par l'approche CTOC

4.3.2.1 Choix de la fonction à concevoir

En appliquant à présent le processus CTOC détaillé précédemment à la conception d'architectures aéronautiques, nous allons chercher à répondre à ces questions et à vérifier l'applicabilité de l'approche CTOC à des systèmes complexes présentant des architectures couplées, découplées et hybrides. Le processus de conception commence par le choix de la fonction sur laquelle le concepteur souhaite travailler. Ici, la fonction commune à tout aéronef est de permettre le vol contrôlé. A ce niveau de la conception, il n'est donc pas encore possible de définir différentes architectures d'aéronefs ni de les discriminer.

4.3.2.2 Choix de la source d'énergie

La logique énergétique du concepteur va cependant donner la direction générale du concept en cours de développement. De nombreuses énergies peuvent être utilisées pour opérer la fonction du système telles que des énergies embarquées qui peuvent être liquides (fuel, diesel, méthanol, kérosène, hydrogène liquide), solides (propergol à poudre, charbon, bois), électriques (génération d'électricité, batteries) ou autres. Des sources d'énergies moins courantes peuvent amener à des architectures originales comme l'énergie éolienne (courants d'air, vent), une énergie résiduelle issue d'un dispositif externe (catapultage) ou des différences de densité

exploitant le principe de la poussée d'Archimède (Air chauffé, Hélium). Envisager de nouvelles sources d'énergie peut être une source d'innovation, la conception d'un système exploitant l'énergie solaire a par exemple récemment permis le développement et le vol réussi de Solar Impulse autour du monde. Ces énergies vont être pilotées par le cahier des charges selon le pouvoir énergétique de chaque solution et vont fortement contraindre la suite du développement. Des contraintes extérieures influencent le choix d'énergie comme les contraintes écologiques de plus en fortes ou des contraintes politiques qui peuvent impacter la disponibilité d'un matériau ou d'une énergie. L'hydrogène par exemple est une source d'énergie particulièrement intéressante de par sa disponibilité, ses performances et son potentiel non polluant. Cependant, des limitations technologiques (procédé de production polluant) et économiques (coût élevé du stockage sous forme liquide) ont jusqu'à présent empêché sa popularisation à grande échelle.

Types d'énergie	Exemples de sources d'énergie	Exemples d'applications
Biomasse	Bois	Poêle à bois
	Charbon	Centrale à charbon
	Tourbe	Centrale à tourbe
Carburant fossile	Pétrole	Moteur à combustion
	Gaz naturel	Centrale au gaz, chauffage
Carburant gaseux	Biogaz	Chauffage
Carburant liquide	Biofuel	Moteur à combustion
	Bioethanol	Moteur à combustion
	Methanol	Moteur à combustion
Carburant solide	Propergol solide (ou poudre)	Moteur fusée
Energie atomique	Uranium	Centrale nucléaire à fission
	Deuterium	Centrale nucléaire à fusion
Energie biomécanique	Energie humaine	Déplacement corps humain
	Energie animale	Déplacement animal
Energie chimique	Réaction exothermique	Explosifs
Energie de rayonnement	Rayonnement électromagnétique	Radars, sonars
Energie électrique	Electricité	Moteur électrique, chauffage
Energie éolienne	Vent	Eolienne
Energie gravitationnelle	Gravité	Manœuvres orbitales
Energie hydraulique	Cours d'eau	Centrale hydroélectrique
Energie magnétique	Champ magnétique	Train à sustentation magnétique
Energie marémotrice	Marées	Usine marémotrice
Energie cinétique	Energie mécanique résiduelle	Catapultage
Energie pneumatique	Air comprimé	Compression, transport, stockage
Energie solaire photovoltaïque	Energie solaire	Panneaux solaires
Energie thermique	Energie géothermique	Energie géothermique
	Energie solaire thermique	Energie solaire thermique
Hydrogène	Dihydrogène	Moteur à combustion, Pile à combustible
Poussée d'Archimède	Air chauffé	Ballon
	Hélium	Dirigeable, ballon sonde

Fig. 26 Tableau récapitulatif de différents types d'énergie potentielles.

4.3.2.3 Possibilité d'hybridation, de couplage et de découplage des fonctions et systèmes

Après avoir choisi la source d'énergie du système en cours de développement, le concepteur va devoir choisir les phénomènes physiques qu'il souhaite mettre en jeu pour opérer la fonction attendue du système. Ici, permettre le vol contrôlé se traduit par trois capacités attendues du système : Se déplacer horizontalement, se déplacer verticalement et contrôler les déplacements. Même en ayant figé le choix d'une source d'énergie, différents phénomènes physiques permettent au système de répondre à ces fonctions attendues et le concepteur doit donc définir lesquels il souhaite mettre en jeu, toujours en fonction du cahier des charges. En exploitant par exemple un carburant liquide embarqué, un moteur peut générer une poussée qui sera opérée par une voilure fixe pour générer de la portance (fonction « se déplacer verticalement ») et du contrôle (fonction « contrôler les déplacements »), orientant l'architecture moderne. Un moteur connecté directement à une voilure tournante permet aussi d'assurer la fonction « se déplacer verticalement », le déplacement horizontal étant alors lié à l'inclinaison du système et donc directement à la direction de la portance. Le contrôle peut alors par exemple être lié à l'intégration d'un rotor de queue et de surfaces aérodynamiques mobiles. Ces fonctions peuvent être aussi être complètement découplées, comme c'est le cas par exemple pour un dirigeable où le déplacement vertical est assuré par l'exploitation de la poussée d'Archimède et le déplacement horizontal par des propulseurs.

Il est aussi possible d'hybrider les sources d'énergies retenues pour opérer la fonction étudiée par le concepteur. L'exemple le plus évident serait celui des véhicules à motorisation hybride, mêlant un moteur thermique et un moteur électrique plus ou moins utilisés en fonction des cas d'exploitation du système. Un développement similaire peut être envisagé pour des avions de ligne pour lesquels des moteurs électriques pourraient participer à la propulsion du système dans les phases de décollage par exemple ou encore pour apporter du contrôle en étant synchronisés avec les surfaces aérodynamiques mobiles. L'hybridation d'une énergie cinétique résiduelle et l'exploitation de courants éoliens permet le vol contrôlé du planeur après avoir été catapulté depuis le sol ou largué depuis un aéronef afin de lui apporter une impulsion initiale. Notons aussi l'exemple du corps portant étudié par la NASA dont le principe est d'hybrider un moteur-fusée avec un catapultage pour permettre le vol contrôlé d'un aéronef sans voilure mais avec une structure portante.



Fig. 27 A gauche le X-24A, M2-F3, HL-10 et à droite le X-43a Scramjet hypersonique sont des prototypes de corps portants.

Les choix d'une énergie et de phénomènes physiques associés pour opérer une fonction permettent donc au concepteur de dessiner les contours du système en cours de développement. Ces choix peuvent aussi être source d'innovation, le choix d'une énergie peu ou pas utilisée dans un domaine peut amener un concepteur à envisager des solutions originales. Ces logiques de mutualisation de composants et d'hybridations d'énergies sont particulièrement vraies pour les systèmes aéronautiques pour lesquels tout gain de masse ou de performance est précieux et où l'individualisation de composants est généralement à éviter. Une exception est à noter cependant pour la conception des systèmes de sécurité et/ou redondants qui au contraire tendent vers un maximum d'indépendance et de résilience vis-à-vis du reste du système, le gain de masse devenant secondaire.

4.3.2.4 Choix du convertisseur

En fonction des choix réalisés précédemment, le système peut avoir besoin ou non d'un organe de conversion de l'énergie d'entrée. Le concepteur doit donc se demander s'il est nécessaire, et si oui, quelle serait la solution technologique adaptée au problème. L'énergie n'est que rarement disponible sous la bonne forme car il est toujours plus simple de stocker de l'énergie potentielle pour la convertir lorsque le système requiert de l'énergie. Un moteur remplit généralement cette fonction, qu'il s'agisse d'un moteur thermique, électrique ou d'un moteur fusée la fonction est toujours de convertir l'énergie stockée en une forme d'énergie requise par l'organe opérateur du système. Un moteur d'avion convertit le carburant liquide en poussée qui sera opérée par l'ensemble du système pour se déplacer horizontalement et par la voilure pour générer de la portance. Les moteurs électriques d'un drone convertissent l'énergie électrique contenue dans des batteries en un couple transmis aux surfaces aérodynamiques

mobiles pour générer de la portance. Un deltaplane ou un planeur par exemple ne nécessitent pas de convertisseurs étant donné qu'ils exploitent directement l'énergie éolienne disponible dans l'environnement extérieur.

Le choix du convertisseur est donc dicté par le choix de la source d'énergie, du mode de stockage associé et de la forme sous laquelle elle est disponible, ainsi que celle sous laquelle on souhaite la convertir pour l'opérer. Les scénarios d'exploitation du produit fini peuvent aussi influencer le choix du convertisseur. Un véhicule pourra recevoir un moteur deux temps ou un moteur quatre temps en fonction des contraintes de conception et des capacités attendues du produit. Un concepteur développant un aéronef choisira un convertisseur aérobie si le domaine de vol est restreint aux altitudes où l'oxygène est présent en quantité suffisante, au-delà il lui faudra envisager des convertisseurs anaérobies qui emportent l'oxygène dont ils ont besoin pour fonctionner. A faible altitude et faible vitesse, il privilégiera des turbopropulseurs, particulièrement adaptés à ce domaine de vol. Pour des vitesses et des altitudes plus importantes, à cause de l'apparition de phénomènes soniques, il privilégiera des propulseurs à réaction (voir Fig. 28 ci-dessous).

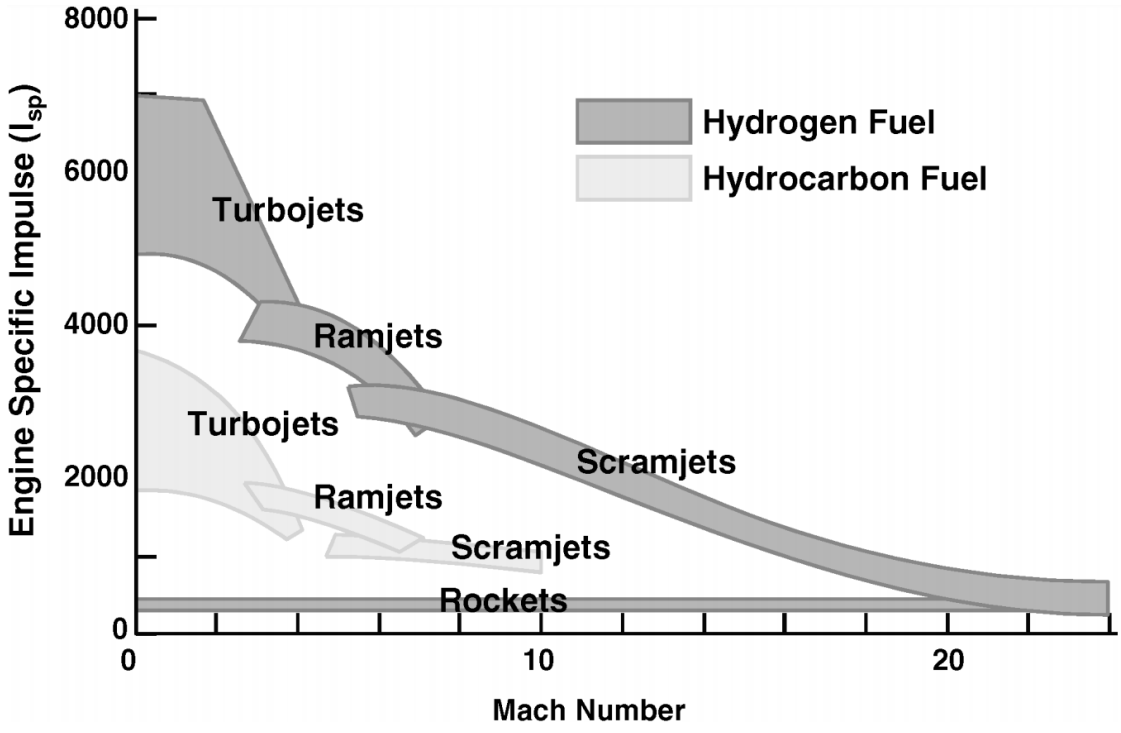


Fig. 28 Domaine de vol (vitesse en Mach) et rendement (impulsion spécifique) des différents types de moteurs à réaction (Fry, 2004).

4.3.2.5 Choix du transmetteur

L'énergie une fois convertie doit être transmise à l'organe qui l'opère. Si le système nécessite un organe de transmission, il faut alors réfléchir aux solutions disponibles pour

transmettre l'énergie du convertisseur jusqu'à l'opérateur. La nature de l'énergie à transmettre restreint les solutions disponibles, une énergie mécanique ne se transmettra pas grâce aux mêmes organes de transmission qu'une énergie électrique ou magnétique. Il est cependant là aussi possible d'appliquer des logiques de couplage à l'organe transmetteur. Si l'on prend l'exemple d'un avion de ligne, les moteurs convertissent le carburant en une poussée transmise à l'ensemble du système par le biais des mâts moteurs et des éléments de structure jusqu'aux différentes surfaces aérodynamiques. La structure est donc l'organe de transmission d'un avion de ligne. Transmettre la poussée directement aux surfaces aérodynamiques permettrait de s'absoudre d'un organe transmetteur en couplant la structure et les surfaces aérodynamiques. C'est l'architecture d'une aile volante où l'ensemble de la structure est aussi une surface aérodynamique dans laquelle les moteurs sont intégrés. On peut aussi noter les architectures à voilure haubanée où le hauban sert de transmetteur et d'élément de structure permettant un allongement important de la voilure ou encore le concept de Prandtl plane présentant une voilure rhomboédrique. La double voilure remplit alors les fonctions de transmetteur, de surface portante mais aussi de contrôle puisqu'elle remplace l'empennage arrière en présentant des surfaces aérodynamiques mobiles.

4.3.3 Discussions autour des architectures obtenues par l'application de l'approche CTOC

L'approche CTOC permet au concepteur, au fur et à mesure des étapes du processus de conception, de réaliser des choix à partir des flux d'énergie que l'on souhaite mettre en œuvre et des phénomènes physiques que l'on souhaite y associer. Des logiques de conception architecturale permettent de coupler, découpler et hybrider des fonctions et des composants selon les contraintes du cahier des charges ou la volonté d'innovation. A chaque étape, des choix différents permettent d'explorer différents embranchements dans l'arborescence de conception. Les paragraphes suivants traitent de la capacité de l'approche à discriminer les architectures candidates ainsi que l'agilité qu'elle offre au concepteur de naviguer entre elles en gardant en tête une approche de conception axée autour des flux énergétiques qu'il souhaite impliquer. L'étape de conception préliminaire d'un produit est aussi celle durant laquelle des solutions exotiques peuvent être envisagées. La suite du document met ainsi en avant un autre intérêt de l'approche CTOC en tant que vecteur d'innovation pour des systèmes complexes. En guidant le concepteur dans ses recherches, elle permet d'envisager la conception sous un nouvel axe énergétique et donc de favoriser l'apparition de solutions originales.

4.3.3.1 Discrimination d'architectures



En prenant comme architecture de référence l'avion de ligne moderne, il est intéressant d'analyser les alternatives de conception et les architectures candidates qui peuvent être mises en avant par l'utilisation du modèle CTOC. Le principe général des avions de ligne est de générer de l'énergie cinétique grâce à des systèmes propulsifs. Le potentiel énergétique des différentes sources d'énergie disponibles (énergie fossile, batteries, hydrogène) impose aujourd'hui une énergie embarquée pour les avions commerciaux mais des sources d'énergies extérieures peuvent donner le jour à de nouveaux concepts (énergie solaire, catapultage). La source d'énergie choisie propulse l'ensemble de l'aéronef par l'intermédiaire de la structure qui contient et protège aussi la charge utile (passagers et cargo). Le couplage entre le système propulsif et la voilure permet de générer de la portance et permet donc au système de s'élever dans les airs. Les forces de friction dans l'air génèrent de la traînée induite. Ainsi, la portance s'oppose à la gravité et permet à l'avion de se déplacer verticalement dans les airs, la propulsion s'oppose à la traînée et permet à l'avion de se déplacer horizontalement. Le vol est contrôlé automatiquement et manuellement par des consignes envoyées aux moteurs et grâce aux surfaces aérodynamiques mobiles. Cette architecture fait partie des aéronefs propulsés à voilure fixe. La représentation CTOC de cette architecture ci-dessous reflète le cheminement énergétique décrit.

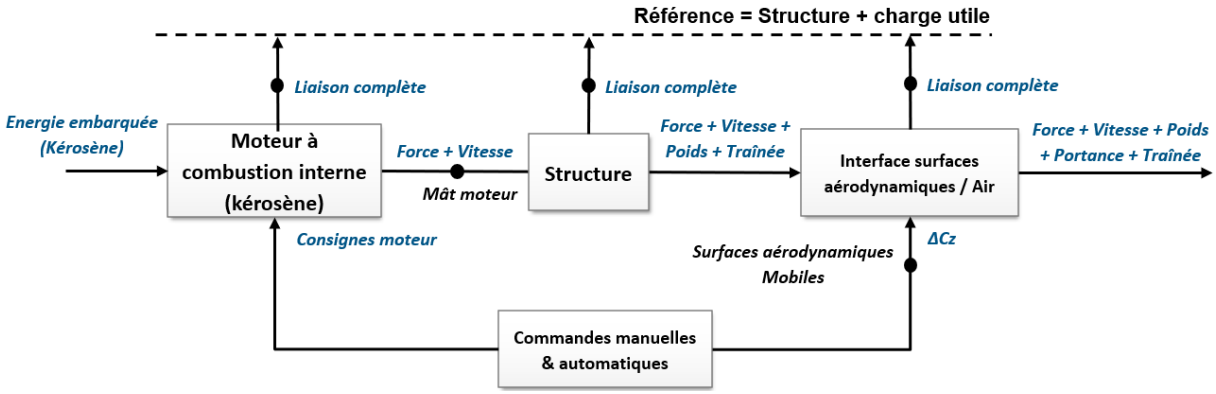
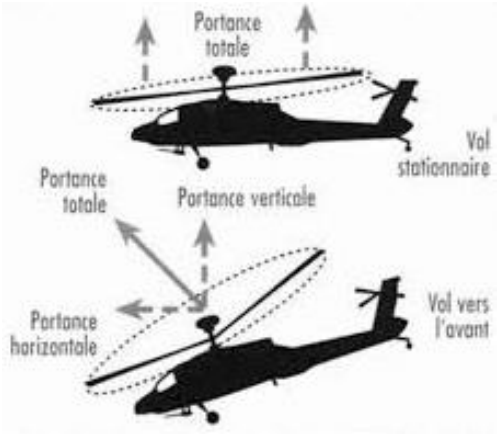


Fig. 29 Modèle CTOC de tête d'un avion de ligne.



Si l'avion de ligne exploite un couplage entre les propulseurs et la voilure qui exploite une partie de la poussée pour générer de la portance, d'autres phénomènes physiques peuvent être envisagés permettant d'explorer d'autres architectures. La mutualisation du moteur et de la voilure pour en faire une voilure tournante permet de mutualiser les fonctions de déplacement vertical et de déplacement horizontal du système en modifiant la direction de la portance générée par la voilure tournante, c'est l'architecture d'un hélicoptère. Comme l'ornithoptère, la portance est issue de la mise en mouvement de surfaces mobiles, cependant l'énergie est ici fournie par un moteur relié. Des organes de transmission de puissance délivrent l'énergie nécessaire à la mise en rotation des surfaces mobiles aérodynamiques. Cette solution de génération de portance nécessite l'intégration d'un élément de contrôle supplémentaire non nécessaire sur les avions commerciaux classiques, d'où l'intégration d'un rotor arrière pour contrer la rotation de l'hélice principale et stabiliser le système en vol. Le modèle CTOC ci-dessous représentant l'hélicoptère reflète cette architecture, le convertisseur (moteur) et le transmetteur (transmission de puissance) sont en liaison complète avec la structure tandis que la surface aérodynamique est en liaison pivot avec la structure. Les éléments de contrôle du système sont les consignes envoyées au moteur ainsi que les surfaces aérodynamiques mobiles et le rotor de queue.

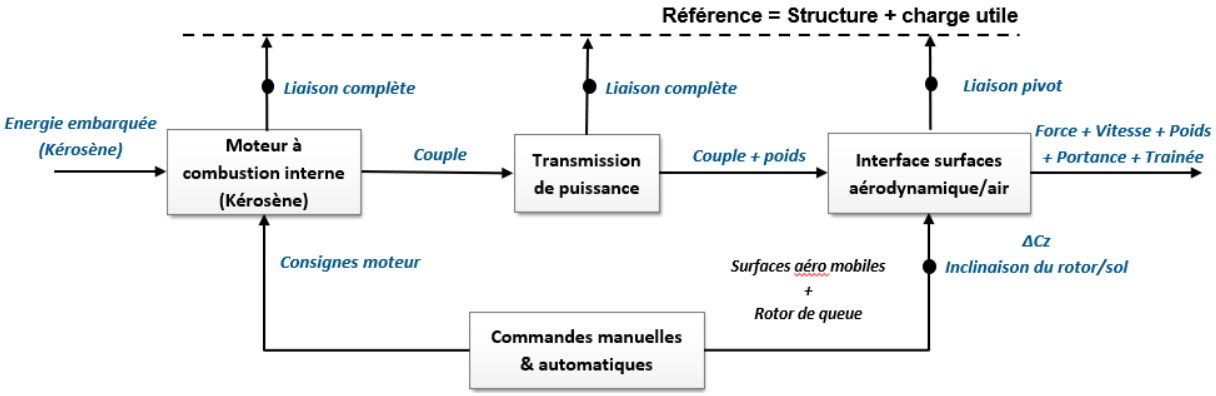


Fig. 30 Modèle CTOC de tête d'un hélicoptère.

A l'inverse on peut aussi complètement découpler les fonctions de déplacement horizontal et vertical, impliquant de réaliser ces deux fonctions séparément. Le girodyne correspond à cette architecture qui permet d'atteindre de grandes vitesses en déplacement horizontal tout en ne nécessitant pas de rotor de queue grâce aux propulseurs asymétriques. L'architecture du girodyne est à mi-chemin entre celui de l'aéronef propulsé à voilure fixe et l'aéronef à voilure mobile et forme la sous-catégorie d'aéronef propulsé à voilure mobile. Le vol du girodyne peut se décomposer en deux flux énergétiques : Un flux énergétique associé au déplacement horizontal et un flux énergétique associé au déplacement vertical. Le déplacement vertical est assuré par une architecture d'aéronef à voilure mobile, identique à celle d'un hélicoptère tandis que le déplacement horizontal est assuré par un double système propulsif. Ce double système propulsif combiné avec des surfaces aérodynamiques permet de supprimer la nécessité d'un rotor de queue. Si ces deux systèmes découplés permettent des déplacements dans des directions différentes, ils exploitent une même source d'énergie et sont soumis à des lois de pilotage communes. Les deux modèles CTOC ci-dessous décrivent ce comportement.



- Déplacement horizontal :

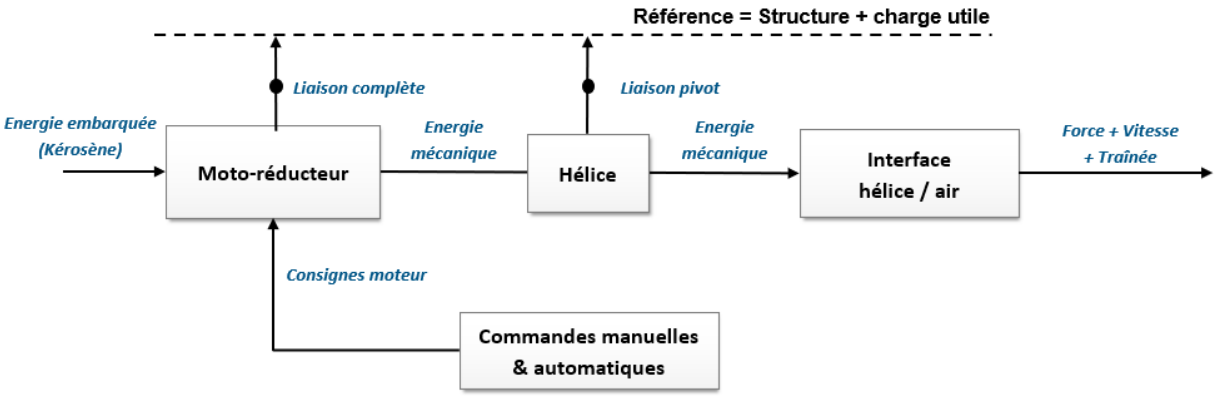


Fig. 31 Modèle CTOC de tête du déplacement horizontal d'un girodyne.

- Déplacement vertical :

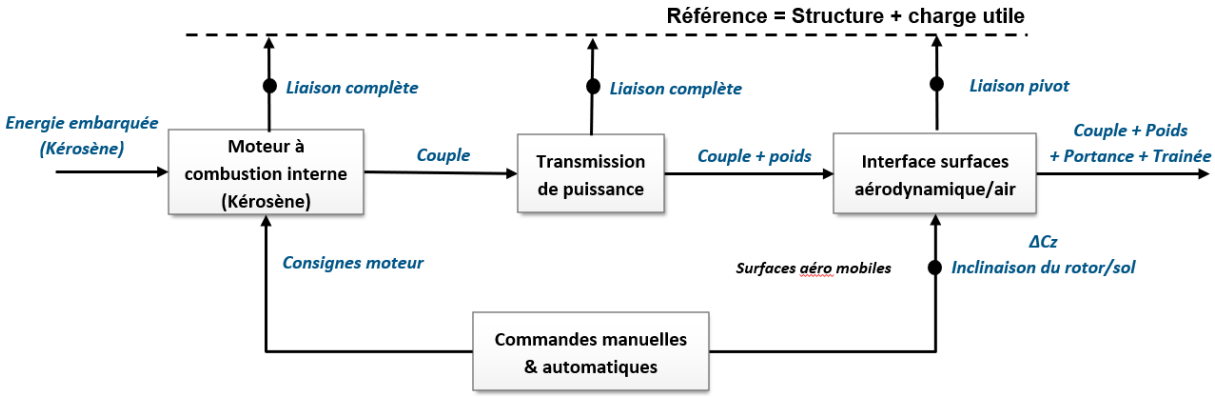
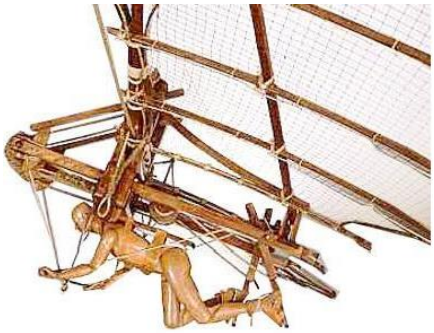


Fig. 32 Modèle CTOC de tête du déplacement vertical d'un girodyne.

4.3.3.2 Vecteur d'innovations architecturales



L'innovation peut parfois être spontanée mais elle est généralement l'aboutissement d'une série d'innovations mineures, d'une évolution de systèmes existants ou la conséquence d'une percée technologique débloquant des verrous identifiés. Le CTOC peut être un vecteur d'innovation en proposant un guide au concepteur pour l'évolution d'un système. En effet, le modèle permet de gérer les conséquences d'une modification du système. L'exploitation d'une source d'énergie biomécanique par exemple implique une modification de l'énergie d'entrée du modèle CTOC et du convertisseur associé. Si l'on envisage le cas d'une énergie biomécanique fournie par un être humain, différents types de propulsion sont possibles. Le pilote peut ne fournir qu'une impulsion initiale sans alimenter de propulseur, auquel cas l'architecture s'oriente vers celle d'un deltaplane qui exploitera l'énergie éolienne pour évoluer dans l'air. L'énergie fournie par le pilote peut aussi être convertie par le biais d'un propulseur mécanique entraîné par une transmission qui pourra alors produire un mouvement de rotation pour entraîner une hélice (avion à pédales Daedalus) ou un mouvement alternatif reproduisant le vol d'un oiseau (ornithoptère). On peut alors représenter cette dernière architecture par un modèle CTOC, les éléments de contrôle étant situés sur le rapport de transmission de puissance et sur l'angle donné à la voilure par le pilote.

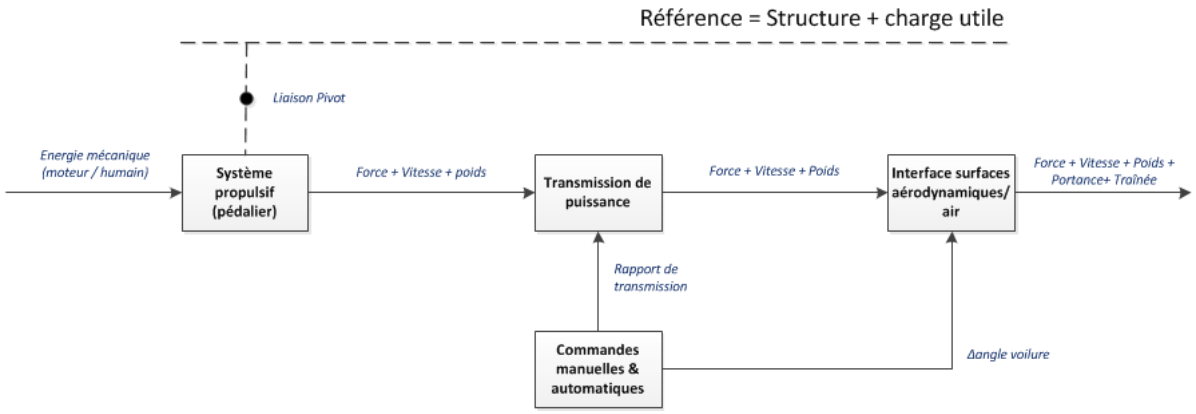


Fig. 33 Modèle CTOC de tête d'un ornithoptère.

Un oiseau peut d'ailleurs être représenté à l'aide du CTOC comme un système où l'énergie d'entrée est sous forme de calories, converties par ses muscles en une énergie mécanique transmise par le squelette jusqu'à ses ailes, organe opérateur de cette énergie pour permettre le vol. Le contrôle étant assuré sur les muscles par le cerveau de façon manuelle et automatique. On peut donc aussi envisager l'approche CTOC comme un vecteur des logiques de biomimétisme en l'utilisant pour représenter des mécanismes observables dans la nature.

Si l'on se penche sur l'exemple de l'hydrogène, plusieurs architectures sont possibles que le CTOC permet d'explorer. L'hydrogène peut être stocké sous deux formes, liquide ou gazeuse, chacune apportant avantages et inconvénients. En se basant sur le modèle CTOC d'un avion de ligne classique et en modifiant l'énergie d'entrée « kérosène » par hydrogène, on constate que la modification impacte immédiatement le choix du convertisseur. Deux convertisseurs majeurs sont disponibles pour exploiter l'hydrogène un moteur à combustion interne ou une pile à combustible générant de l'énergie électrique. L'utilisation d'un moteur à combustion interne permet de générer un couple ou une poussée, pouvant donc s'adapter facilement au modèle CTOC de référence. Le résultat est le modèle ci-dessous (Fig. 34) qui est proche de l'avion de ligne moderne.

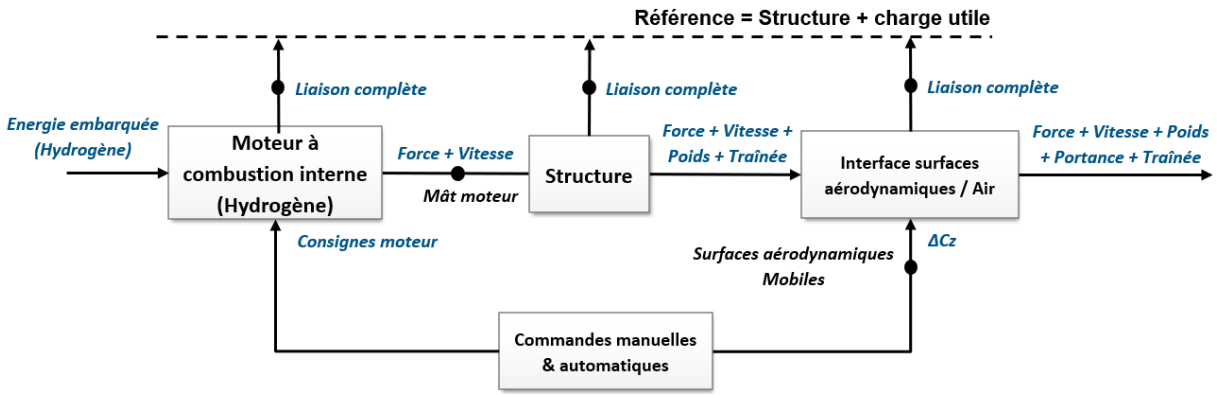


Fig. 34 Modèle CTOC d'un avion de ligne exploitant l'hydrogène, cas de l'architecture avec moteur à combustion interne.

Le choix de la pile à combustible convertit l'hydrogène en énergie électrique qui n'est pas directement exploitable par une architecture présentant un couplage entre le système propulsif et la surface portante, cette dernière nécessitant une poussée pour générer de la portance. Il faut donc intégrer un second convertisseur sur ce flux énergétique, un moteur électrique qui permettra de convertir cette énergie électrique en poussée. Le modèle ci-dessous (Fig. 35) détaille les étapes de conversion nécessaires à la génération de poussée si le concepteur choisit d'adapter la technologie de la pile à combustible à une architecture classique d'avion de ligne moderne.

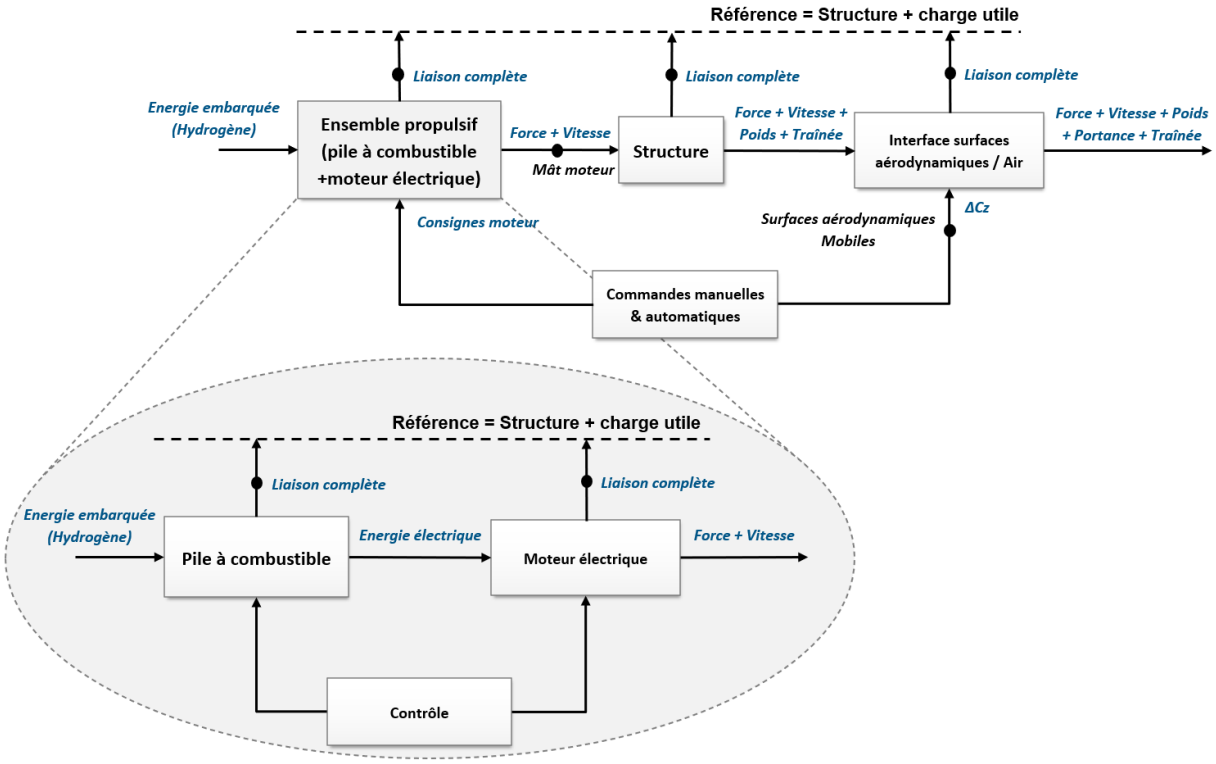


Fig. 35 Modèle CTOC d'un avion de ligne exploitant l'hydrogène, cas de l'architecture avec moteur électrique.

L'approche permet donc de travailler sur des systèmes et des architectures variées et de les discriminer au fur et à mesure des choix de conception. Le processus de conception décrit plus tôt permet à un concepteur d'aborder un système par les flux d'énergie qu'il souhaite mettre en jeu tout en maîtrisant les conséquences de ses choix et en conservant une traçabilité des différents embranchements de l'arborescence de conception. La méthodologie a aussi un potentiel en tant que vecteur d'innovation en offrant au concepteur la possibilité de comprendre les implications d'une modification d'un des éléments du cheminement énergétique du système étudié. Il est alors simple d'envisager une nouvelle source d'énergie, un nouveau mode de conversion ou d'opération de l'énergie tout en maîtrisant les conséquences de chaque choix sur l'architecture en cours de développement et ses possibilités d'évolution.

4.3.4 Conclusions

L'application du CTOC à ces différentes architectures permet de valider la robustesse de l'approche et sa capacité à mettre en avant les alternatives de conception. En effet, on constate que la suppression ou la création d'un lien énergétique ou de l'une des étapes du cheminement énergétique (Contrôler, Transmettre, Opérer, Contrôler) peut suffire à déterminer l'architecture représentée. Si l'on prend l'exemple de l'ornithoptère, de l'hélicoptère et du drone, on peut comprendre les évolutions successives de ces architectures par l'étude de leur modèle CTOC de tête. L'ornithoptère peut être considéré comme l'ancêtre de l'hélicoptère étant donné qu'il présente une voilure motorisée à mouvement alterné. Le pilote fait office de moteur et fournit la puissance nécessaire à la mise en mouvement alterné de la voilure. L'intégration d'un moteur et d'un carburant ont permis au pilote de ne plus avoir à fournir d'énergie à la voilure, dont le mouvement est alors devenu rotatif. Cela se traduit sur le modèle CTOC par une boucle de contrôle liée au système propulsif et par la liaison de la transmission et de la surface aérodynamique à la référence. Enfin, les motorisations et les voilures ont été multipliées pour augmenter la contrôlabilité et le dynamisme du système, donnant naissance aux drones et par extension aux architectures tilt rotor. Cela se traduit par un renforcement de la boucle de contrôle sur les systèmes propulsifs et par la suppression de la boucle de contrôle sur les surfaces aérodynamiques, étant donné que les rotors multiples suppriment la nécessité d'un rotor de queue.

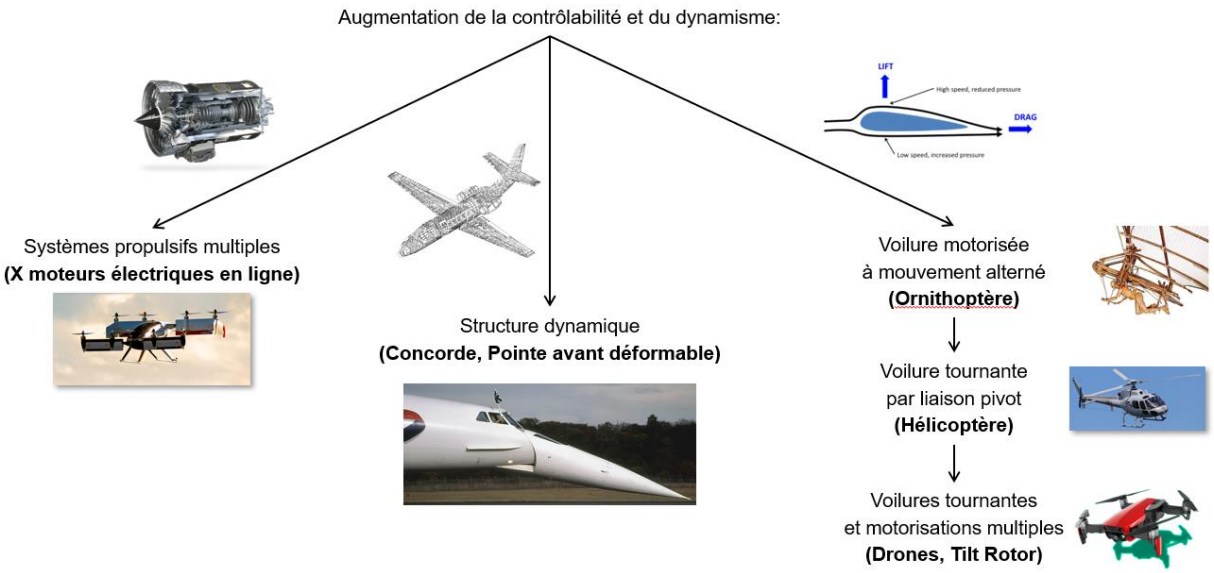


Fig. 36 Mise en évidence des alternatives d'architectures aéronautiques.

Si certaines architectures comme l'avion de ligne et le drone (voilure) semblent identiques lorsque l'on observe leur modèle CTOC, c'est parce que leurs différences

architecturales se situent à un niveau d'abstraction inférieur à celui représenté. Pour cet exemple, les différences vont apparaître lorsque le concepteur s'attachera à décrire les cheminements énergétiques liées au transport de charge utile inexistants pour le drone ou encore lorsqu'il cherchera à représenter les boucles de contrôle de ces architectures.

Cette formalisation du processus de conception par l'approche CTOC met en avant les opportunités de recherche d'architecture que la méthodologie apporte. Le CTOC offre un cadre de conception robuste permettant de tracer les choix d'architecture et des outils d'explorations d'architectures originales par le biais des couplages, découplages et hybridations de systèmes. Ainsi, si cette première application du CTOC au domaine aéronautique a permis de confirmer son potentiel dans l'accompagnement des architectes et des concepteurs en général dans l'identification d'alternatives de conceptions, elle renforce aussi le besoin de valider la capacité de la méthode à représenter un système de façon exhaustive. La suite de ce document va donc se concentrer sur l'application du CTOC à une architecture donnée afin de vérifier sa capacité à la représenter de façon cohérente et à pouvoir se déplacer dans les niveaux d'abstractions de la représentation construite.

4.4 APPLICATION DU CTOC A UNE ARCHITECTURE D'AERONEF MODERNE

4.4.1 Introduction

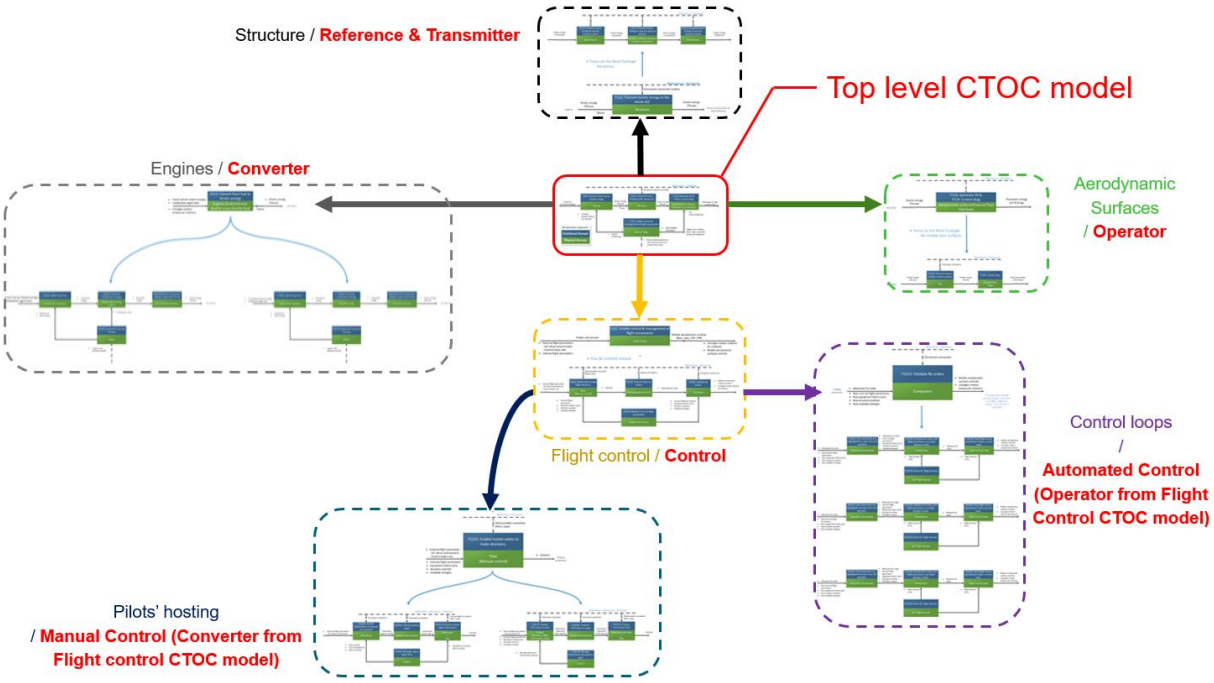


Fig. 37 Vue globale de la représentation CTOC appliquée au produit avion.

La complexité du produit se traduit ici par le fait que le système est composé de nombreux sous-ensembles, de composants majeurs et mineurs et de multiples flux d'énergie essentiels. Toute représentation d'un système présentant ces caractéristiques sera vaste et composée de très nombreuses entités qu'il conviendra de gérer. Aussi, une contrainte dans la représentation d'un système complexe est d'offrir au concepteur la possibilité de se déplacer dans les niveaux d'abstraction de l'aéronef afin de pouvoir travailler au niveau de détail voulu. Bien qu'elle n'ait pas vocation à présenter les détails du système étudié, l'illustration ci-dessus (Fig. 37) met en évidence les niveaux d'abstraction de la représentation et les grands ensembles du produit.

Le but de cette étude est de construire une représentation liant les domaines fonctionnels et physiques d'un produit aéronautique, avec l'objectif de réunir des éléments permettant de maîtriser la séquence d'assemblage. Avant de construire le modèle CTOC, nous devons identifier les fonctions attendues du système. Ainsi, nous réalisons une analyse menant à la création d'une vue fonctionnelle partielle du produit, composées de fonctions de haut niveau du produit (Fig. 38).

Fonctions de haut niveau de l'avion	
Numéro de Fonction	**Description**
Fonction principale	Transporter la charge utile grâce à un vol contrôlé.
F1	Permettre les déplacements au sol et en vol.
F11	Générer dela portance une fois propulsé dans de l'air.
F12	Permettre un vol contrôlé.
F2	Accueillir la charge utile.

Fig. 38 Arborescence fonctionnelle partielle de l'avion. Seules les fonctions externes de haut niveau sont exprimées.

La fonction principale du produit est « *Transporter une charge utile grâce à un vol contrôlé* » et la fonction associée au vol de l'aéronef est la fonction F11 « *Générer de la portance en étant propulsé dans l'air* ». Le produit décrit utilise du carburant fossile comme source d'énergie embarquée, ainsi l'approche énergétique mène au modèle boîte noire suivant :

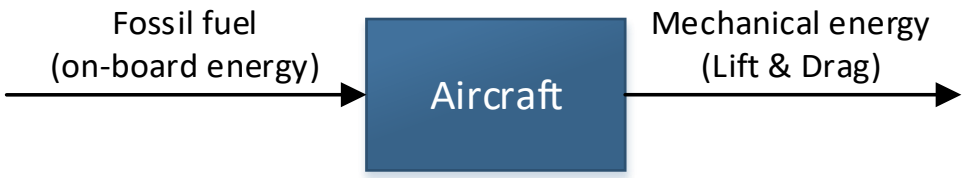


Fig. 39 Modèle boîte noire, flux d'énergie primaire de l'aéronef.

4.4.2 Sujet de l'étude

L'architecture décrite est un bimoteur à voilure basse classique (Fig. 40) équivalente à celle décrite précédemment dont le modèle CTOC suivant peut servir de support à la compréhension.

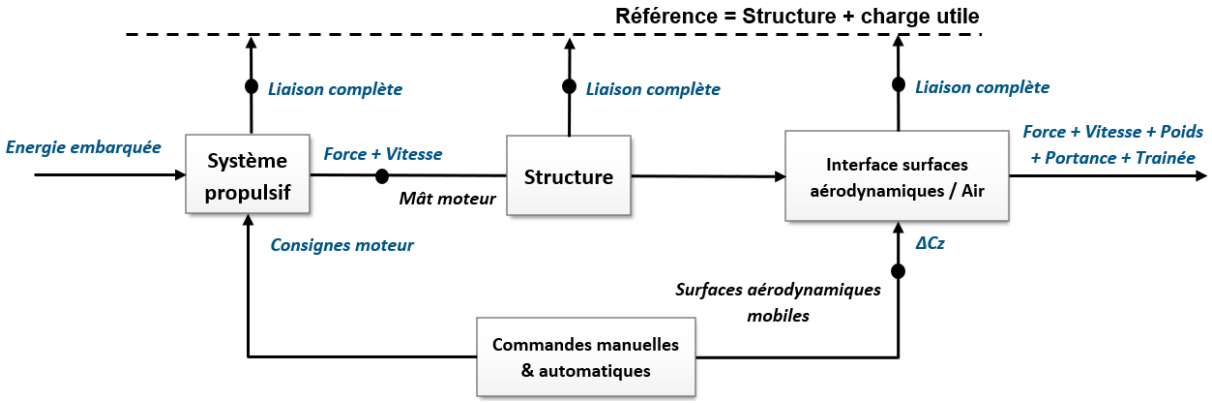


Fig. 40 Modèle CTOC de tête d'un avion de ligne moderne.

La source d'énergie est du carburant liquide embarqué dans des réservoirs. Ce carburant est converti en énergie cinétique (poussée) par les moteurs, cette énergie est transmise à l'ensemble de l'appareil par le biais de la structure. Finalement, une partie de cette énergie est transmise à la peau de l'aéronef qui représente l'interface avec le fluide extérieur, lui procurant

une vitesse relative générant de la portance et de la trainée (trainée de friction et trainée induite). La charge utile transportée par le produit est en connexion permanente avec la structure, elle subit donc aussi la poussée, la trainée et la portance. Elle est ainsi transportée par l'aéronef en volant. Les générations de poussée, de trainée et de portance sont manuellement contrôlées par les pilotes et automatiques contrôlées par des ordinateurs intégrant des boucles de contrôle.

4.4.3 Domaine fonctionnel / Domaine physique

Les différents niveaux de décompositions fonctionnelles lient les domaines fonctionnels et physiques et permettent de garder une traçabilité des justifications de choix d'architecture. Les paragraphes suivants montrent la marche à suivre pour l'application de l'approche CTOC sur un système complexe avec des multi niveaux et sera appliquée à une pointe avant d'avion.

A partir du modèle boîte noire présenté précédemment (Fig. 39), on décompose la fonction F11 en un modèle CTOC de niveau d'abstraction inférieur. Comme le préconise l'approche, la représentation juste nécessaire de la fonction F11 est composée d'un convertisseur, d'un transmetteur, d'un opérateur et d'un élément de contrôle. Chaque entité est associée avec un composant physique et une sous-fonction afin de maintenir la cohérence du flux énergétique. Le carburant fossile est converti par les moteurs en énergie cinétique, transmise ensuite par la structure jusqu'aux surfaces aérodynamiques, générant finalement de la portance et de la trainée. Les contrôles des moteurs et des surfaces aérodynamiques sont assurés par des boucles de contrôle qui seront détaillées plus loin dans le document (Fig. 41).

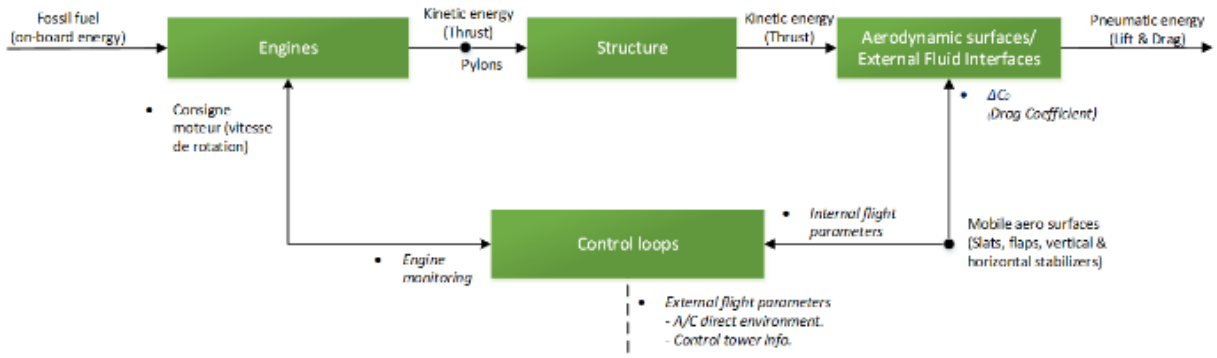


Fig. 41 Modèle CTOC en cours de construction, seules les entités du domaine physique sont représentées.

Ce modèle CTOC de haut niveau développe le flux énergétique associé à la fonction F11 étudiée. Il décrit les éléments d'architecture nécessaires à la réalisation de la fonction. C'est une représentation juste nécessaire des éléments physiques nécessaires au cheminement énergétique décrit par la fonction F11. Cependant, si l'on veut étudier le système plus en détail,

il est nécessaire de descendre plus bas dans les niveaux d'abstraction, aussi bien pour la décomposition physique du système que pour sa décomposition fonctionnelle.

A partir du modèle ci-dessus (Fig. 41), on peut déduire des sous-fonctions associées aux composants représentés. Par exemple, le cheminement énergétique convertit un carburant fossile en énergie cinétique. Cette conversion est assurée par les moteurs qui, s'ils sont représentés comme une boîte noire, convertissent le carburant fossile qu'ils reçoivent en une énergie cinétique. La fonction associée au composant physique « Moteurs » est donc F111 « Convertit le carburant fossile en énergie cinétique ». En faisant de même pour les autres composants représentés, on construit un niveau d'abstraction de la décomposition fonctionnelle. Le nouveau modèle CTOC se présente alors ainsi :

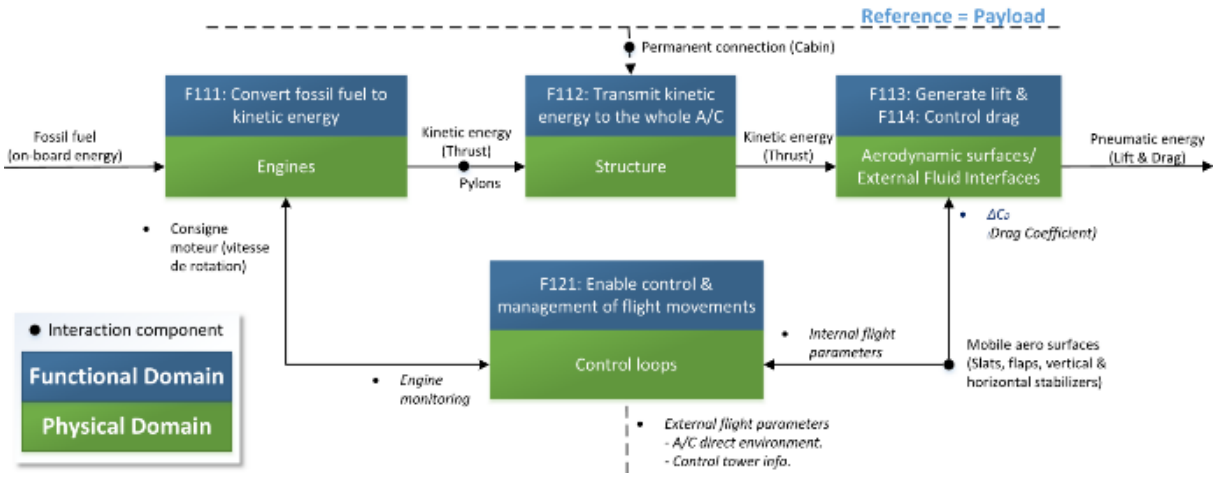


Fig. 42 Modèle CTOC complet de la pointe avant d'un aéronef commercial.

Ce modèle CTOC maintenant complet décrit le cheminement énergétique associé à la fonction F11 et représente les composants physiques et fonctionnels du niveau d'abstraction suivant. Il met en avant les liens entre les domaines fonctionnels et physiques en liant les entités correspondantes et en décrivant les entrées et sorties du cheminement énergétique pour chaque entité. Si nécessaire, des composants d'interaction complètent cette description afin d'en clarifier l'architecture, mais aussi pour améliorer la cohérence avec les niveaux d'abstraction inférieurs qui pourraient être construits.

L'arborescence fonctionnelle qui ne décrivait jusqu'à présent que les fonctions externes de haut niveau du système se retrouve enrichie d'un nouveau niveau d'abstraction fonctionnelle. Ces nouvelles fonctions ont été exprimées simultanément avec la construction de l'architecture physique du produit, liant de fait ces deux représentations du système. La nouvelle arborescence fonctionnelle se présente alors ainsi :

Fonctions de haut niveau de l'avion	
Numéro de Fonction	**Description**
Fonction principale	Transporter la charge utile grâce à un vol contrôlé.
F1	Permettre les déplacements au sol et en vol.
F11	Générer dela portance une fois propulsé dans de l'air.
F111	Convertir un carburant fossile en énergie cinétique.
F112	Transmettre de l'énergie cinétique à des surfaces aérodynamiques.
F113	Générer de la portance.
F114	Limiter la traînée.
F12	Permettre un vol contrôlé.
F121	Permettre la surveillance et le contrôle des paramètres de vol.
F2	Accueillir la charge utile.

Fig. 43 Arborescence fonctionnelle du système. Les fonctions issues de la représentation CTOC enrichissent la vue fonctionnelle.

4.4.4 Application de l'approche CTOC à une entité spécifique

La suite du processus de conception consiste à choisir certaines entités du modèle CTOC de tête et à les décomposer pour décrire un niveau d'abstraction inférieur. En suivant le même processus que décrit précédemment, cela permet de raffiner simultanément la représentation physique et la représentation fonctionnelle du système. Chaque nouveau niveau d'abstraction décrit permet de décrire de nouveaux éléments, et donc de descendre d'un niveau d'abstraction dans la représentation globale du système. Dans le but de garantir la cohérence de la représentation au travers des différents niveaux d'abstraction, il est nécessaire d'identifier de façon exhaustive les flux d'énergie entrants et sortants de l'entité étudiée et de les reporter sur le modèle de niveau d'abstraction inférieur. Ainsi, sur l'exemple ci-dessous (Fig. 44) où l'on cherche à décrire les composants de l'entité « Contrôle » du modèle CTOC de tête, on commence par l'isoler. Les flux d'énergie entrants sont les paramètres de vol interne et externe, les flux d'énergie sortants sont les consignes envoyées aux moteurs et les contrôles effectuées sur les surfaces aérodynamiques mobiles. Ces flux d'énergie se retrouvent en tant que donnée d'entrée et de sortie sur le modèle CTOC décrivant l'entité « Contrôle », garantissant la cohérence entre les niveaux d'abstraction du produit.

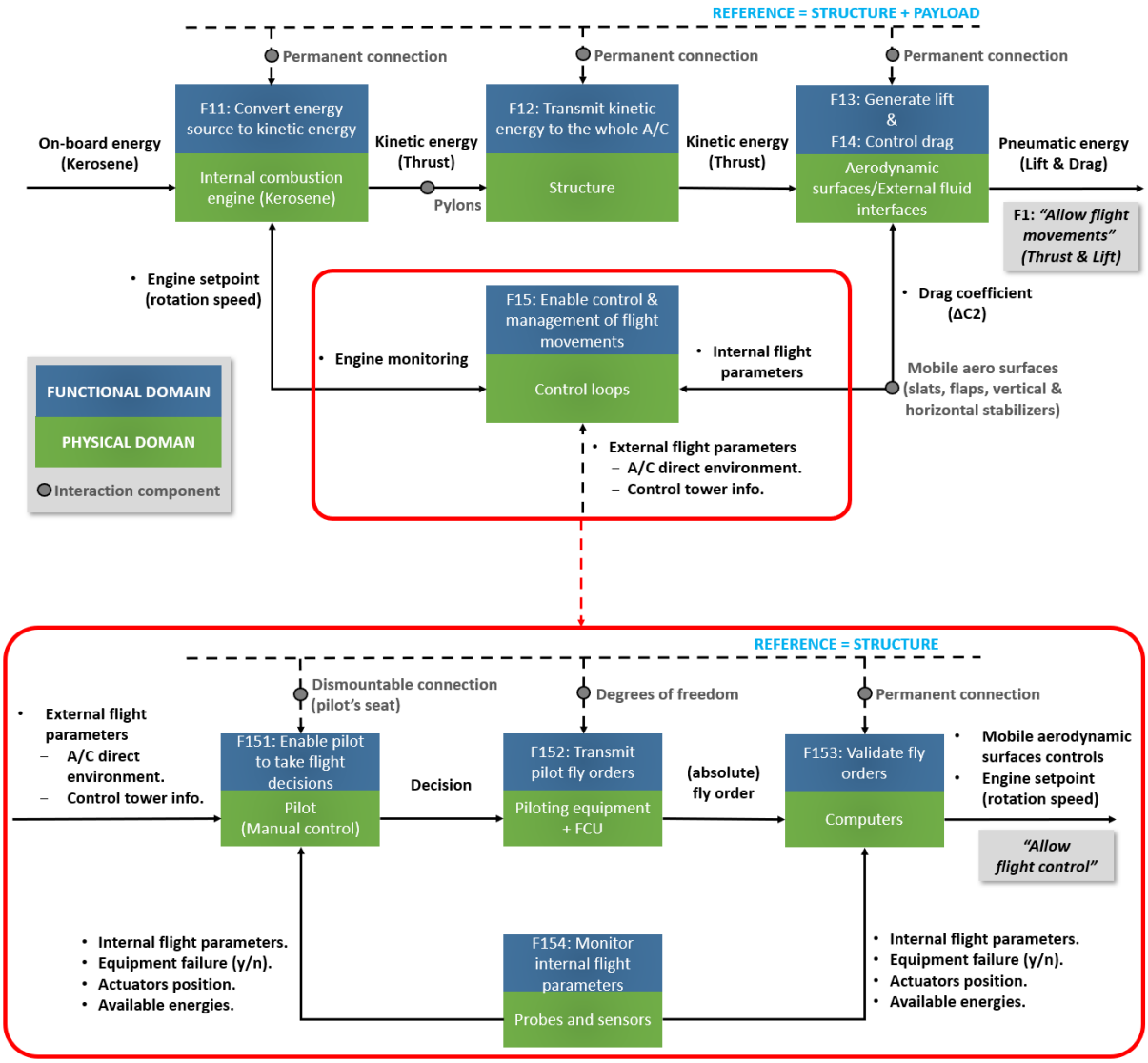


Fig. 44 Illustration du mécanisme de description de l'entité « Contrôle » d'un modèle CTOC.

Choisissons à titre d'exemple de décomposer le composant physique « Structure » du modèle CTOC de tête (Fig. 42). En isolant la boîte correspondante et les flux entrants et sortants associés, on retrouve l'équivalent d'un modèle boîte noire. Le modèle ci-dessous (Fig. 45) servira de base à la décomposition vers un niveau d'abstraction inférieur.

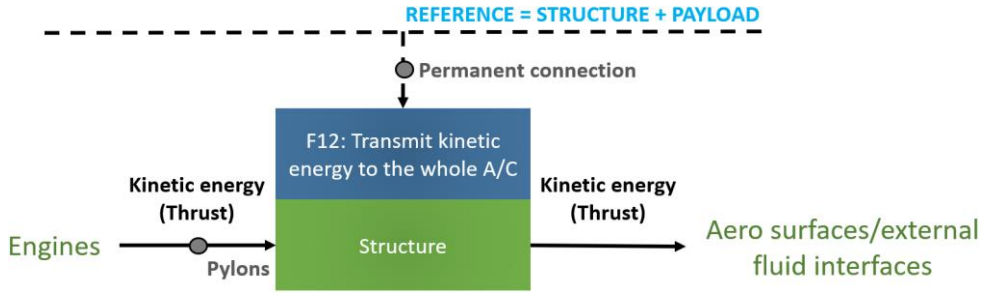


Fig. 45 Modèle boîte noire du composant « Structure » isolé du modèle CTOC de tête.

Lors de la construction du modèle CTOC suivant, il faudra veiller à garder une cohérence entre les deux niveaux d'abstraction. Ainsi, les flux d'énergie entrant et sortant devront se retrouver dans le nouveau modèle construit et, si des contraintes ou des composants d'interaction apparaissent dans l'architecture d'origine, ils doivent être conservés. La décomposition du composant « Structure » permet de construire le modèle CTOC suivant (Fig. 46) :

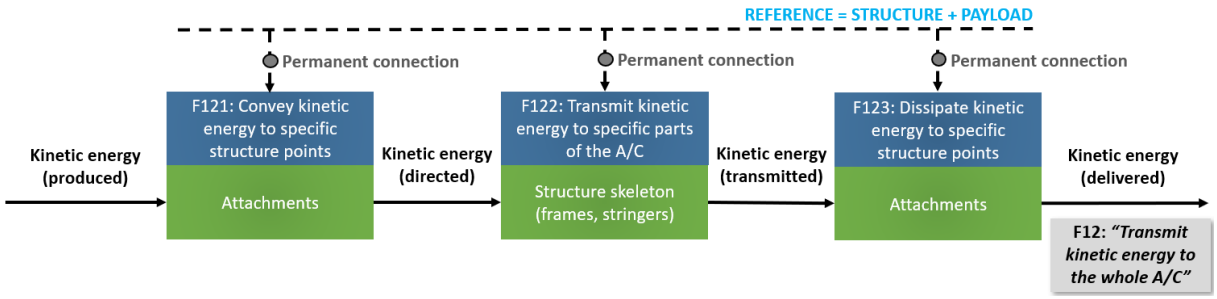


Fig. 46 Modèle CTOC de niveau d'abstraction -1 issu de la décomposition du composant « Structure » du modèle CTOC de tête.

4.4.5 Fonction de contrôle manuel / Cockpit

La fonction "Contrôle", composée d'un flux de contrôle manuel et d'un flux de contrôle automatique, requiert la représentation d'un composant de contrôle manuel (i.e. les pilotes) et d'un composant de contrôle automatique (i.e. les ordinateurs). La décomposition du flux de contrôle manuel se sépare en deux représentations : (i) un flux optique d'informations pour le contrôler visuel direct par les pilotes et (ii) un flux d'informations audio et optique transmises par les équipements du cockpit. Ces deux représentations sont nécessaires malgré un flux d'information optique dans les deux car ils sont de natures différentes. Le premier est transmis par le pare-brise jusqu'à l'œil du pilote tandis que le second est transmis par des équipements dédiés (écrans, outils de navigation, signal lumineux).

Le premier flux impose une position spécifique au pilote lui permettant d'effectuer des contrôles visuels de l'environnement direct de l'avion. Pour que le pilote puisse voir l'extérieur, il doit être à proximité du pare-brise. La meilleure position pour pouvoir observer l'environnement est à l'avant de l'avion, en zone haut de la pointe-avant, ce qui fige la position du cockpit avec ces contraintes. Le deuxième flux implique que les équipements qui fournissent des informations au pilote doivent se trouver à proximité de ces derniers. La position des pilotes étant contrainte par la position du pare-brise, les équipements qui transmettent l'information doivent être intégrés au cockpit. Nous pouvons alors comprendre que le flux de contrôle a contraint la création du cockpit, composé d'un pare-brise, des pilotes et des équipements

transmetteurs d'information, le tout en position haute de la pointe avant, à l'avant de l'appareil. La décomposition fonctionnelle par une approche énergétique d'un système permet donc de comprendre les choix d'architecture et d'en conserver la traçabilité.

4.4.6 Fonction de contrôle automatisé / Baie avionique

Finalement, d'après le chemin énergétique minimum recommandé par le modèle CTOC, les pilotes et les équipements de contrôle du vol étant contraints par l'architecture décrite plus tôt, les calculateurs et les équipements associés doivent être proches les uns des autres et proches du cockpit. La position retenue pour cette baie avionique est donc logiquement la partie inférieure de la pointe avant de l'appareil. La baie avionique pourrait être déplacée dans l'avion pour réduire le cheminement énergétique avec les capteurs des moteurs ou de la voilure par exemple, mais cela se ferait au détriment du cheminement énergétique vers le cockpit, moyennant aussi une variation de la masse.

4.4.7 Alternatives d'architecture

Sur la base des décompositions fonctionnelles successives, nous avons décrit avec succès un système connu à travers plusieurs niveaux d'abstraction et liés chaque fonction et sous-fonction à un ou plusieurs composants. De plus, la mise en avant de ces liens met en évidence les contraintes fonctionnelles qui mènent à l'architecture de la pointe avant étudiée, renforçant le lien entre les domaines fonctionnels et physiques et permettant une traçabilité des choix de conception. Il devient alors possible de générer des alternatives d'architecture en choisissant un nouveau composant pour remplir une fonction, en modifiant sa position ou encore en agrégeant des composants remplissant une même fonction (notion de modules). Le cheminement énergétique et le lien entre les domaines fonctionnel et physique mis en lumière par l'application du CTOC sont conservés.

Tracer les contraintes fonctionnelles d'une architecture donnée permet de la remettre en cause. Par exemple, ici la position du pilote est à l'avant de l'appareil, en position haute de la pointe avant. Cette position est imposée par le besoin de contrôle visuel direct de l'environnement de l'avion, nécessitant un pare-brise en pointe avant. Hypothétiquement, nous pourrions utiliser des capteurs avancés pour simuler un contrôle visuel direct, en admettant que les règles de certification le permettent et que la technologie soit disponible.

Cette innovation libérerait la contrainte de position du cockpit qui pourrait être relocalisé ailleurs dans l'avion. Par exemple, de façon à réduire le cheminement énergétique, il

pourrait être déplacé plus proche des surfaces mobiles ou des générateurs de poussée, permettant des économies de masse grâce à la suppression de plusieurs mètres de câbles et tuyauteries. Globalement, cette modification pourrait améliorer les performances d'assemblages, de maintenance ainsi que les performances opérationnelles du système. Cela libérerait aussi de l'espace dans la pointe avant qui pourrait être utilisé pour d'autres fonctions, par exemple une zone d'accueil des passagers ou de l'équipage, ou encore pour se libérer de contraintes techniques locales telles que celles imposées par le train d'atterrissage et la case de train.

Si nous étions aussi capables de supprimer le besoin d'une fonction de contrôle manuel de l'avion, il serait facile de retracer les contraintes imposées par cette fonction. La suppression du contrôle manuel supprime la nécessité d'héberger des pilotes. Il ne serait alors plus nécessaire de produire et transmettre des informations à un être humain. Au final, c'est l'intégralité du cockpit qui est remis en question par la suppression de la sous-fonction de contrôle manuel et l'adaptation de la fonction de contrôle automatique.

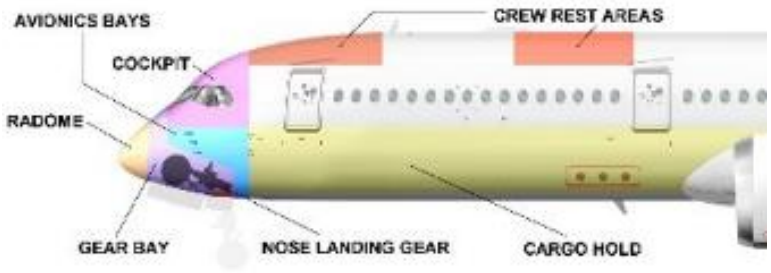


Fig. 47 Architecture de la pointe avant d'un A350.

4.5 REPRESENTATION DES BOUCLES DE CONTROLE

4.5.1 Lois d'asservissement du système

L'application du CTOC à un système complexe a permis d'explorer une nouvelle application potentielle de la méthode. En effet, un système complexe présentant plusieurs flux d'énergies primaires nécessite des boucles de contrôles et de sécurité. Les fonctions de contrôle et les composants associés sont nombreux, redondants par sécurité et évoluent en fonction du cas d'exploitation du système. Ils ne peuvent donc pas être représentés par un unique composant de contrôle, il est nécessaire de décomposer la fonction de contrôle de l'aéronef en niveaux d'abstractions inférieurs, de construire de nouveaux modèles et les sous-fonctions et sous-composants associés. Cela permettra de garder la cohérence de l'approche à tous les niveaux

d'abstraction mais aussi de conserver le cheminement énergétique entre les différents sous-ensembles de l'avion.

L'approche CTOC telle que décrite dans la littérature n'a pas été confrontée à des systèmes présentant ce type de complexité et ne préconise donc pas d'approche particulière quant à la modélisation de boucles de contrôles complexes. Dans le cas d'un aéronef, si les pilotes surveillent en permanence les paramètres de vol de l'avion et peuvent prendre la main pour un contrôle manuel des différents actionneurs ils ne sont pas le mode de contrôle principal du système. En effet, ce dernier est automatisé et réalisé par des ordinateurs et des calculateurs. Ceux-ci reçoivent les mêmes informations que les pilotes et surveillent en permanence le vol de l'appareil. Ils connaissent le domaine de vol de l'aéronef, ont des capacités de calcul puissantes et peuvent planifier des trajectoires complexes. Tout ceci permet à ces organes de contrôle de prendre des décisions garantissant une sécurité maximale pour le système et ses occupants, tout en optimisant les trajets pour une consommation minimale de carburant et un confort de vol maximal.

Il existe trois cas d'asservissement en fonction du cas d'exploitation du système et des consignes données par les pilotes :

- **Cas I – Pilotage :** Le pilote entre directement des consignes de vol dans le système. Qu'il s'agisse d'une interaction avec les organes de pilotage tels que les palonniers, le manche, le guidon ou bien qu'il rentre des consignes de vol, le pilote détermine la trajectoire de l'avion. Une spécificité des appareils produits par Airbus est que même dans ce cas de contrôle manuel, l'ordinateur peut refuser un ordre spécifique du pilote s'il met en danger l'appareil. Très concrètement, si le pilote donne la consigne à l'avion de piquer vers le sol avec un angle trop important et que l'altitude est suffisamment faible, la consigne sera refusée par l'avion qui maintiendra un vol sécurisé. Ce premier cas est celui où l'ordinateur intervient le moins dans le pilotage de l'appareil.
- **Cas II – Guidage :** Il s'agit d'un pilote automatique limité. Le pilote donne différentes consignes au système telles que l'altitude, la vitesse, la consommation moyenne ou encore la pente souhaitée et l'ordinateur agira en conséquence sur les différents actionneurs. Tant que ces consignes sont en vigueur, l'appareil continue de les respecter. Dans ce mode d'asservissement, l'ordinateur n'a pas nécessairement de notion de trajet, il vole en respectant les consignes données tant

qu'elles respectent son domaine de vol connu et que l'intégrité de l'appareil n'est pas compromise.

- **Cas III – Navigation :** Appelé « Flight Monitoring », le pilotage automatique est total. Le pilote donne en plus des consignes décrites pour le cas II des consignes de destination et d'étapes si nécessaire. L'ordinateur sait donc en détail où il doit aller et quelles sont les consignes à respecter pendant le trajet, il se rendra à sa destination sans nécessiter de nouvelle action de la part du pilote tant que son domaine de vol connu est respecté et que l'intégrité de l'appareil n'est pas compromise.

4.5.2 Limite de modélisation par l'approche CTOC

Ces trois cas représentent donc des modes d'asservissement et d'exploitation différents et leur représentation par l'approche CTOC n'est pas triviale. En isolant la partie « Contrôle » du modèle CTOC de tête de l'avion (Fig. 48), on obtient le modèle boîte noire suivant :



Fig. 48 Modèle Boîte de la partie « Contrôle » isolée du modèle CTOC de tête.

Comme décrit plus tôt, quel que soit le cas de contrôle (Pilotage, Guidage ou Navigation) des paramètres du vol sont mesurés, transmis aux pilotes et aux ordinateurs. Le pilote donne des consignes via les équipements de pilotage et le Flight Control Unit (FCU), lesquelles sont envoyées aux ordinateurs à bord qui valident ou non la consigne en fonction de leurs propres restrictions de sécurité. Ce n'est qu'après cette étape que les consignes sont envoyées ou non aux différents actionneurs. Représenter ce cheminement d'information sous forme de cheminement énergétique nous permet de construire le modèle CTOC suivant (Fig. 49):

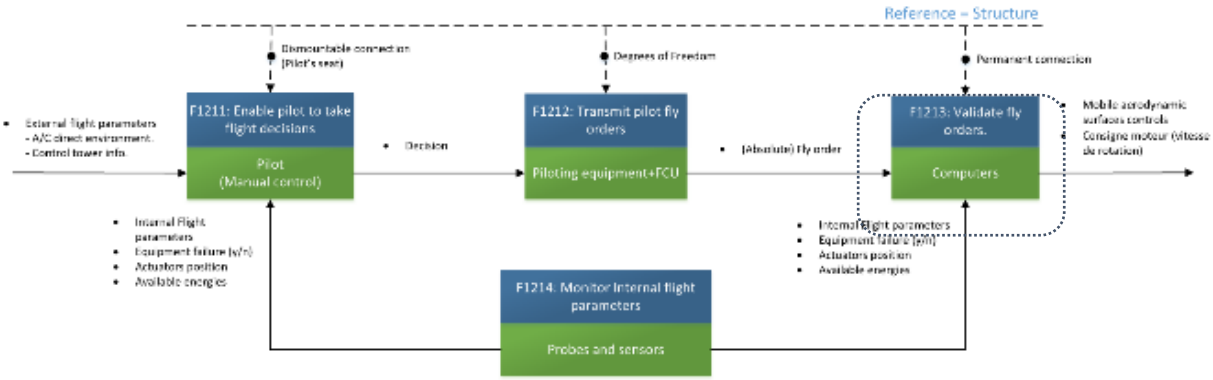


Fig. 49 Modèle CTOC de la boucle de contrôle du vol d'un avion de ligne classique.

Les entités « Pilotes », « Equipements de pilotage+FCU » et « Sondes et capteurs » de ce modèle peuvent être traitées par l'approche CTOC classique via des décompositions successives, cependant la boîte « Ordinateurs » est moins évidente à décomposer. En effet, celle-ci renferme les lois de pilotage décrites précédemment et les boucles d'asservissement associées. En l'état, l'approche CTOC ne garantit pas de représenter ce type de cheminement énergétique par un modèle CTOC. En cherchant à modéliser les consignes de vol par une approche énergétique, celles-ci seraient représentées par un flux d'information. Ceux-ci peuvent être de différentes natures (flux optique, flux audio, signal électrique). Appliquons cette logique à l'entité isolée « Ordinateurs » dans le but d'en faire la décomposition et la représentation, nous obtenons le modèle boîte noire suivant (Fig. 50):

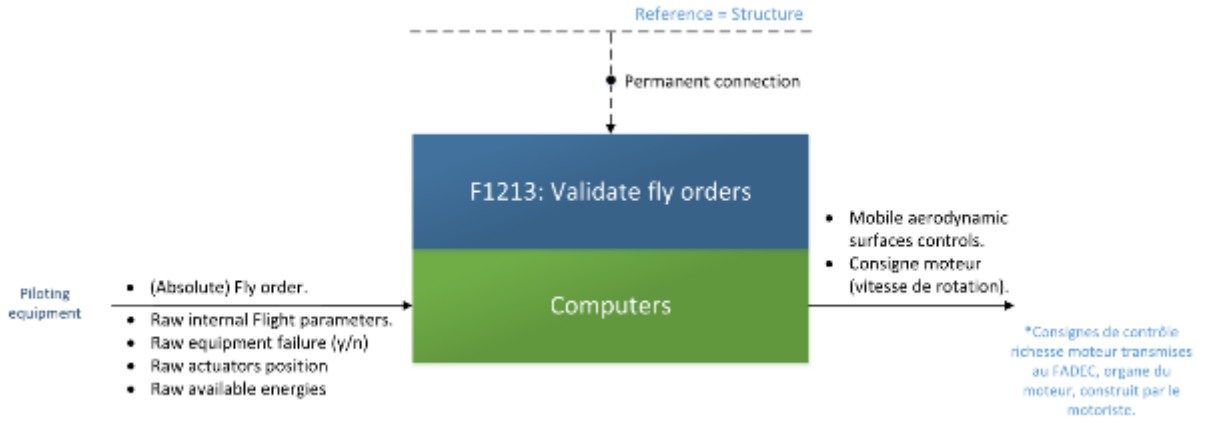
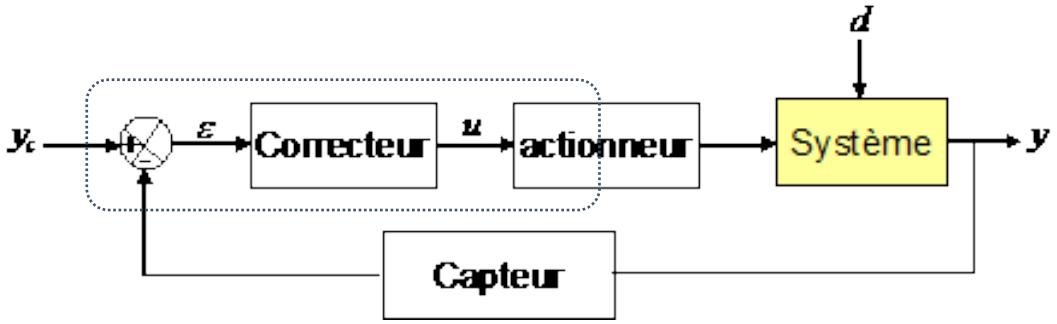


Fig. 50 Modèle boîte noire des ordinateurs de bord d'un avion de ligne.

A partir de ce niveau de représentation, il n'est plus possible d'appliquer l'approche CTOC sans la développer spécifiquement pour représenter des logiques d'asservissements. En effet, il n'existe pas à proprement parler de convertisseur, de transmetteur, d'opérateur ni de contrôleur à représenter dans la boucle d'asservissement. Cependant, dans une logique de cohérence avec la représentation du système dans son ensemble, nous cherchons à définir une

façon de représenter la boucle d'asservissement qui permette une continuité du cheminement énergétique déjà modélisé. Quelle serait la bonne façon de modéliser des boucles d'asservissements complexes dans un système lui-même complexe ?

4.5.3 Représentation classique des schémas d'asservissement



y_c : Consigne.

$\varepsilon = y_c - y$: Signal d'erreur (écart entre la consigne et la sortie du système).

Correcteur : Elabore la loi de commande u.

Actionneur : Applique la commande au système. Joue en général le rôle d'amplificateur de puissance.

y : Sortie du système ou grandeur à asservir.

Fig. 51 Schéma de principe d'un asservissement (INSA).

Pour répondre à cette question, nous proposons un développement de l'approche CTOC, basée sur les modélisations d'asservissement classiques. Nous cherchons à représenter les éléments de l'asservissement qui participent au cheminement énergétique, en l'occurrence au cheminement du flux d'information. Si l'on observe le schéma ci-dessous, on constate que certains éléments d'une boucle d'asservissement sont déjà pris en compte dans notre modèle. Les actionneurs sont modélisés spécifiquement dans les décompositions fonctionnelles correspondantes (Surfaces aérodynamiques mobiles – Annexes 1 et 2, FADEC moteurs – Annexes 3, 4, 5, 6 et 7). Les capteurs sont représentés au niveau d'abstraction supérieur (Fig. 49), il s'agit de la partie « Contrôle » du modèle CTOC. Les éléments manquant à représenter sont donc :

- L'acquisition des données.
- Le comparateur.
- Le correcteur.

4.5.4 Proposition d'évolution de la méthode CTOC

Nous proposons donc une évolution de l'approche CTOC permettant de représenter une boucle d'asservissement.

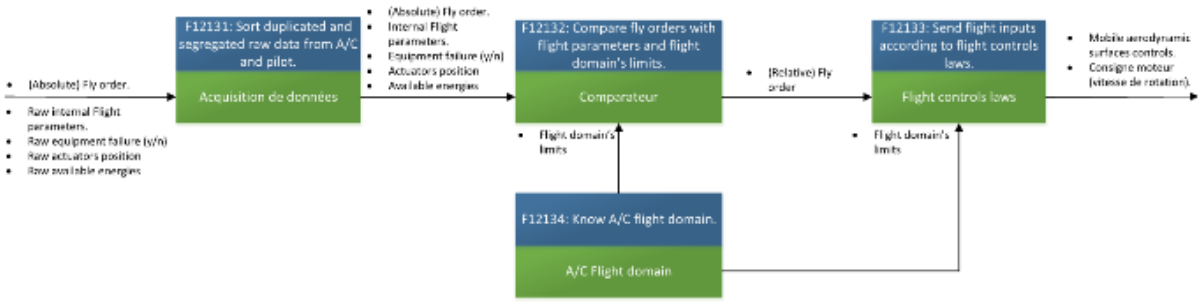


Fig. 52 Modèle CTOC de l'asservissement du vol d'un avion de ligne.

L'acquisition de données peut être assimilée à un élément de stockage qui va réceptionner les données brutes provenant de l'ensemble du système et les consignes entrées par les pilotes, les traiter et les conserver dans une forme acceptable par le comparateur. L'ensemble Acquisition de données + comparateur peut être assimilé à un convertisseur étant donné que des données brutes en entrée sont converties en commandes de vol. Il n'est pas nécessaire de représenter d'organe de transmission étant donné qu'il ne s'agit que de câbles électriques qui acheminent les données converties jusqu'aux organes les opérant. Ils peuvent cependant être représentés si le concepteur le souhaite par des éléments d'interaction, à titre indicatif. Les lois de pilotage opèrent les données traitées et comparer pour finalement produire des consignes envoyées aux organes de pilotage, c'est donc l'élément opérateur. Enfin, le comparateur et les lois de pilotage sont bornés dans leur fonction par le domaine de vol de l'appareil, c'est donc un organe de contrôle.

On peut donc constater que la proposition de développement de la méthode CTOC aboutit à une image miroir de ce que revendique l'approche originale, à savoir un élément convertisseur, transmetteur, opérateur et de contrôle. Ce développement a été proposé dans le contexte spécifique des boucles de contrôle d'un avion de ligne moderne. Le principe est généralisable à d'autres systèmes complexes présentant des boucles de contrôle différentes étant donné qu'il est basé sur la représentation standard des boucles de contrôle. Cependant, plus de tests et de validations sont nécessaires pour confirmer la robustesse de ce développement et son applicabilité à des systèmes différents.

4.6 CONCLUSION

L'approche CTOC offre la possibilité au concepteur de construire simultanément la vue fonctionnelle et la vue physique du produit au cours du processus de conception. Le modèle CTOC obtenu permet de gérer les niveaux d'abstraction du produit et d'évoluer entre eux permettant au concepteur de maîtriser le niveau de détail auquel il souhaite travailler. En se basant sur une approche énergétique et une représentation juste nécessaire d'un système à un niveau de détail donné, elle permet de représenter un système complexe de façon exhaustive et permet une traçabilité des choix de conception. Ces capacités sont précieuses au cours du processus de développement pour remettre en question des choix de conception ou envisager de nouvelles architectures dans le cadre d'un travail d'innovation architecturale.

La littérature ne propose cependant pas d'exemple d'application à des systèmes complexes et n'aborde pas assez les capacités de vecteur d'innovation de la méthode. Ainsi, la procédure a été formalisée dans ce chapitre et a été appliquée à différentes architectures. Cela a permis de mettre en avant la capacité de l'approche à accompagner un concepteur dans la construction d'une architecture complexe ainsi que dans l'exploration de nouveaux concepts. La méthodologie TRIZ décrite au Chapitre 2: Analyse de la littérature, §2.3.3 peut être associée à des méthodes existantes afin d'exploiter des synergies et renforcer le processus d'innovation. Il pourrait donc s'avérer intéressant de lier les approches TRIZ et CTOC de façon à identifier des contradictions ou des irrationalités dans le système en cours de conception par l'approche CTOC et de supporter le concepteur dans son processus d'innovation architecturale.

L'application de l'approche à un cas d'étude représentatif des systèmes complexes a permis de valider l'applicabilité de la méthode et mené à une proposition de développement spécifique. En effet, l'approche ne permettait pas de représenter de façon exhaustive les boucles de contrôles complexes telles qu'on peut en trouver sur des avions de ligne moderne. Le développement proposé est compatible avec la méthode originale et l'enrichit donc.

Si l'approche CTOC répond aux besoins de cette étude et permet de lier les vues fonctionnelles et physiques, elle n'apporte pas de réponse à l'intégration de la vue industrielle dans une méthodologie globale de conception. Le prochain chapitre se concentre sur l'intégration de critères de performance industrielle dès la phase de conception préliminaire.

5. CHAPITRE 5 : INTEGRATION DE CRITERES DE PERFORMANCE INDUSTRIELLE

5.1 INTRODUCTION

La première proposition de ce travail était de lier les vues fonctionnelles et physiques du produit en phase de conception préliminaire. Celle-ci a été détaillée dans le chapitre précédent. L'approche retenue, le modèle CTOC, présente des avantages certains dans ce but mais aussi quelques limitations qui ont été levées par des développements de la méthodologie.

Ce chapitre va s'attacher à répondre aux problématiques soulevées par la seconde proposition exprimée en fin de chapitre 3 : Intégrer des critères de performance industrielle en phase de conception préliminaire. L'intégration de nouveaux critères de conception est toujours délicate car si l'objectif est de réduire l'incertitude des choix de conception en ajoutant un élément de décision concret, elle peut aussi augmenter la complexité globale du processus de conception au point d'être finalement contre-productive. Les méthodes dites de Design for X regroupent les méthodologies de conception qui permettent de concevoir un produit en mettant l'accent sur un critère de conception spécifique comme le coût grâce au Design to Cost, la valeur finale du produit grâce au Design to Value ou encore, et c'est ce qui nous intéresse, les performances industrielles grâce au Design for Assembly ou DFA. L'analyse de la littérature réalisée plus tôt a orienté nos recherches vers une méthode développée récemment, le Conceptual Design for Assembly ou CDfA qui s'attache à dépasser les limitations des méthodes classiques de DFA. Pour rappel, les méthodes de DFA sont généralement laborieuses à déployer et ne sont applicables qu'en phase de conception détaillée lorsque tous les choix de conception ont déjà été réalisés [Lefever and Wood, 1996].

Le CDfA est la méthodologie retenue pour explorer le deuxième axe de recherche de cette thèse pour sa capacité à être appliquée sur un système en phase de conception préliminaire. De plus, il s'agit d'une approche énergétique dont la modélisation est basée sur la vue fonctionnelle du produit ce qui nous permettra plus tard de lier l'approche CTOC et l'approche CDfA en une méthodologie globale de conception préliminaire basée sur une approche énergétique.

Les travaux présentés dans ce chapitre ont été réalisés au sein d'un groupe de travail composé d'acteurs de l'industrie aéronautique et de membres de la communauté scientifique. Des chercheurs de l'université de Parme, notamment Claudio Favi l'auteur de la méthode CDfA servant de base de réflexion à cette partie de l'étude ont contribué aux développements et aux propositions faites ici. Des articles ont été publiés au cours de ces travaux par l'ensemble de

l'équipe et permettent, en complément des résultats présentés ici de suivre l'évolution des travaux (Claudio Favi, 2019; François Bouissière, 2019). Ce chapitre propose des développements spécifiques de l'approche CDfA sur lesquels le doctorant a travaillé mais cherche aussi à déterminer si des liens peuvent être créés avec l'approche CTOC détaillée dans le chapitre précédent. Pour rappel, l'objectif global de ces travaux est de lier les vues fonctionnelle, physique et industrielle du produit. Si l'approche CTOC a permis de lier la vue fonctionnelle et la vue physique, nous nous attarderons ici sur l'intégration de la vue industrielle et à la définition d'une méthode globale de conception architecturale.

5.2 DESCRIPTION DE L'APPROCHE CDFA

Comme décrit par l'auteur, l'approche CDfA développée par Favi et Germani (2012) est inspirée des travaux de Stone et McAdams, basés sur une approche modulaire. Les deux critiques principales faites à leur encontre est qu'elle ne permet pas d'identifier une séquence d'assemblage optimisée et qu'elle n'intègre pas de spatialisation des différents composants à assembler. Ainsi, l'approche de Favi cherche à répondre à ces deux critiques de la méthode en prenant en compte non seulement les modules mais aussi leurs interactions dans sa méthodologie, ce grâce à une approche fonctionnelle et énergétique du système dont les étapes sont détaillées ci-dessous (Fig. 53).

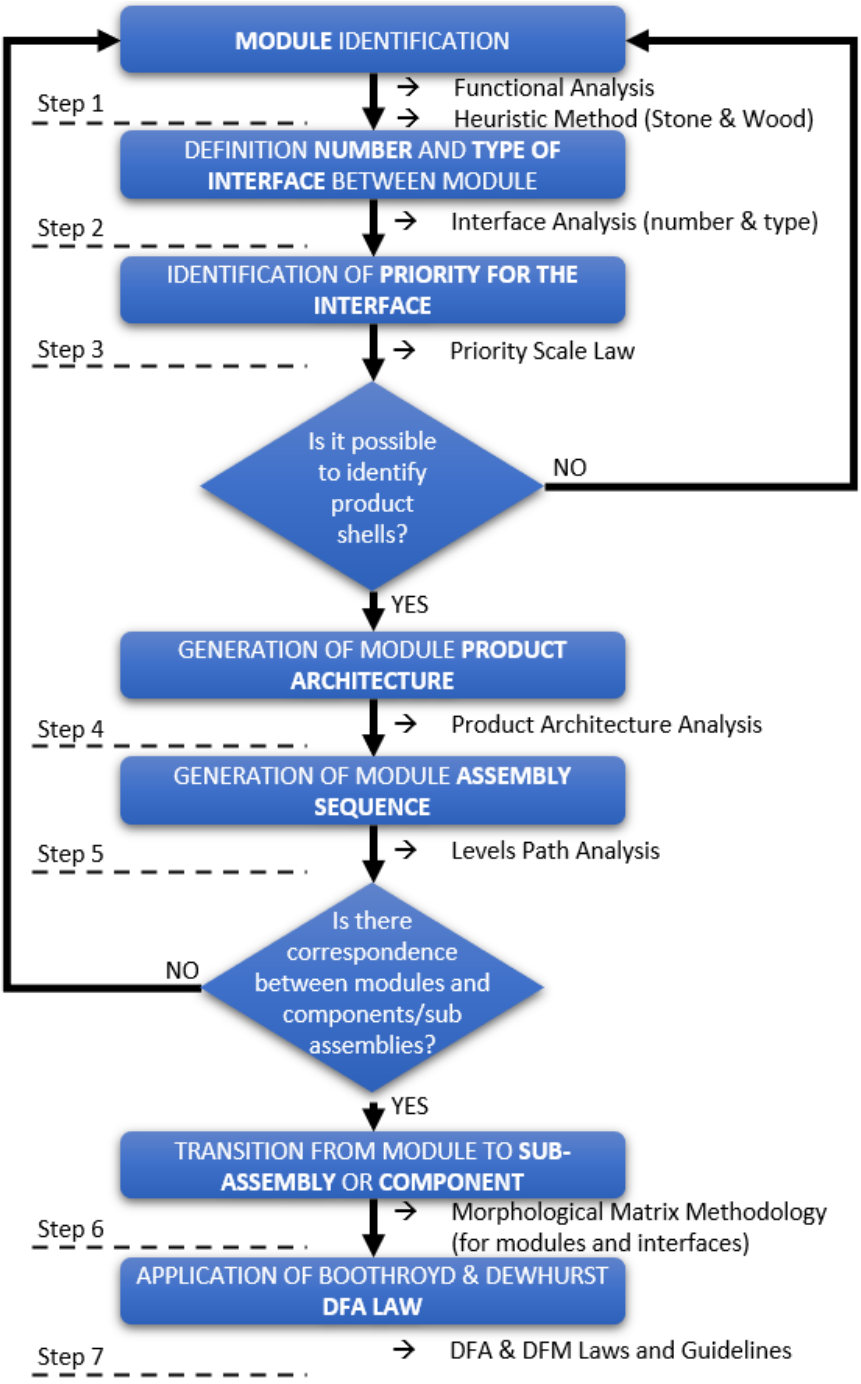


Fig. 53 Schéma opérationnel des étapes d'application de la méthode CDfA (Favi & Michele, 2012).

A partir de la vue fonctionnelle du produit, ce dernier est représenté sous formes de modules reliés les uns aux autres par des flux d'énergie. La figure ci-dessous (Fig. 54) reprend l'exemple présenté dans les travaux de Favi dans lesquels il a décrit une hotte aspirante de cette façon. On peut y voir apparaître distinctement 3 flux d'énergie d'entrée (Flux d'air, force utilisateur, électricité) et 3 flux d'énergie de sortie (Bruit, air propre, lumière). Chacun des modules correspond à une ou plusieurs fonctions, chaque fonction met en jeu un ou plusieurs flux énergétiques à travers des composants ce qui permet donc de lier les modules les uns aux

autres de manière à représenter le système étudié de façon exhaustive. Dans cette représentation les modules avec lesquels l'utilisateur peut jouer pour définir une séquence d'assemblage optimisée sont : Support, Filters, Motor, Blower, Aesthetic Glass, Cover, Control Panel, Electrical System, Lamps, Electricity Supplier.

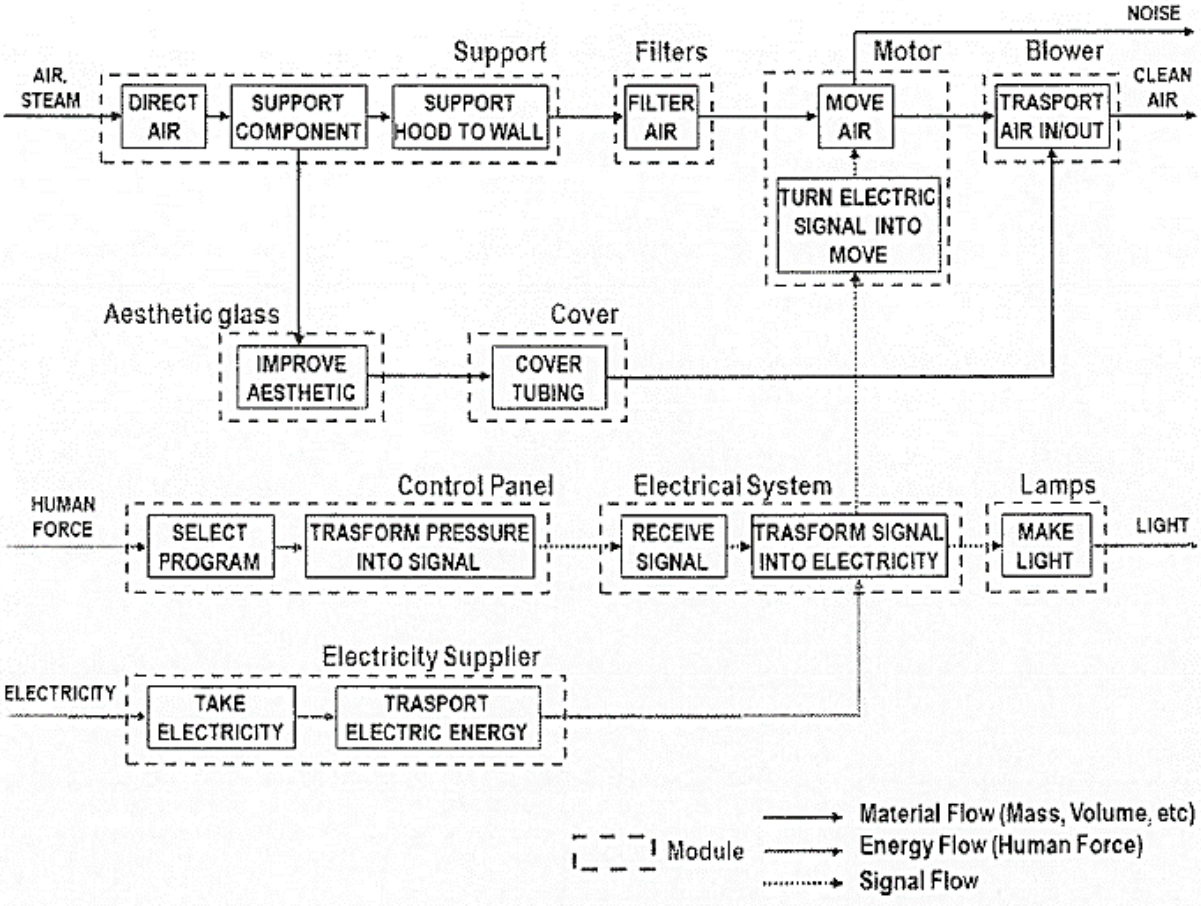


Fig. 54 Utilisation de méthodes d'analyse fonctionnelle et d'heuristiques pour identifier les modules composant une hotte aspirante (Favi & Michele, 2012)

Afin de prioriser les différentes interfaces identifiées et donc d'en déduire une séquence d'assemblage optimisée, l'auteur propose un tableau détaillant les différentes interfaces possibles et les niveaux de priorité associés en valeurs absolues (Fig. 55 ci-dessous).

Interface		Priority
Electrical (E)		Low (1)
Mechanical (M)	With contact (M2)	Medium (2)
	With transmission and motion (M1)	Medium (3)
Optical (O)		Max (4)
Magnetic (B)		Max (4)

Fig. 55 Echelle des valeurs de priorité des différentes interfaces énergétiques (Favi & Michele, 2012).

En attribuant à chaque interface le niveau de priorité correspondant et en additionnant les différentes interfaces d'un module, on peut attribuer une note à chaque module et les hiérarchiser. Les modules obtenant un score élevé seront prioritaires dans la séquence d'assemblage car ils présentent un grand nombre d'interfaces et/ou des interfaces jugées plus complexes à réaliser lors de l'assemblage du produit. Cette hiérarchisation des modules permet finalement de déduire une séquence d'assemblage optimisée, couplée à la représentation réalisée précédemment. Il est alors possible d'appliquer au système les méthodes de réduction du nombre de pièces ou d'optimisation de topologie classiques pour améliorer encore les performances industrielles du produit.

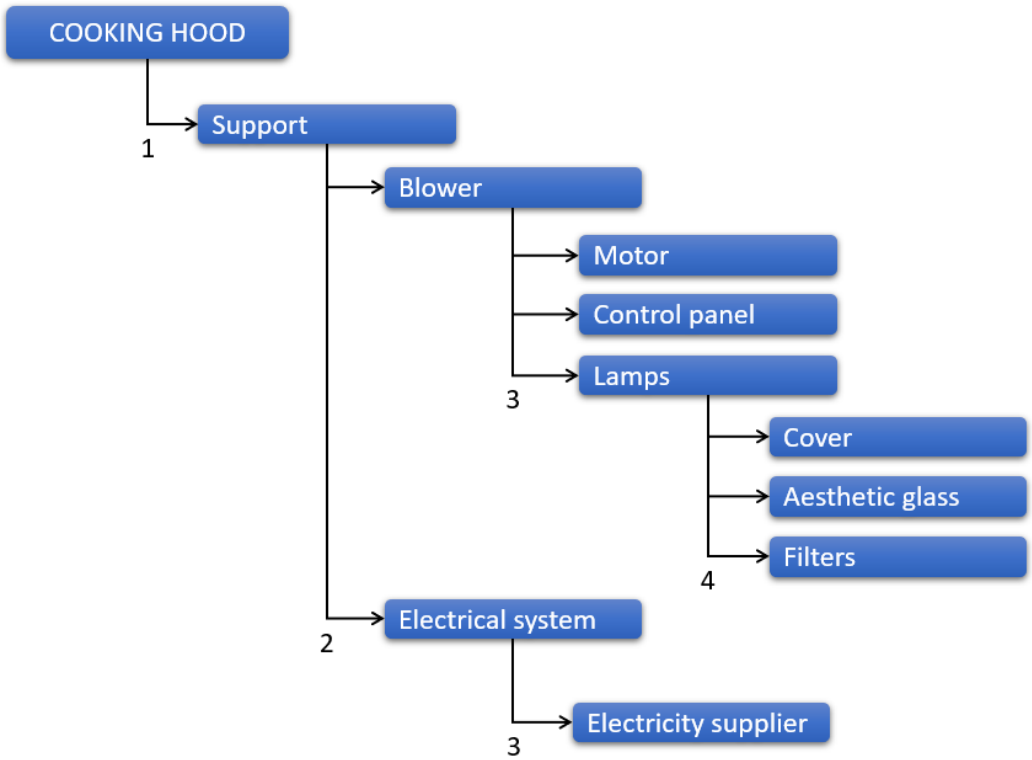


Fig. 56 Séquence d'assemblage optimisée d'une hotte aspirante obtenue après application de l'approche CDfA (Favi & Michele, 2012).

L'approche CDfA exprimée par Favi permet donc de définir des séquences d'assemblage optimisées pour des produits en phase de conception préliminaire et de les représenter par des modules/fonctions liés par des flux énergétiques. Il est donc possible de comparer les séquences d'assemblages de différentes architectures, de modifier des modules et leurs interfaces et de vérifier les conséquences sur l'assemblabilité du produit et donc permettre des alternatives de conception. Cependant, cette approche présente quelques limitations qui devront être dépassées pour être applicable dans le contexte de l'étude.

5.2.1 Limitations de l'approche CDfA

L'approche CDfA a été appliquée à un cas d'étude jugé représentatif de la complexité du produit aéronautique afin de vérifier l'applicabilité de la méthodologie et de mettre en avant ses limitations dans le but de proposer des développements spécifiques. Le cas d'étude retenu est une pointe avant d'A320 (voir Fig. 57 ci-dessous) car il présente des éléments de structures, des systèmes et des éléments de contrôle. La variété des systèmes présents dans cette partie de l'avion implique une grande diversité de flux énergétiques qui permettront d'éprouver la méthodologie CDfA et les outils de modélisation associés. De plus, la restriction du cas d'étude à la pointe avant permettra de conserver un niveau de complexité suffisant pour valider l'applicabilité de l'approche sans nécessiter des efforts trop importants pour sa mise en œuvre. Le reste du système sera considéré comme extérieur au cas d'étude en ce qui concerne la cohérence énergétique de l'ensemble. Autrement dit, les flux énergétiques provenant d'une partie de l'avion extérieure au cas d'étude seront représentés par un flux entrant du modèle énergétique. A l'inverse, les flux énergétiques allant vers une partie de l'avion extérieure au cas d'étude seront représentés par un flux sortant du modèle énergétique.

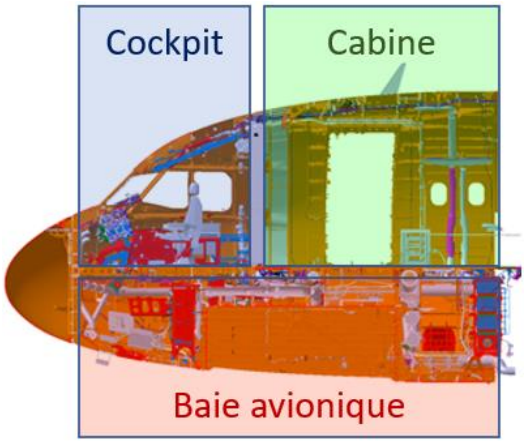


Fig. 57 Vue en coupe d'une pointe avant d'A320 et des structures et systèmes internes.

Une pointe avant d'A320 se décompose en trois grands blocs :

- Le cockpit, ou poste de pilotage, au-dessus du plancher à l'avant de l'appareil. Le cockpit contient tous les éléments de contrôle manuel et une partie des contrôles automatisés de l'avion et permet d'accueillir les pilotes. De nombreux systèmes sont connectés au cockpit afin de fournir des informations de vol aux pilotes.
- Une partie de la cabine, au-dessus du plancher et communiquant avec le cockpit par un accès réservé aux pilotes et personnels navigants. La partie de la cabine contenue

dans la pointe avant présente une porte d'accès permettant aux passagers et à l'équipage de rentrer dans le système.

- La baie avionique, sous le plancher, contient de nombreux systèmes très variés qui échangent avec le reste de l'avion comprenant, entre autres, des systèmes de gestion de l'air, des systèmes de refroidissement, des systèmes pneumatiques, des calculateurs, des cœurs électriques... La baie avionique est particulièrement encombrée et présente de nombreuses difficultés lors des étapes d'assemblage et de maintenance.

Cette première application de l'approche a rapidement montré ses limites et il n'était pas cohérent de continuer à essayer de faire fonctionner la méthode au-delà de l'étape de modélisation du produit en modules et interfaces énergétiques. Il n'a en effet pas été possible de déterminer une séquence d'assemblage optimisée grâce aux outils de l'approche originale et les outils de modélisation ont aussi dû être adaptés pour obtenir un modèle cohérent et exploitable. Cette tentative a toutefois montré l'inadéquation de l'approche CDfA dans le contexte aéronautique et a démontré la nécessité de proposer des développements spécifiques. Les limitations méthodologiques identifiées à l'issue de cet exercice et les propositions associées sont les suivantes :

1. L'approche CDfA part du postulat selon lequel il est possible d'arriver à une bijection entre la vue fonctionnelle et la vue physique. S'il est possible sur des systèmes simples d'associer une fonction à un unique composant, les systèmes complexes agrègent souvent des fonctions et/ou des composants dans un souci d'optimisation. Comme détaillé dans le chapitre précédent, on cherche généralement à mutualiser, coupler, découpler ou hybrider les composants des systèmes complexes pour optimiser les performances globales (Chap. 4, §3.2.3). La méthode de modélisation du CDfA consiste à identifier la fonction principale du produit, à identifier les flux d'énergie associés et à modéliser le système à partir de cet ensemble. Le produit avion est composé de nombreux systèmes interconnectés et de modules regroupant des fonctions ou des composants. Il n'est pas possible de représenter le produit avion de façon cohérente à partir d'une fonction de plus haut niveau mais plutôt à partir de plusieurs fonctions essentielles. De par la nature multi-flux du produit avion, de par les caractéristiques des systèmes complexes (tel qu'un avion) et plus spécifiquement du contexte aéronautique, les outils de modélisation ne sont pas adaptés au besoin de l'étude et doivent donc être développés. Nous proposons de développer les moyens de modélisation de façon à les

rendre plus robustes lors de l'application aux systèmes complexes. La modélisation devra permettre de regrouper les flux énergétiques associés à plusieurs fonctions dans une représentation unique cohérente.

2. L'échelle des valeurs de priorités des différentes interfaces énergétiques propose des valeurs absolues pour hiérarchiser les interfaces entre les modules selon leur nature énergétique. Ces valeurs n'évoluent pas en fonction du produit étudié et peuvent être représentatives pour certains types de produit ou d'architecture et être absolument erronées pour d'autres. De plus, une simple addition des différentes interfaces pour hiérarchiser les modules n'est plus cohérente lorsque le nombre d'interface est trop important, ce qui est le cas pour des systèmes complexes. Enfin, ces valeurs agrègent de nombreux paramètres qu'il n'est pas possible de maîtriser avec une table de valeurs fixes telles que l'ergonomie, l'accessibilité, le niveau d'expertise des opérateurs, l'outillage nécessaire. Pour fournir des résultats cohérents avec la réalité observée par les équipes de production, il est donc indispensable de faire évoluer l'outil de priorisation des interfaces énergétiques. Il devra permettre une évaluation spécifique au produit étudié et à son contexte de production et offrir aux concepteurs la capacité d'analyser le score de chaque interface et module.

Ces propositions sont développées et détaillées dans le prochain paragraphe avant de les appliquer plus loin sur le cas d'étude retenu pour vérifier que les limitations identifiées ici ont bien été levées.

5.2.2 Développements de la modélisation des systèmes multi-flux

La méthodologie CDfA préconise de modéliser un système à partir de sa fonction principale et des flux d'énergies mis en jeu pour obtenir un modèle similaire à celui présenté précédemment en Fig. 54. Deux spécificités des systèmes complexes propres au produit aéronautique sont le fait qu'il y ait plusieurs fonctions essentielles du produit ce qui ne permet pas de dégager une fonction principale permettant une représentation exhaustive. La seconde est que le produit aéronautique est de nature multi-flux, de nombreux systèmes regroupent différents flux énergétiques et un même flux répond à différentes fonctions. La proposition est donc d'adapter la méthode de modélisation à l'application aux systèmes présentant ce genre de complexité.

La première application a mis en évidence l'inadéquation de cette méthode de modélisation au contexte aéronautique et suggère la nécessité de permettre la représentation du

système à partir de plusieurs fonctions essentielles. La principale difficulté de ce développement est que le concepteur construit une représentation par fonction retenue et peut donc rapidement se retrouver avec de nombreux modèles à partir desquels il n'est pas possible de produire une séquence d'assemblage globalement optimisée. Il est donc nécessaire de regrouper les différents modèles en un seul modèle global. Afin de garantir l'exhaustivité et la cohérence de la représentation, deux conditions doivent être respectées lors du regroupement de deux modèles :

- Tous les modules doivent être uniques. Si un module exploite différents flux énergétiques, ceux-ci doivent converger vers le module en question.
- Deux représentations peuvent être regroupées à condition que la continuité énergétique soit respectée. Par exemple si la représentation A présente un flux d'énergie hydraulique en sortie, elle peut être regroupée avec la représentation B à condition qu'il présente le même flux hydraulique en entrée, et inversement.

Le modèle global est réalisé à partir des fonctions de haut niveau du produit et le représente donc initialement avec un niveau d'abstraction élevé. Un module exploitant plusieurs flux énergétiques pourra ensuite être représenté avec un niveau d'abstraction inférieur permettant de le séparer en sous-modules et donc de séparer les différents flux énergétiques impliqués si la représentation initiale n'est pas suffisamment claire ou si le concepteur souhaite améliorer la représentation d'un module spécifique. Le niveau d'abstraction final du modèle dépendra du niveau de détail requis par le concepteur ainsi que le niveau de détail disponible à ce moment de la conception. L'objectif final étant de pouvoir hiérarchiser des architectures en termes de performances industrielles, il ne sera pas systématiquement nécessaire de modéliser l'architecture étudié à un faible niveau d'abstraction pour les discrétiser. L'application de cette nouvelle méthodologie de modélisation à un cas d'étude permettra de valider l'applicabilité et la réponse aux limitations de l'approche originale.

5.2.3 Refonte de l'échelle de valeurs des interfaces

5.2.3.1 Proposition de développement spécifique

L'échelle de valeurs des interfaces doit être complètement repensée afin de refléter la réalité industrielle de l'assemblage des systèmes complexes. Chaque industrie présente des problématiques spécifiques liées à des critères qu'il est possible de formaliser. Le contexte de l'étude étant l'industrie aéronautique, le développement spécifique de l'approche CDfA sera

particulièrement adapté à cette industrie mais le processus est adaptable à d'autres environnements de production.

Les valeurs de l'échelle sont absolues et indépendantes de l'environnement de production et si cette philosophie est suffisante pour des systèmes simples elle n'est pas représentative des systèmes complexes. Il est donc nécessaire de définir un processus permettant une évaluation spécifique des contraintes de production basée sur des critères établis en accord avec les équipes de production. Une seconde limitation de cette échelle de valeurs est que le score final du module est basé sur une simple addition du score de chaque interface. Cette approche présente des faiblesses aussitôt que le nombre d'interfaces devient important étant donné qu'elle donne un score systématiquement plus élevé aux modules présentant beaucoup d'interfaces plutôt qu'à ceux présentant des interfaces problématiques vis-à-vis de la production. Un nombre important d'interfaces peut effectivement être source de problématiques industrielles mais ce n'est pas le seul critère pertinent et il ne devrait pas être prioritaire. La proposition de développement est donc double, définir des critères de performance industrielle permettant d'établir un score pour chaque interface qui sera spécifique à l'environnement de production et s'assurer de la pondération de ces différentes interfaces les unes par rapport aux autres. Ce développement spécifique de l'approche CDfA est fait en collaboration avec les équipes de production, dans un souci de collaboration mais aussi pour valider que les résultats expérimentaux soient cohérents avec la réalité du terrain observée par les opérateurs.

5.2.3.2 Définition des critères d'évaluation de la performance industrielle

A partir de l'étude des problématiques récurrentes observées sur la ligne d'assemblage et en collaboration avec les équipes de production, des critères d'évaluation de la performance industrielle ont pu être définis. La nature de ces critères est liée à la quantité et la qualité des données disponibles en phase d'architecture et ne concernent donc pas des problématiques liées à des paramètres n'apparaissant que plus tard dans le processus de conception tels que les matériaux mis en jeu, la topologie détaillée ou encore les principes constructifs de composants élémentaires. En phase d'architecture cependant, il est possible de définir des volumes, des géométries, des masses et des modules qui nécessiteront un assemblage mais aussi de figer des logiques d'assemblages et des allocations d'espace qui fournissent des informations pertinentes pour l'évaluation des performances industrielles.

Dans ce but, la première étape a été d'établir une liste de paramètres par les équipes d'architectes avion et d'architectes industriels avec un objectif double : (i) Définir une liste

exhaustive des paramètres jugés pertinents et prioritaires pour l'évaluation de la performance d'assemblage et (ii) promouvoir la collaboration entre les équipes de l'Engineering et du Manufacturing pour favoriser le consensus. De nombreux paramètres ont été envisagés tels que la durée d'une opération d'assemblage, le nombre d'opérations élémentaires nécessaires, le niveau de complexité du processus d'assemblage et le besoin ou non d'outils. Des paramètres liés à l'opérateur ont été étudiés tels que la position de travail, l'ergonomie en général, le besoin ou non d'une formation spécifique, l'accessibilité, la visibilité et l'espace de travail de différentes zones de l'avion. En ce qui concerne les composants, des caractéristiques telles que la taille, la forme, le poids et la fragilité furent discutés. Ces critères ne sont pas tous retenus dans l'approche finale, certains n'étant pas assez pertinents ou impactants, d'autres sont redondants et ont donc été regroupés. Par exemple, les critères d'accessibilité, de visibilité et d'espace de travail disponibles ont été regroupés en un critère unique attribuant un score de « pénibilité » à différentes zones de travail de l'avion.

L'objectif est d'être en mesure d'évaluer la performance d'assemblage de l'architecture étudiée. Dans ce but, à chaque critère sera associé à un score reflétant l'impact positif ou négatif de cet aspect de l'assemblage sur la performance d'assemblage global. En regroupant les scores des différents critères et en y associant des pondérations à définir, on peut alors évaluer la performance d'assemblage d'une architecture. Le score de chaque critère sera compris entre des valeurs entières allant de de la valeur 1 qui signifie un impact positif sur la performance d'assemblage globale jusqu'à la valeur 5 qui indique à l'inverse un impact négatif sur la performance d'assemblage globale. Des tableaux d'évaluation propres à chaque critère permettent de connaitre les paramètres permettant de définir le score d'un critère. Ceux-ci sont détaillés plus bas. Ces tableaux sont alors utilisés pour évaluer chaque module ou composant de l'étude, leur attribuant donc un score plus ou moins important permettant de hiérarchiser la criticité de chacun des modules vis-à-vis de la performance d'assemblage globale.

Les différents critères sont classés en quatre groupes ou « domaines » détaillés ci-dessous. (I) le domaine des **interfaces**, (II) le domaine de **l'assemblage**, (III) le domaine **ergonomique** et (IV) le domaine du **composant**. Chaque domaine est constitué d'un ou plusieurs critères qui composent le score final du domaine auquel ils appartiennent. L'intérêt de regrouper les critères relatifs à un même aspect de la performance industrielle est double : (i) Réduire les composantes du score final de chaque interface et module et donc faciliter leurs pondérations respectives et (ii) comprendre le score final de chaque interface ou module et aider le concepteur dans ses choix d'architecture. Autrement dit, on peut facilement retrouver les composantes du score d'un élément et donc comprendre s'il est plutôt lié à des contraintes

d'interfaces, d'assemblage, ergonomiques ou aux caractéristiques de l'objet lui-même. Ainsi, à l'issue d'une première application de la méthode, on peut identifier les modules critiques et savoir où orienter les efforts de conception pour améliorer le score d'assemblage global. Cet objectif rappelle l'ontologie FBS (Function-Behavior-Structure) qui propose de voir le produit sous trois aspects : la fonction, le comportement et la structure (John Gero, 2004). La méthode OIA s'appuie aussi sur cette ontologie et vise à modéliser le comportement du produit avant de l'interpréter au travers des attentes du concepteur (Collignan, 2011). Cette méthode propose d'ailleurs aussi un modèle d'agrégation où des indices liés à des objectifs de conception (appelés DOIs) sont décomposés, priorisés et hiérarchisés. Ce modèle agrège les DOIs en une unique variable de performance.

Dans les paragraphes suivants, les quatre domaines définis pour développer l'approche CDfA et les critères qui les composent sont détaillés afin de bien comprendre la méthode d'évaluation mise en place par le développement de l'approche CDfA et justifier les choix réalisés.

5.2.3.2.1 I - Interfaces

Mechanical Interfaces					Score
			X <=	2,5	1
2,5			< X <=	5,5	2
5,5			< X <=	7,5	3
7,5			< X <=	9	4
			X >	9	5

Fig. 58 Tableau d'évaluation finale du score lié aux interfaces mécaniques.

Ce domaine prend en compte les complexités d'assemblage liées au nombre d'interfaces mécaniques qu'un composant peut avoir avec la structure ou d'autres composants. Un sous-tableau permet d'établir la valeur « X » en fonction du nombre d'interfaces mécaniques présentes sur le composant évalué et leurs positions (voir Fig. 59 ci-dessous). En effet, selon les situations, une interface mécanique à assembler en position haute, basse ou intermédiaire sera plus ou moins complexe à réaliser. Un coefficient est donc appliqué sur les différentes interfaces mécaniques en fonction de cette localisation pour obtenir un premier score d'interfaces mécaniques avec coefficients représentatif de la réalité. Ainsi, plus un composant aura d'interfaces mécaniques et plus elles seront complexes à réaliser, plus son score final sera dégradé. Une vis, un écrou ou une attache comptent pour une interface mécanique sans discrimination étant donné que la notion de pénibilité de l'opération d'assemblage est évaluée

dans le domaine II « Assemblage ». Afin de ne pas compter deux fois un même aspect de la performance industrielle et ainsi biaiser le résultat, ces deux notions sont décorrélées et évaluées séparément. Les données nécessaires à l'évaluation du nombre d'interfaces mécaniques sont disponibles dès la phase d'architecture bien qu'elles puissent évoluer au cours du développement.

Part Name	# of Mechanical Interfaces	# of Interfaces in the UPPER part	# of Interfaces in the *MIDDLE* part	# of Interfaces in the *LOWER* part	Coeff. UPPER - 1,5	Coeff. MIDDLE - 1	Coeff. LOWER - 1,2	Mechanical Interfaces with Coeff.	Evaluation range	Score Interface
Part A	4		4			4		**X =** 4	**2,5 ≤ X ≤ 5,5**	2
Part B	6	3		3	4,5		3,6	**X =** 8,1	**7,5 ≤ X ≤ 9**	4
Part C	8		8			8		**X =** 8	**7,5 ≤ X ≤ 9**	4

Fig. 59 Extrait du sous-tableau d'évaluation du score lié aux interfaces mécaniques.

L'exemple ci-dessus illustre ce processus, le composant A présente 4 interfaces mécaniques toutes en position intermédiaires. Le score d'interfaces mécaniques avec coefficients est de 4, cette valeur est comprise entre 2,5 et 5,5 ce qui ramène le score final à 2 d'après le tableau d'évaluation finale (Fig. 58). Le composant B présente 6 interfaces mécaniques, 3 en position haute (Coef. 1,5) et 3 en position basse (Coef. 1,2). Son score d'interfaces mécaniques avec coefficients est donc de 8,1, compris entre 7,5 et 9 ce qui ramène son score final à 4 d'après le tableau d'évaluation finale (Fig. 58). Le composant C présente 8 interfaces mécaniques mais toutes en position intermédiaire, son score final est donc le même que celui du composant précédent, 4. L'évaluation de ces composants par l'approche présentée ici permet de conclure que, uniquement d'après les interfaces mécaniques à assembler sur ceux-ci, le premier composant est plus simple à assembler que les deux autres. Le second composant pénalise la performance d'assemblage à cause de la position des interfaces tandis que le dernier la pénalise par le nombre d'interfaces requises.

5.2.3.2.2 II - Assemblage

Tool/Assistant	Weight (kg)			Score
No Jig No Assistant	X <=	15	=	2
No Jig No Assistant	X >	15	=	5
No Jig with Assistant	X <=	15	=	1
No Jig with Assistant	X >	15	=	4
Simple Jig with Assistant			=	2
Complex Jig with Assistant			=	3

Fig. 60 Tableau d'évaluation du score lié aux conditions d'assemblage.

Process complexity				Score
Very easy		0	< X <=	1
Easy		1	< X <=	2
Normal		2	< X <=	3
Complex		3	< X <=	4
Very complex		4	< X <=	5

Fig. 61 Tableau d'évaluation du score lié à la complexité du processus d'assemblage.

Le domaine de l'assemblage regroupe les paramètres ayant trait aux opérations d'assemblage à proprement parler et à ce qui les caractérise. Deux tableaux permettent d'évaluer un composant. Le premier reflète la difficulté à manipuler le composant pendant l'opération d'assemblage en prenant en compte la nécessité ou non d'utiliser un outillage spécifique, le besoin d'impliquer plus d'un opérateur pour une opération et la masse effectivement portée par chaque opérateur pendant l'assemblage. On suppose que lorsqu'un équipement est nécessaire, il soulève l'intégralité de la masse pour libérer l'opérateur. Une pièce légère et ne nécessitant pas d'outillage spécifique ni d'assistance pour la manipuler pénalisera peu la performance d'assemblage. A l'inverse, une pièce lourde pouvant nécessiter l'utilisation d'un outillage spécifique et/ou de plusieurs opérateurs lors de la manipulation pénalisera fortement la performance d'assemblage.

Le second tableau indique le degré de complexité du processus d'assemblage du composant étudié, ce critère est subjectif et propre au jugement du concepteur. Dans le cadre de cette étude, nous avons demandé aux équipes manufacturing de définir le degré de complexité des différentes opérations d'assemblage étudiées, d'après leur expérience.

5.2.3.2.3 III – Ergonomie

Working Area		Score
Zone A	=	3
Zone B	=	4
Zone C	=	4
Zone D	=	1
Zone E	=	1
Zone F	=	3
Zone G	=	4

Fig. 62 Tableau d'évaluation du score lié à l'espace de travail où a lieu l'opération d'assemblage.

Working Area	Access		Score
Zone A	Access 1	=	4
Zone B	Access 2	=	4
Zone C	Access 3	=	4
Zone D	Access 4	=	1
	Access 5	=	3
Zone E	Access 6	=	1
	Access 5	=	3
Zone F	Access 7	=	2
	Access 8	=	4
Zone G	Access 6	=	1
	Acces 7	=	2

Fig. 63 Tableau d'évaluation du score lié à l'accès utilisé pour intégrer la pièce au produit lors de l'assemblage.

Une spécificité des systèmes de grande taille est qu'une partie des opérations d'assemblage se fait à l'intérieur du système. L'approche CDfA ne prenait pas en compte les problématiques d'accessibilité étant donné qu'elle n'envisageait que les systèmes à assembler depuis l'extérieur comme c'est le plus souvent le cas. Un système suffisamment grand et complexe est souvent assemblé de l'intérieur (voiture, train, bateau, fusée, avion, …) et il était donc nécessaire de prendre en compte ce cas de figure. Ainsi, les tableaux ci-dessus permettent d'intégrer cette contrainte dans l'évaluation de la performance d'assemblage.

Le premier tableau représente les différents espaces de travail auxquels les opérateurs ont accès pendant le processus d'assemblage. Le cas d'étude que nous avons utilisé pour développer l'approche était limité à la pointe avant d'un avion de ligne qui n'était découpé qu'en 7 espaces de travail. D'autres systèmes pourraient en compter plus ou moins. A chaque

espace de travail est attribué un score de 1 à 5 représentant la pénibilité à travailler dans cet espace. Un espace confiné, bas de plafond, encombré et à la géométrie complexe pénalisera fortement la performance d'assemblage. A l'inverse, un espace de travail dégagé, ouvert, où il est possible de se déplacer facilement et avec un plancher permettra des opérations d'assemblage facilitées. Autrement dit, tout élément assemblé dans les zones avec un score élevé sera plus pénible à installer que dans une zone avec un score faible.

Le second tableau reflète la pénibilité liée aux accès qui sont utilisés pour atteindre l'espace de travail où l'opération d'assemblage a lieu. Certains espaces ont plusieurs accès, plus ou moins pratiques qui pénaliseront donc plus ou moins la performance d'assemblage. S'il est bien sûr obligatoire que l'élément à assembler puisse passer par l'accès désigné, il ne sera pas toujours simple pour l'opérateur de le manipuler pendant le transport ou d'atteindre l'accès en question. Ces paramètres vont donc permettre de hiérarchiser les différents accès au système du plus pratique au plus pénible vis-à-vis des opérations d'assemblage.

5.2.3.2.4 IV - Composant

Weight					Score
			X <=	15	1
15			< X <=	40	2
40			< X <=	80	3
80			< X <=	120	4
			X >	120	5

Fig. 64 Tableau d'évaluation du score lié aux caractéristiques du composant.

Ce dernier domaine a directement trait au composant et à ses caractéristiques propres. Le paramètre retenu jugé pertinent est la masse de l'objet à assembler. Naturellement, plus l'objet est lourd, plus il pénalise l'opération d'assemblage. On comprend facilement que s'il est possible de réduire la masse d'un composant ou de le séparer en plusieurs sous-composants plus légers, la manipulation par l'opérateur et donc l'assemblage sont facilités.

5.2.3.3 Score final

Lorsque l'ensemble des scores de chaque domaine a été évalué pour tous les composants de l'étude, il convient de les regrouper pour obtenir un score final permettant de les hiérarchiser. Une agrégation de ces valeurs est alors réalisée pour obtenir le score final. Une agrégation peut être réalisée avec ou sans compensation, retenir la pire des notes par exemple permet d'éviter

la compensation. Ici, l'emploi de la méthode « Root Mean Square » (RMS) aussi appelée moyenne quadratique renforce le poids des scores les plus élevés et donc les éléments les plus pénalisants pour la performance industrielle. Cela permet d'identifier les éléments critiques pour la performance d'assemblage et donc de diriger les efforts de conception vers les objets les plus pénalisants. Cependant, il n'est pas évident de savoir si un domaine pénalise plus la performance d'assemblage réelle qu'un autre. Autrement dit, comment savoir si les critères du domaine de l'assemblage influencent plus, moins ou autant le score final que les critères du domaine de l'ergonomie ? Pour répondre à cette interrogation, des pondérations ont été attribuées au score de chaque domaine de façon à pouvoir faire évoluer leur influence sur le score final en fonction des problématiques observées sur le terrain par les équipes du manufacturing. Les valeurs de ces pondérations sont initialement fixées à 1 pour ne pas influencer le score final, mais elles seront affinées dans un second temps après l'application à un système à l'issue de laquelle nous pourrons comparer les résultats expérimentaux avec le ressenti des équipes industrielles.

5.2.4 Conclusion

Ces développements spécifiques de l'approche CDfA permettent de dépasser les limitations identifiées lors de la première application de la méthode originale. Des critères d'évaluation propres au système à concevoir sont définis et permettent une évaluation spécifique de la performance d'assemblage globale dès la phase d'architecture. De plus, la définition détaillée de ces critères et des paramètres qui les composent permettent de comprendre dans le détail les éléments pouvant pénaliser la performance d'assemblage. En parallèle, la hiérarchisation des composants par leur criticité d'assemblage permet de cibler des éléments prioritaires du système mais aussi de concentrer les efforts de conception sur les causes du score de chaque élément, qu'il soit lié au processus d'assemblage, à la conception de l'objet ou encore à sa position dans le système.

Cette évaluation est donc spécifique au sujet de l'étude, développée ici pour un système aéronautique dans un contexte industriel figé, elle ne sera donc plus valable si le contexte évolue ou si l'on pose des hypothèses les remettant en question. Par exemple, l'automatisation de certains procédés d'assemblage ou l'intégration de robots dans les usines nécessiteraient de revoir les paramètres liés à l'ergonomie ou aux outils requis et justifierai peut-être la définition d'un nouveau critère.

Ces développements de l'approche CDfA permettent donc d'évaluer des architectures en cours de conception et d'indiquer les éléments pénalisant la future performance d'assemblage, mais ils permettent aussi d'envisager des scénarios ou d'inclure des hypothèses dans le processus industriel en intégrant de nouveaux critères à l'évaluation. Si l'exercice est aujourd'hui fastidieux étant donné qu'il est manuel et qu'il n'existe pas encore d'outils, il pourrait être en partie automatisée. En effet, la définition des critères d'évaluation resterait à la discrétion des concepteurs mais un cadre pourrait être construit pour aider le concepteur pendant l'application de la méthode et pour réaliser plus simplement des itérations une fois les critères définis.

L'ensemble des développements proposés ici permettent de définir une nouvelle approche CDfA qui sera nommée dans cette étude « nCDfA » pour « new Conceptual Design for Assembly ». Ainsi, dans la suite de ce document, la méthode originale sera toujours désignée par « CDfA » tandis que la nouvelle prenant en compte les développements proposées ici sera désignée par « nCDfA ».

5.3 CAS D'ETUDE : POINTE AVANT D'A320

5.3.1 Description du cas d'étude : Pointe avant d'Airbus A320

Le cas d'étude retenu pour tester cette nouvelle méthodologie nCDfA est la pointe avant d'un Airbus A320. Les raisons de ce choix sont similaires à celles évoquées dans le chapitre précédent, la pointe avant est une zone de l'avion regroupant de nombreux flux énergétiques variés et donc de nombreux composants. C'est aussi une zone particulièrement problématique lors de l'assemblage principalement à cause de la baie avionique située sous le cockpit. Cette zone renferme en effet de nombreux composants volumineux dans un espace restreint et avec des accès limités. Cette configuration nécessite donc une attention particulière lors de la génération de la séquence d'assemblage et il est donc intéressant de voir si l'application de l'approche nCDfA sur la pointe avant permet d'identifier les modules et composants qui posent effectivement problème sur les lignes d'assemblage. L'approche nCDfA étant toujours en cours de développement, il est précieux de valider l'approche théorique avant d'envisager des travaux de recherche ultérieurs.

La pointe avant est généralement une zone encombrée de l'avion qui risque de générer des problématiques d'assemblage mais c'est particulièrement vrai pour la famille A320. En effet, l'architecture de cet appareil avait été imaginée pour être produit à quelques centaines d'appareils tout au plus tandis que l'entreprise enregistre aujourd'hui 9 273 appareils livrés et

15 522 commandés pour la famille A320[1]. Cet engouement impose une forte cadence de production à un système qui ne l'avait pas anticipé ce qui a tendance à exacerber les problématiques industrielles et rend particulièrement précieuse toute méthode permettant de pointer du doigt les zones et composants critiques pour la performance industrielle.

Dans les paragraphes suivants, nous présenterons les résultats obtenus en appliquant la nouvelle approche de modélisation préconisée pour le CDfA et le nouveau processus d'évaluation des performances industrielles.

5.3.2 Résultats de l'application

5.3.2.1 Modélisation du système

L'application de la méthode CDfA originale sur un système complexe présentant de nombreux flux énergétiques et pour lequel il n'est pas pertinent de dégager une unique fonction principale a mené à la modélisation de plusieurs fonctions décorrélées les unes des autres. Chaque fonction était représentée par un modèle énergétique cohérent mais la méthode ne décrivait pas comment les regrouper et l'exercice s'est avéré hasardeux.

Le développement spécifique de la méthode de modélisation détaillé plus tôt (§5.2.2) proposait donc de formaliser le regroupement des modèles correspondant aux différentes fonctions étudiées en un modèle unique global. Cela permet de répondre aux limitations observées par l'application mais aussi d'établir un modèle cohérent à partir duquel il est possible de continuer l'application de l'approche nCDfA. Pour rappel, les deux contraintes énoncées pour regrouper deux modèles énergétiques étaient les suivantes :

- Tous les modules doivent être uniques. Si un module exploite différents flux énergétiques, ceux-ci doivent converger vers le module en question.
- Deux représentations peuvent être regroupées à condition que la continuité énergétique soit respectée. Par exemple si la représentation A présente un flux d'énergie hydraulique en sortie, elle peut être regroupée avec la représentation B à condition que le même flux hydraulique soit décrit en entrée, et inversement.

La fonction principale de la pointe-avant d'un avion est de fermer la structure et d'optimiser l'aérodynamisme du système. Ce cas d'application comprend les équipements et

[1] Source : https://www.airbus.com/aircraft/market/orders-deliveries.html

composants internes de la pointe-avant mais ne prend pas en compte la peau de l'avion ni la structure qui sont ici considérés comme figés. Les fonctions associées à ces éléments ne sont donc pas étudiées. L'analyse fonctionnelle de la pointe avant permet de dégager quatre fonctions de haut niveau. La pointe-avant doit **accueillir les pilotes** (« *Host pilots* »), elle doit donc aussi **accueillir les équipements transmettant des données aux pilotes** (« *Accommodate equipment providing data to pilots* »), **accueillir les équipements recueillant les actions des pilotes** (« *Accommodate equipment sensing pilots actions* ») et **accueillir les ordinateurs et les équipements de gestion de la puissance électrique** (« *Host computers and power management equipment* »). A partir de ces quatre fonctions identifiées, quatre modèles énergétiques sont construits en suivant la méthode originale du CDfA, la Fig. 65 ci-dessous présente les détails du modèle énergétique construit à partir de la fonction « Accueillir les pilotes ».

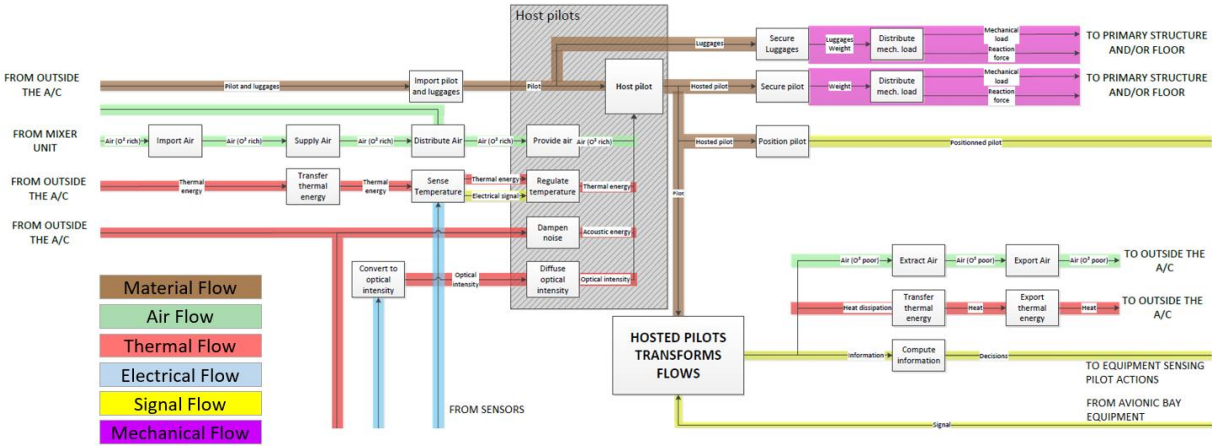


Fig. 65 Détails du modèle énergétique construit à partir de la fonction « Host pilots ».

L'application de la méthodologie de modélisation proposée pour le nCDfA permet d'obtenir le résultat ci-dessous (Fig. 66). On peut constater que la représentation globale est constituée du regroupement des modèles correspondant aux fonctions identifiées. La figure est disponible en annexe (

Annexe 16) avec une échelle plus adaptée à la lecture, où l'on peut voir que les flux énergétiques entre les différentes fonctions sont désormais cohérents. Par exemple, une décision du pilote est transmise aux équipements qu'il utilise pour être convertie en un signal qui sera traité par les ordinateurs de la baie avionique avant d'être transmis aux organes correspondants, en dehors du cadre de l'étude. En retour, ces organes transmettent des signaux d'état qui sont acheminés jusqu'au pilote en passant par les ordinateurs pour être traités, lui permettant de prendre de nouvelles décisions. Les éléments de génération de puissance (« *Power generation* ») et la soute du train d'atterrissage (« *Landing Gear Bay* ») entourés en pointillés sur la figure ci-dessous sont hors du contexte de l'étude mais sont représentés à titre informatif pour aider la compréhension de la continuité énergétique.

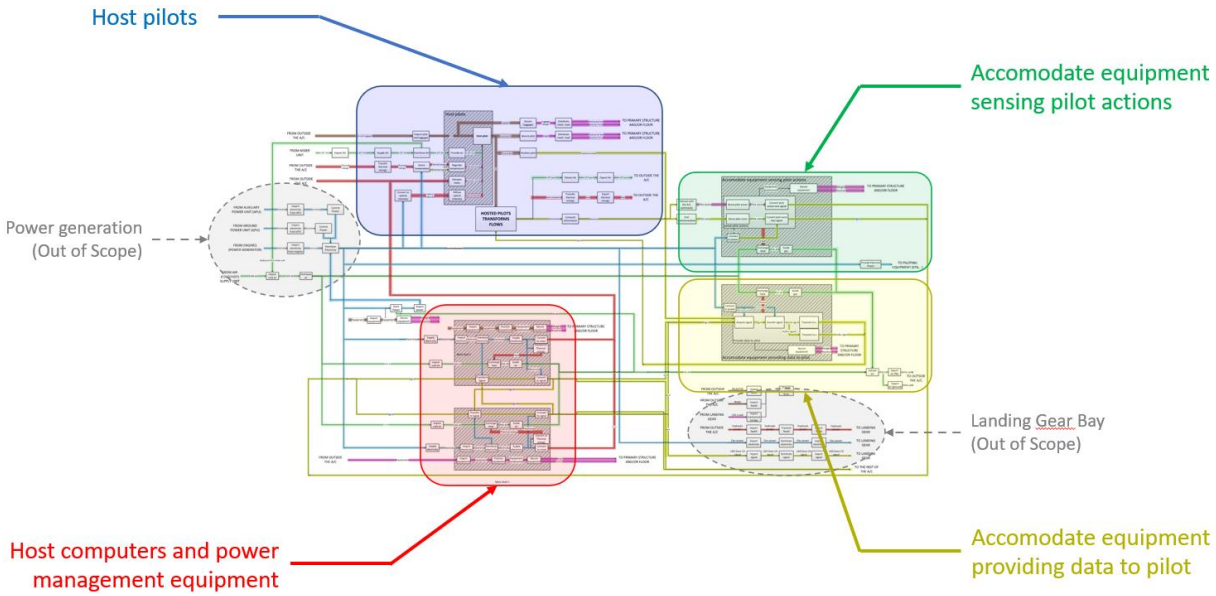


Fig. 66 Vue d'ensemble de la modélisation énergétique basée sur l'analyse fonctionnelle de la pointe avant expliquée.

5.3.2.2 Evaluation de la performance industrielle

La modélisation réalisée précédemment permet d'établir une liste des composants et modules à laquelle l'étude sera restreinte. Cette liste est bornée par le domaine de l'étude (la pointe-avant) et par le niveau d'abstraction auquel l'étude se situe. Dans cette étude, l'application de l'approche CDfA a lieu à un niveau d'abstraction élevé et se base sur les conditions d'un développement en phase de conception architecturale où les composants élémentaires ne sont pas encore figés. Il n'est donc pas possible à ce stade de modéliser le système à des niveaux de détails importants ni de réaliser une évaluation détaillée de la séquence d'assemblage des composants élémentaires. Il est cependant possible d'évaluer l'assemblabilité des différents modules représentés dans le modèle énergétique dans un contexte industriel

défini, d'identifier les éléments les plus pénalisants de l'architecture étudié et d'orienter les efforts de conception vers ces objets si l'on souhaite optimiser la performance industrielle du produit.

Avant d'appliquer la nouvelle méthode d'évaluation décrite plus tôt, un exercice a été proposé à des architectes et des opérateurs du département production (Manufacturing). L'objectif de cet exercice était de hiérarchiser une liste de composants et de modules pour déterminer, d'après leur ressenti, leur expérience et leur jugement quels modules étaient a priori plus pénalisants pour la performance d'assemblage du système que d'autres. La figure ci-dessous (Fig. 67) présente cette hiérarchisation, la valeur 100 étant assignée à l'objet le plus pénalisant pour la performance d'assemblage et la valeur 5 à l'objet le moins pénalisant.

Feeling from Manufacturing Department	Complexity to install	Normalised values
Part A	100	100%
Part B	80	79%
Part C	70	68%
Part D	70	68%
Part E	50	47%
Part F	40	37%
Part G	40	37%
Part H	30	26%
Part I	30	26%
Part J	30	26%
Part K	10	5%
Part L	10	5%
Part M	10	5%
Part N	10	5%
Part O	10	5%
Part P	10	5%
Part Q	5	1%
Part R	5	1%
Part S	5	1%
Part T	5	1%
Part U	5	1%
Part V	5	1%
Part W	5	1%
Part X	5	1%

Fig. 67 Hiérarchisation des modules de la pointe avant basée sur le ressenti des équipes Manufacturing.

Cette hiérarchisation est subjective et n'est à considérer que dans le cas d'étude restreint à l'étude détaillée ici. Les valeurs ne sont pas parfaitement représentatives de la réalité mais elles donnent néanmoins une idée des composants qui sont supposés être mis en avant par

l'application de la méthode ainsi que les ordres de valeurs que l'on est supposé retrouver entre des éléments peu pénalisants et les éléments les plus pénalisants. La comparaison des résultats expérimentaux avec ces résultats avec ces valeurs permettra de valider l'approche mais ne constituera en aucun cas une preuve de la robustesse de la méthode. Si une différence est observée entre les deux hiérarchisations elle permettra d'ajuster les valeurs de pondération des différents domaines évoqués plus tôt de manière empirique.

L'application de la méthode à la liste d'objets du cas d'étude donne les résultats suivants (Fig. 68). La colonne « Score » donne les valeurs brutes obtenues après avoir regroupé les scores des différents domaines, la colonne « Normalised score » traduit ces résultats en pourcentage par rapport aux valeurs extrêmes de la colonne « Score ».

Modules	Score	Normalised score
Part A	1,67	100%
Part B	1,56	90%
Part G	1,33	69%
Part D	1,28	64%
Part E	1,25	61%
Part I	0,97	36%
Part F	0,84	24%
Part C	0,79	19%
Part K	0,73	14%
Part H	0,71	12%
Part J	0,70	11%
Part M	0,66	7%
Part L	0,66	7%
Part P	0,63	5%
Part Q	0,63	5%
Part X	0,63	5%
Part R	0,63	5%
Part U	0,63	5%
Part S	0,63	5%
Part V	0,63	5%
Part T	0,63	5%
Part W	0,63	5%
Part O	0,58	0%
Part N	0,58	0%

Fig. 68 Hiérarchisation des modules de la pointe avant à l'issue de l'application de l'approche CTOC.

Plusieurs observations peuvent alors être réalisées d'après la comparaison entre les résultats expérimentaux et les valeurs données par les équipes de production. Tout d'abord, on

retrouve quatre des cinq objets désignés comme étant les plus critiques. En effet, les composants A, B, D et E apparaissent bien en tête du classement avec des ordres de grandeur proches de ceux indiqués dans les valeurs attendues. Pour les objets intermédiaires du classement, l'ordre n'est pas tout à fait le même mais les valeurs restent assez proches de l'attendu. Les objets les moins critiques ne se retrouvent pas dans l'ordre attendu, cependant les valeurs de criticité sont assez faibles et il n'est donc pas pertinent de considérer le classement pour des écarts aussi faibles. Ils sont tous négligeables comparés aux objets critiques et intermédiaires.

Deux anomalies apparaissent cependant, le composant C attendu en 3ème position avec une valeur de 68% se retrouve en 8ème position avec une valeur de 19% et le composant G, attendu en 7ème position avec une valeur de 37% se retrouve en 3ème position avec une valeur de 69%. Ces différences particulièrement marquées peuvent avoir plusieurs origines et nécessiteront d'être examinées attentivement. Certains des critères non géométriques ont peut-être été mal évalués, il serait donc pertinent de se repencher spécifiquement sur l'évaluation de ces composants. Les valeurs attendues données par les équipes de la production sont approximatives et sont nécessairement imprécises, il pourrait être précieux de vérifier avec eux les raisons du classement de ces deux objets. Enfin, les pondérations des domaines évoquées plus tôt sont neutres pour la première itération, une étude spécifique de sensibilité de ces valeurs de pondération pourrait permettre de se rapprocher des résultats attendus. L'étude est toujours en cours et il n'est pas encore possible d'apporter une réponse formelle à cette question.

5.3.3 Axes de développement futurs

Deux axes de développement principaux sont aujourd'hui identifiés pour l'approche CDfA. Tout d'abord, consolider les propositions détaillées ici en validant les différents critères et domaines définis ainsi que leurs pondérations respectives par le biais de nouvelles applications à des cas d'études. Cela permettra de vérifier la robustesse de l'approche tout en permettant d'adresser des problématiques qui n'auraient peut-être pas été anticipées. Dans un second temps, l'automatisation du processus semble nécessaire à une industrialisation de la méthode, étant donné que plusieurs itérations sont nécessaires pour optimiser une architecture en termes de performance industrielle. De plus comme évoqué plus tôt, l'approche présente un potentiel important pour l'exploration de scénarios et d'hypothèses de conception qui ne pourra être réellement exploité qu'avec un processus automatisé permettant des itérations rapides une fois les hypothèses de départ validées.

5.4 CONCLUSION

Les développements apportés à l'approche CDfA permettent de répondre aux limitations identifiées, son application à un cas d'étude a permis d'en vérifier l'applicabilité mais aussi de confronter les résultats expérimentaux avec la réalité industrielle. Le CDfA permet donc d'évaluer des architectures candidates en identifiant des composants critiques, permettant d'orienter et d'optimiser les efforts de conception. Selon le niveau d'abstraction, la méthode peut évaluer l'assemblage d'un sous-système comme des grands ensembles d'un produit complexe. Cependant, la nouvelle méthodologie de modélisation de l'approche CDfA, même si elle répond aux problématiques observées et permet de représenter un système complexe présente des limitations. La méthodologie n'est pas suffisamment encadrée et permet beaucoup de liberté au concepteur dans son appréciation du niveau de détail nécessaire. Ce manque de cadre peut mener à des représentations pas assez exhaustives, à des hétérogénéités de niveaux d'abstraction de la représentation et globalement à un manque de maîtrise du système représenté et des flux énergétiques mis en jeu. Aussi, la méthode de modélisation préconisée par l'approche CDfA n'est que descriptive et n'offre pas au concepteur les moyens de concevoir le système en le modélisant. Pour répondre à cette faiblesse de l'approche, et pour atteindre l'objectif général de ces travaux, nous proposons de lier l'approche CTOC et l'approche CDfA. La méthodologie de modélisation de l'approche CTOC permet simultanément de concevoir un système tout en apportant un cadre robuste pour la modélisation d'un système complexe. Le chapitre suivant s'attardera donc sur la création du lien entre les deux approches, la possibilité d'utiliser l'approche CTOC et d'exploiter le modèle obtenu pour appliquer l'approche CDfA.

6. CHAPITRE 6 : APPROCHE GLOBALE DE CONCEPTION ARCHITECTURALE

6.1 INTRODUCTION

Dans le chapitre 3 propositions scientifiques, nous avons dégagé les thèmes prioritaires et précisé les questions scientifiques servant de base aux travaux de recherche de cette thèse. Des propositions ont été faites pour y répondre auxquelles ont été associées des questions de recherche :

(iv) Gérer le lien entre la vue fonctionnelle et la vue physique du produit en phase de conception préliminaire.

   a. *Comment construire simultanément les vues fonctionnelles et physiques ?*
   b. *Les méthodes permettant de construire des représentations multi-niveaux d'un produit sont-elles compatibles avec la complexité du produit étudié ?*

(v) Intégrer des critères de performance industrielle en phase de conception préliminaire.

   a. *Comment intégrer des critères d'assemblabilité en phase de conception préliminaire ?*

(vi) Définition d'un nouveau paradigme de conception préliminaire.

   a. *Comment lier la vue industrielle du produit au couple Fonctionnel/Physique ?*

La gestion de la transition de la vue fonctionnelle à la vue physique par une synchronisation de leurs constructions en phase de conception préliminaire est permise par l'approche CTOC et les développements proposés. L'application à un cas d'étude a permis d'en vérifier la compatibilité avec les systèmes complexes. Ensuite, l'identification des limitations de l'approche CDfA a mené à la proposition de développements spécifiques et à l'élaboration d'une méthode permettant de prendre en compte les contraintes industrielles exprimées par les équipes de production dès les phases de conception architecturales. Les deux premières propositions ont donc été explorées et des réponses ont été apportées aux questions exprimées. Il reste à explorer la troisième proposition cherchant à lier la vue fonctionnelle, la vue physique et la vue industrielle par une méthodologie globale. L'objet de ce dernier chapitre sera donc de valider la synergie entre les approches CTOC et nCDfA et de comprendre les avantages d'un tel rapprochement. Cela permettra finalement de formaliser la méthodologie globale de

conception architecturale avant de récapituler les résultats de ces travaux de recherche. Les perspectives de recherche futures concluront ce mémoire en présentant les axes de recherche peu ou pas explorées ici et les perspectives ouvertes par cette étude.

6.2 LIER LES APPROCHES CDFA ET CTOC

6.2.1 Mise en évidence de la synergie entre les approches

L'approche CTOC propose une méthodologie de conception par une approche énergétique. A partir de l'analyse fonctionnelle d'un système, on peut représenter des flux énergétiques associées aux fonctions identifiées et les décomposer en un modèle CTOC (Convertisseur, Transmetteur, Opérateur, Contrôle). Comme nous l'avons décrit dans le chapitre 4, cette méthodologie permet de concevoir un système en phase de conception architecturale en construisant simultanément les vues fonctionnelle et physique du produit. De plus, cette approche top down permet de descendre dans les niveaux d'abstractions du système au fur et à mesure du processus de conception, en détaillant les étapes du cheminement énergétique, les composantes d'un module ou d'un système, jusqu'à la pièce élémentaire et aux flux énergétiques les plus simples. Ce processus de développement cadré permet de conserver la traçabilité des choix de conception. Les différents niveaux d'abstraction du modèle sont bien identifiés au fur et à mesure de la construction du modèle et l'exhaustivité de la représentation énergétique est garantie tant que la cohérence du cheminement énergétique est conservée.

L'approche nCDfA propose une méthode d'évaluation de la performance industrielle d'une architecture restreinte à l'étude de l'assemblage du système et de ses composants. La méthodologie de modélisation associée à l'approche part aussi de l'analyse fonctionnelle du système étudié et permet de le décomposer en modules liés par des interfaces, l'ensemble représentant les flux énergétiques associés aux fonctions identifiées. Le nCDfA ne préconise cependant pas de méthode d'analyse fonctionnelle, celle-ci est donc à la discrétion du concepteur. Le regroupement des représentations énergétiques des différentes fonctions permet de construire un modèle global à partir duquel il sera possible d'évaluer la performance industrielle du système à travers des caractéristiques propres aux quatre domaines retenus : (i) interface, (ii) assemblage, (iii) ergonomie et (iv) composant. L'approche est décrite et discutée dans le chapitre 5 qui met en avant certaines faiblesses de l'approche. Les méthodologies de représentation énergétique du système et d'évaluation des interfaces ne sont pas assez robustes et pas adaptées aux systèmes complexes présentant de nombreux flux énergétiques majeures et des composants souvent couplés, hybridés ou mutualisés.

L'évaluation des différents composants d'une architecture ont permis d'obtenir des résultats intéressants qui semblent corroborer la réalité industrielle, permettant d'établir une hiérarchisation des objets les plus critiques pour la performance d'assemblage mais aussi de discriminer des architectures d'après leur performance industrielle. Cependant, si l'évolution de la méthodologie de modélisation a permis de construire une représentation suffisante pour le cas d'application à la pointe avant d'un avion, elle souffre encore de plusieurs faiblesses. En premier lieu, elle ne permet pas la conception du système étudié mais simplement sa représentation. Aussi, le concepteur est dépendant d'une étape antérieure de conception ce qui peut le pénaliser dans son analyse globale du système. Il n'y a donc nécessairement pas non plus de traçabilité des choix de conception du système étudié. Le processus de construction des modèles énergétiques n'est encadré que par les contraintes de continuité énergétique et d'unicité des modules énoncées dans le chapitre 5 (§ 5.2.2). Le modèle risque ainsi de varier d'un concepteur à un autre par manque de cadre méthodologique entraînant une incertitude quant à sa fiabilité. Enfin, la méthodologie de modélisation du CDfA propose au concepteur de représenter le système au niveau de détail global qui lui convient pour réaliser ensuite son étude de la performance industrielle. Cette approche ne garantit pas un niveau d'abstraction global homogène puisque les modèles énergétiques des différentes fonctions sont réalisés séparément avant d'être regroupés. De plus, le niveau d'abstraction auquel le concepteur travaille n'est pas formalisé clairement, entraînant une incertitude dans la représentation. Tous ces éléments tendent à réduire le niveau de maîtrise du système que peut avoir le concepteur et ne favorise donc pas la bonne application de la suite de l'approche CDfA. De plus, si l'on applique le CDfA après avoir appliqué le CTOC, cela implique de réaliser deux modélisations d'un même système. Cette redondance n'apporte pas de valeur ajoutée à la démarche globale de conception, aussi la proposition de profiter d'une synergie entre les approches CTOC et CDfA semble pertinente. En exploitant le modèle CTOC du système étudié comme modèle énergétique comme base d'application de l'évaluation de la performance industrielle par le CDfA nous sommes en mesure de proposer une approche globale et d'éviter des redondances inutiles dans le processus.

6.2.2 Le CTOC comme base d'application du CDfA

Afin de valider cette proposition, nous cherchons à vérifier s'il est possible de permuter la représentation obtenue en suivant la méthodologie préconisée par le CDfA par le modèle CTOC correspondant au même cas d'étude. Le cas d'étude utilisé pour l'application du CDfA

dans le chapitre 5 était restreint à la pointe avant d'un avion de ligne, celui du CTOC était un avion de ligne dans son ensemble comprenant donc, entre autres, la pointe avant. Il est donc possible d'utiliser comme base de réflexion le modèle CTOC restreint à la pointe avant et d'en vérifier la compatibilité avec l'approche CDfA.

L'analyse fonctionnelle du système étudié sert de base commune aux deux méthodes. Pour le cas d'étude restreint à la pointe avant, les fonctions retenues sont :

- Accueillir les pilotes (« *Host pilots »).*
- Accueillir les équipements transmettant des données aux pilotes (« *Accommodate equipment providing data to pilots* »).
- Accueillir les équipements recueillant les actions des pilotes (« *Accommodate equipment sensing pilots actions* »).
- Accueillir les ordinateurs (« *Host computers* »).

L'application du CDfA au chapitre précédent a permis d'obtenir un modèle pour chacune de ces fonctions qui ont pu être regroupées en une modélisation énergétique globale de la pointe avant (Fig. 69). Les quatre fonctions sont bien représentées sur ce modèle et des interfaces énergétiques les lient en maintenant une cohérence énergétique. La fonction « Accueillir les pilotes » reçoit entre autres des informations en entrée, le pilote fait des choix de pilotage qu'il transforme alors en décisions et en actions. Il applique ces décisions sur l'avion par le biais des organes de pilotage qui les transmettent aux calculateurs. Là les données brutes issues des différents capteurs du vol sont agrégées avec les commandes des pilotes et soumises aux lois de pilotage et à des paramètres de vol. Ces données, une fois traitées, sont renvoyées aux équipements fournissant de l'information aux pilotes qui peut alors prendre de nouvelles décisions. Certains flux énergétiques arrivent de l'extérieur du modèle, d'autres en sortent mais ils s'inscrivent dans un modèle global de l'avion complet. Pour rappel, le modèle ici décrit est restreint à la pointe avant.

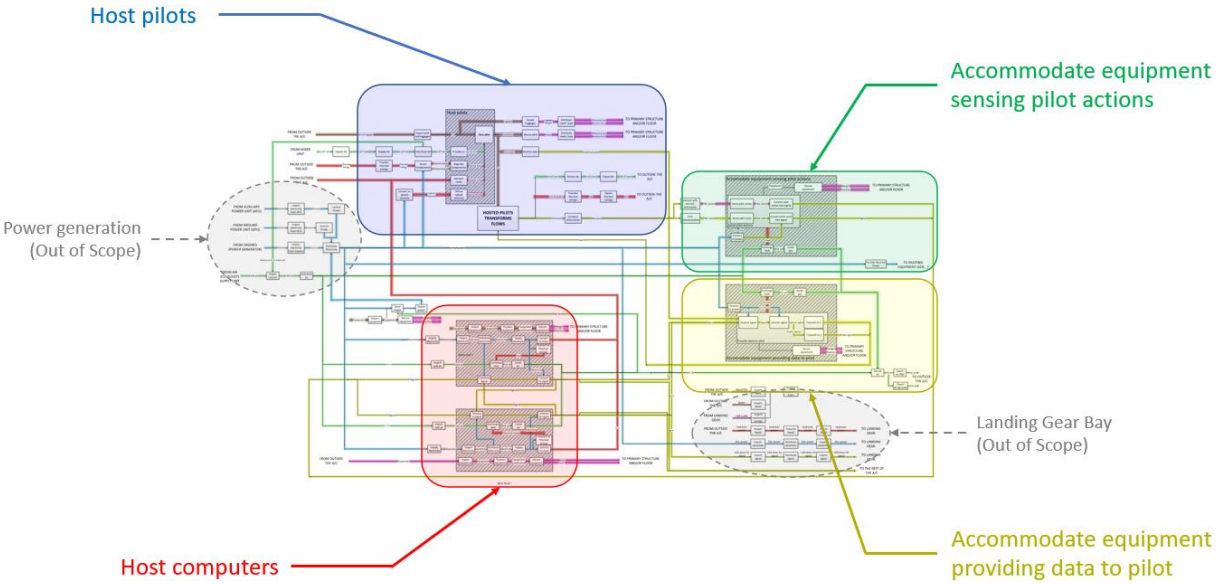


Fig. 69 Vue d'ensemble de la modélisation énergétique basée sur l'analyse fonctionnelle de la pointe avant expliquée.

Le modèle CTOC établi au chapitre 4 propose une étude de l'avion complet et le modèle de plus haut niveau d'abstraction représente les fonctions de plus haut niveau de l'avion (Fig. 70).

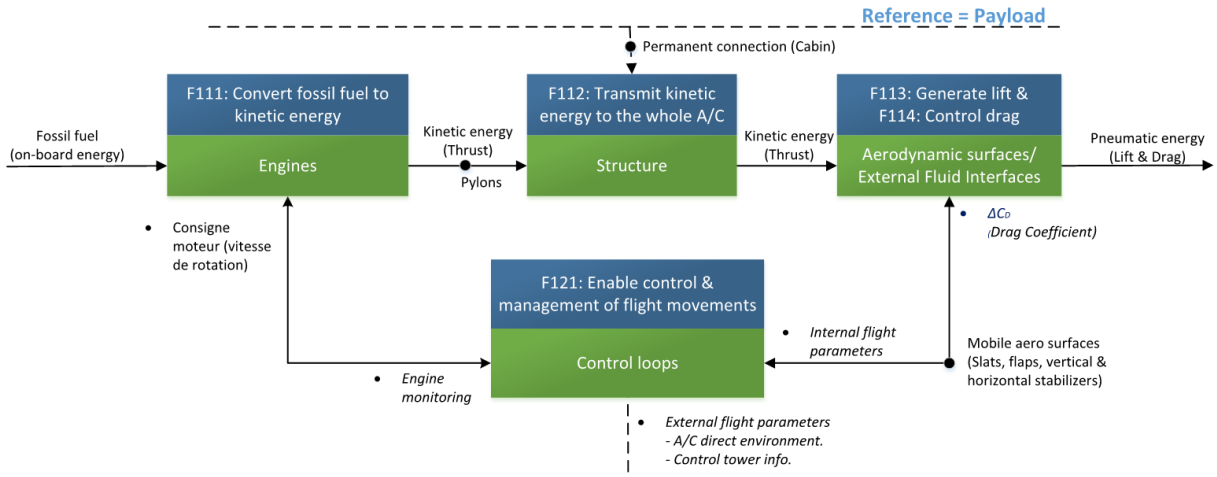


Fig. 70 Modèle CTOC de tête d'un avion de ligne complet.

Si l'on isole le module « Boucles de contrôle » (*Control loops*), la fonction « Permettre le contrôle et la gestion des mouvements en vol » (*Enable control & management of flight movements*) et les flux énergétiques associés à ces éléments du modèle de tête, on obtient un modèle boîte noire. Le concepteur peut alors décomposer cette boîte noire en un modèle CTOC de niveau d'abstraction inférieur, à condition de conserver la cohérence énergétique, c'est-à-dire que les éléments décrits dans le modèle boîte noire doivent se retrouver sur le modèle CTOC obtenu après décomposition. La figure ci-dessous montre ce processus de décomposition, on retrouve effectivement sur les deux modèles, des paramètres de vol interne

et externe en entrée et des consignes moteurs et des commandes sur les surfaces aérodynamiques en sortie (Fig. 71).

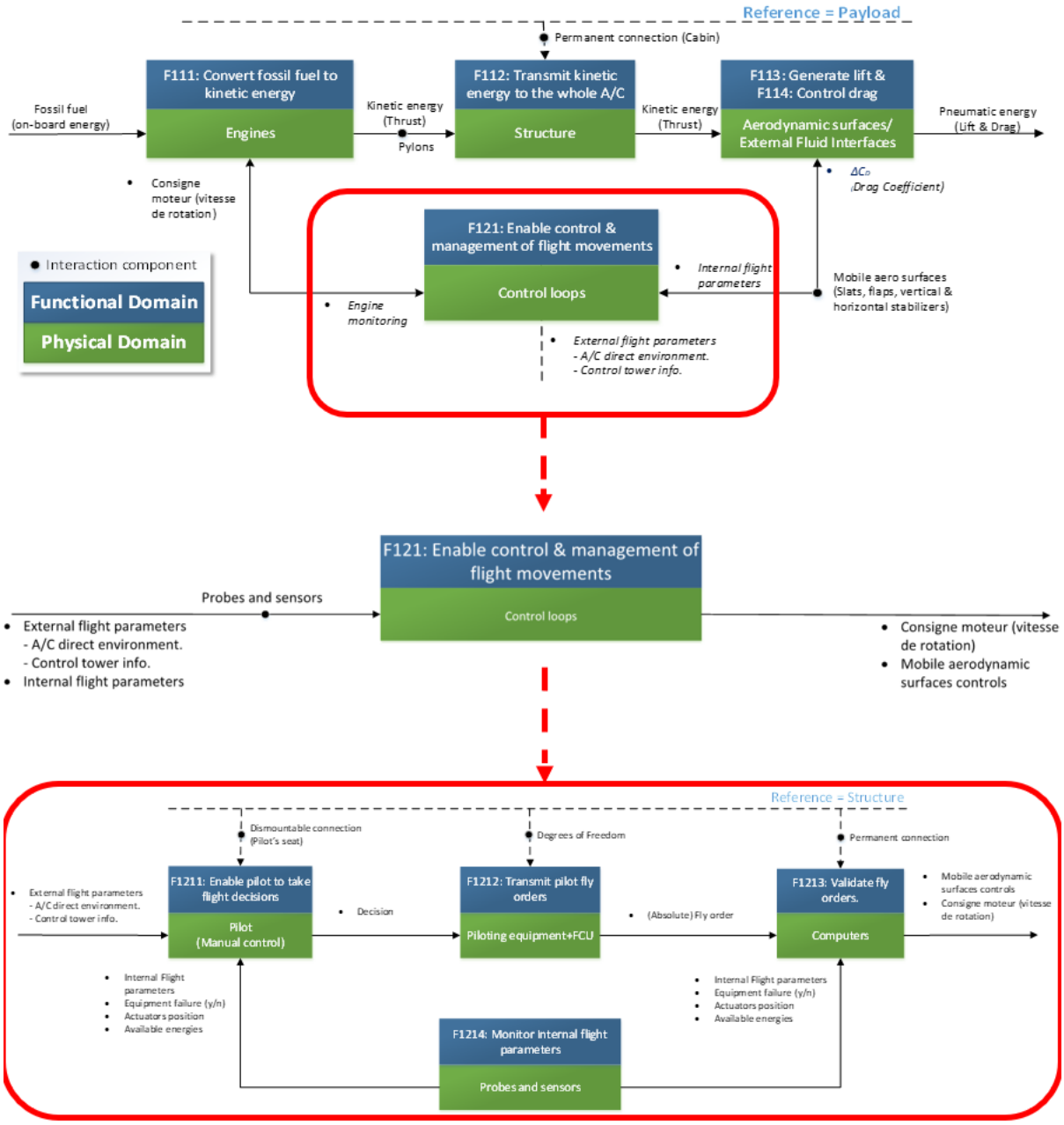


Fig. 71 Décomposition du module « Boucles de contrôle » et des flux énergétiques associés.

Afin de respecter le formalisme du modèle CTOC, ce nouveau modèle présente un convertisseur, un transmetteur, un opérateur et un élément de contrôle. Le pilote est le convertisseur, il prend des décisions à partir des informations d'entrée. Il transmet cette décision aux calculateurs par l'intermédiaire des équipements de pilotage qui sont donc l'organe transmetteur. Les calculateurs opèrent ces décisions avant de les transformer en commandes aux différents organes de vol, ils sont donc l'organe opérateur. Le contrôle est assuré par les différents capteurs et sondes qui collectent des données de vol interne et les envoient aux

calculateurs pour affiner les calculs, aux pilotes pour leur permettre de prendre des décisions. A ce niveau d'abstraction du modèle CTOC, on retrouve donc la logique mise en avant dans la description de la modélisation énergétique de la pointe avant par l'approche CDfA. Le seul ensemble manquant est celui correspondant à la fonction « Accueillir les équipements transmettant des données aux pilotes ». Cependant, si l'on effectue une nouvelle décomposition, cette fois-ci du module « Pilotes (contrôle manuel) », on peut obtenir un nouveau CTOC de niveau d'abstraction inférieur où ces équipements apparaissent. La Fig. 72 ci-dessous présente le modèle boîte noire de ce module avant décomposition :

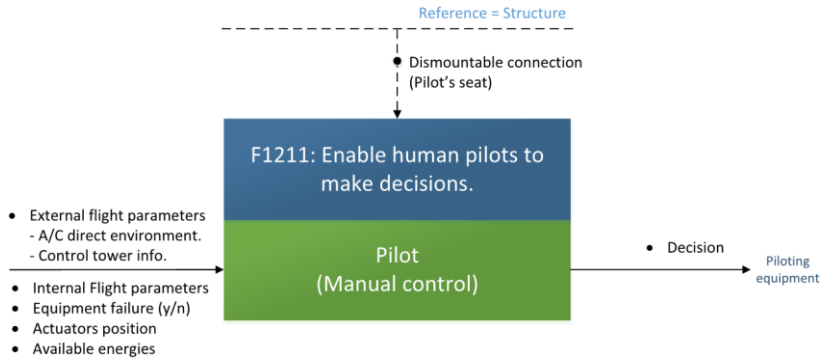


Fig. 72 Le module « pilote » et les flux énergétiques associés sont isolés avant d'être décomposés en un nouveau modèle CTOC.

La décomposition de ce modèle permet la construction du modèle CTOC ci-dessous, respectant le formalisme du CTOC et la cohérence énergétique (Fig. 73). On peut constater que l'organe convertisseur de ce modèle est le module « Cockpit (moniteurs, instruments de navigation, radio) » donc la fonction associée est « F12115 : Diffuser des informations au pilote ». Si le formalisme de l'analyse fonctionnelle n'est pas identique, on reconnait la même fonction qui est de transmettre des données de vol au pilote et on retrouve les équipements qui apparaissent dans le modèle énergétique du CDfA. Ici, ces équipements convertissent des données envoyées par le calculateur et par les sondes et capteurs en signaux d'informations optique et audio pour le pilote, ces informations circulent dans l'environnement pressurisé du cockpit, de l'air, avant d'atteindre les yeux et les oreilles du pilote. Ce dernier agit donc ici comme un opérateur qui va effectivement utiliser ces données pour prendre une décision.

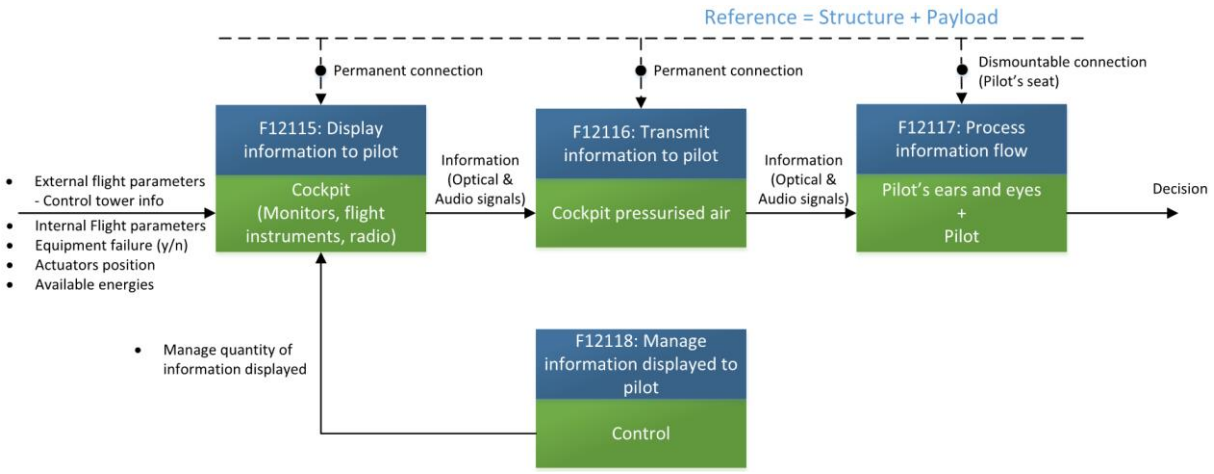


Fig. 73 Modèle CTOC issu de la décomposition du modules « pilote » et des flux énergétiques associés (Fig. 72).

Pour replacer ces modèles dans le cas d'étude général, il est intéressant de se repencher sur le modèle CTOC global présenté initialement au chapitre 4 (Fig. 74). Le cas d'étude restreint à la pointe avant exclue les moteurs, la structure et les surfaces aérodynamiques mobiles. Cependant, on retrouve le modèle CTOC de tête, la 1ère décomposition du module « Boucles de contrôle » et la 2nde décomposition du modules « Pilotes ».

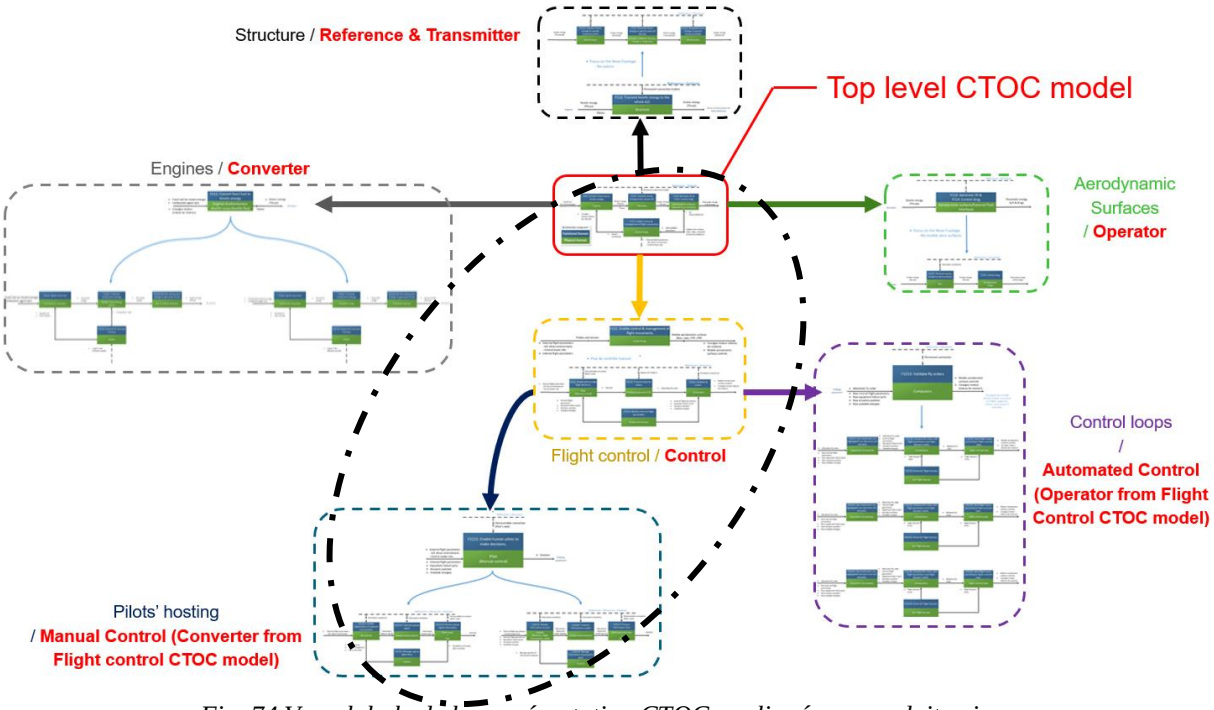


Fig. 74 Vue globale de la représentation CTOC appliquée au produit avion.

Ainsi, dans le même cadre d'application et pour le même cas d'étude, l'approche CTOC et l'approche CDfA permettent de construire des modélisations énergétiques de systèmes complexes. Les deux présentent des modules et des interfaces énergétiques, les deux cherchent à maintenir une cohérence énergétique entre les modules et les niveaux d'abstraction. Cependant, les avantages de la modélisation par l'approche CTOC ont été détaillés plus tôt et

la comparaison des deux modèles obtenus pour ce cas d'étude le confirme. En effet, on constate que le modèle énergétique obtenu par l'approche CDfA mélange les différents niveaux d'abstraction et de détail du système de façon hétérogène tandis que l'approche CTOC organise les niveaux d'abstraction en décomposition successives. Ce processus de construction permet au concepteur de travailler au niveau de détail souhaité pour son étude sans pour autant empêcher d'étudier plus en détail certaines parties du système. De plus, l'application à des systèmes complexes va entraîner une démultiplication du nombre de modules, d'interfaces et de niveaux d'abstraction ce qui va exacerber les faiblesses et le manque de robustesse de la modélisation de l'approche CDfA.

L'étude de la performance industrielle par l'approche CDfA ne nécessite qu'un modèle composé de modules et d'interfaces énergétiques. Ainsi, il est possible d'appliquer le processus d'évaluation de la performance d'assemblage à partir d'un modèle CTOC sans le modifier. Les modules et les interfaces représentés par le modèle CTOC peuvent être évalués selon les domaines préconisés par le CDfA. L'évaluation sera même enrichie par cette synergie entre les approches puisqu'en maîtrisant le niveau d'abstraction du modèle énergétique, on peut réaliser l'évaluation de la performance industrielle au niveau de détail souhaité. Mieux, on peut choisir de réaliser une évaluation globale de l'architecture d'un système complexe comme on peut restreindre l'étude à un module ou un ensemble de composants avec un niveau de détail important.

Le paragraphe suivant s'attache à formaliser l'approche globale de conception architecturale permise par ces travaux de recherche.

6.3 FORMALISATION DE L'APPROCHE GLOBALE DE CONCEPTION ARCHITECTURALE

Le chapitre 3 de cette thèse détaillait les propositions scientifiques et les axes de recherche poursuivis par ces travaux de recherche. Pour rappel, la troisième proposition était de formaliser un paradigme de conception architecturale cohérent avec les deux premières propositions et d'y associer une approche globale de conception architecturale (Fig. 75). A l'issue de ces travaux de recherche et grâce à ses apports, nous pouvons à présent détailler ce processus.

Applicable dès la phase de conception préliminaire, l'approche débute par une analyse fonctionnelle du produit à concevoir. La méthode d'analyse est à la discrétion du concepteur, et donc nécessairement subjective, mais elle lui permet aussi de diriger ses efforts de conception. S'il choisit de détailler l'analyse des fonctions de contrôle, des fonctions de vol ou

encore des fonctions liées à la performance économique, il orientera l'analyse dans une certaine direction. A partir de cette analyse, le concepteur dégage quelques fonctions de haut niveau du système. Leur nombre peut varier en fonction du système, de sa complexité, et des aspects sur lesquels le concepteur souhaite se concentrer.

Représentation du couple fonctionnel/Physique

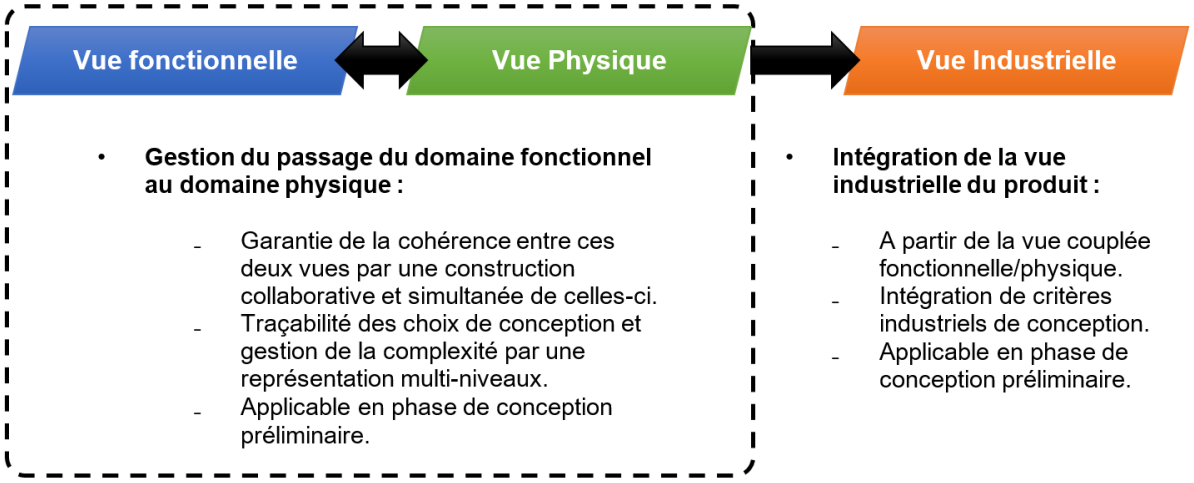


Fig. 75 Représentation générale de l'approche globale de conception

A partir de ces fonctions de haut niveau, il peut commencer à réaliser un premier modèle CTOC qui servira de base aux décompositions successives. En respectant les contraintes de modélisation CTOC, le concepteur peut construire simultanément les vues fonctionnelles et physiques, faire des choix de conception au fur et à mesure de la construction du modèle et conserver la traçabilité de ces choix. Chaque nouvelle décomposition du modèle CTOC de tête lui permet de descendre d'un niveau d'abstraction dans son étude du système, lui accordant la maîtrise du niveau de détail avec lequel il souhaite travailler. Ainsi, pour des itérations rapides et des grands choix d'architecture, il pourra se contenter d'un niveau de détail faible. A l'inverse il pourra préférer décomposer certains composants du système jusqu'à un niveau de détail important pour l'étudier spécifiquement. A ce moment du processus de conception architecturale, les vues fonctionnelles et physiques ont été construites simultanément et sont liées, une modification d'une fonction sur le modèle CTOC aura potentiellement un impact sur les composants associés.

Le modèle CTOC obtenu, une fois satisfaisant pour les besoins du concepteur, servira de base d'application à l'approche CDfA. Celle-ci, par un processus d'analyse spécifique des différentes caractéristiques de chaque composant dont le détail est présenté au chapitre 5, propose de hiérarchiser les différents modules et interfaces du cheminement énergétique représentés par le modèle CTOC global. Cette hiérarchisation a pour but d'identifier des objets critiques pour la performance d'assemblage du système étudié et donc d'orienter les efforts de

conception. Selon le niveau d'abstraction auquel se situe l'étude, elle peut aussi discriminer des architectures en éliminant celles qui présentent des performances industrielles trop faibles. L'effort de conception résultant de cette analyse sera alors facilité par l'emploi préalable du CTOC qui permettra au concepteur de retracer ses choix de conception, de les remettre en question et d'en mesurer les impacts sur la vue fonctionnelle et la vue physique.

6.4 CONCLUSION

Par un processus itératif, cette approche globale de conception architecturale permet de concevoir des architectures dès la phase de conception préliminaire et d'optimiser leur performance industrielle d'assemblage. Ainsi, les vues fonctionnelle, physique et industrielle du produit sont liées par cette approche globale de conception architecturale. La réponse apportée à la troisième proposition de recherche de cette étude répond aux exigences de ces travaux de recherche et répondent aux problématiques de l'environnement de conception étudié.

7. CHAPITRE 7 : CONCLUSIONS, LIMITATIONS ET PERSPECTIVES

7.1 CONCLUSIONS

L'objectif global de cette thèse était d'apporter des réponses à l'industrie et à la recherche en explorant une nouvelle approche de la conception architecturale. Le paradigme de conception traditionnel n'aborde pas la conception par l'axe des énergies mises en jeu par le système à concevoir mais plus souvent par celui du comportement attendu du système et des contraintes de conception imposées. Si ces éléments restent essentiels à tout exercice de conception sérieux, les moyens d'aboutir à une architecture cohérente peuvent évoluer. Cette étude a pu analyser un environnement de conception industriel aéronautique fortement contraint par des pressions économiques, politiques, industrielles et concurrentielles. Des problématiques fortes ont été dégagées et ont servi à proposer des axes de recherche communs à la conception architecturale des systèmes complexes.

La première proposition était de gérer le lien entre la vue fonctionnelle et la vue physique du produit en phase de conception préliminaire. Les processus de conception traditionnels sont linéaires et se basent sur une analyse fonctionnelle de haut niveau pour démarrer le processus de conception. Cependant, les vues fonctionnelles et physiques du produit sont rapidement décorrélées, la modification de l'un n'impactant pas nécessairement l'autre des incohérences apparaissent au fur et à mesure du développement qui rendent complexe la traçabilité des choix de conception et ne favorisent pas l'innovation architecturale. En apportant une solution permettant de construire simultanément les vues fonctionnelle et physique, la proposition consiste à créer un lien fort entre ces vues et à le conserver au fil du développement. Les questions de recherches sont donc rapidement apparues « *Comment construire simultanément les vues fonctionnelles et physiques ?* » et « *Les méthodes permettant de construire des représentations multi-niveaux d'un produit sont-elles compatibles avec la complexité du produit étudié ?* ». Un point commun aux différentes phases du cycle de vie du produit et du processus de conception sont les énergies physiques mises en jeu. Une interface énergétique entre deux composants sera décrite dans la vue fonctionnelle, conçue dans la vue physique et fabriquée/assemblée dans la vue industrielle. Une approche de conception se basant sur les énergies mises en jeu par le système à concevoir a donc représenté un point de départ pertinent pour ces recherches. L'approche CTOC propose une méthodologie de conception et de modélisation basée sur une analyse fonctionnelle de haut niveau et la formalisation des énergies converties, transmises, opérées et contrôlées par le système à un niveau d'abstraction donné. Cette approche a été retenue car elle est applicable dès la phase de conception

préliminaire. Elle se concentre sur le flux d'énergie primaire et une représentation minimale requise pour décrire le système ce qui la rend compatible avec l'objectif de lier les composants fonctionnels et les composants physiques en décrivant une fonction et un composant. Deux inconnues ont cependant dû être levées, la première concernait la capacité de l'approche CTOC à représenter des systèmes complexes, la littérature ne donnant pas d'exemple à ce sujet. Il était nécessaire de vérifier la robustesse du processus mais aussi la capacité pour un concepteur à pouvoir naviguer dans la représentation au fur et à mesure du développement. Enfin, la littérature n'abordait pas la question de la représentation des systèmes de contrôle complexes, il a donc fallu développer la méthodologie pour lui permettre de représenter des boucles de contrôles de façon exhaustive tout en garantissant la cohérence énergétique avec le modèle global.

La seconde proposition consistait à intégrer des critères de performance industrielle en phase de conception préliminaire. De nombreuses industries de systèmes complexes, qu'il s'agisse de l'aéronautique, de l'automobile, du naval ou du spatial, subissent des contraintes fortes imposées par la performance industrielle de leurs produits. Cependant, les critères de performance industrielle sont difficiles à prendre en compte lors de la phase de conception architecturale, en premier lieu parce que les méthodes de conception traditionnelles ne les intègrent pas, mais aussi car il y a peu de données disponibles à cette étape du développement. L'intégration de nouveaux critères de conception peut aussi être contre-productif en augmentant de façon exponentielle le niveau de complexité du processus de développement. Parmi les méthodes permettant d'évaluer la performance industrielle d'un système, le CDfA apportait des pistes de réflexion en proposant une évaluation des performances d'assemblage dès la phase de conception architecturale à partir de l'étude des flux énergétiques du système. Cependant, la méthode s'est avérée inadaptée à l'application aux systèmes complexes et il a fallu lui apporter des développements spécifiques. La méthodologie d'évaluation des modules et interfaces énergétiques a été entièrement revue pour proposer une évaluation spécifique au contexte industriel et à l'environnement de conception, permettant l'analyse personnalisée d'une architecture candidate et une hiérarchisation de ses composants d'après des critères d'assemblabilité. Les résultats expérimentaux sont proches de la réalité des lignes d'assemblage et confirment le potentiel de la méthode pour la discrimination d'architectures ou de composants en fonction de leur performance industrielle d'assemblage. Le développement de l'approche CDfA n'est pas terminé au moment de la rédaction de ce mémoire et un groupe de travail continue à affiner la méthodologie au-delà de cette thèse.

La troisième et dernière proposition est de lier l'ensemble de ces apports en un nouveau paradigme de conception préliminaire. La première proposition a permis de lier les vues fonctionnelle et physique e la seconde proposition a permis d'intégrer des critères de performance industrielle en phase de conception architecture. La question est donc maintenant de définir comment lier la vue industrielle du produit au couple Fonctionnel/Physique ? L'identification d'une forte synergie entre les approches CTOC et CDfA a permis la construction d'une méthodologie globale de conception architecturale. En effet, de nombreuses faiblesses identifiées sur la méthodologie de modélisation énergétique préconisée par l'approche CDfA sont compensées avantageusement par le couplage avec le CTOC. L'utilisation du modèle CTOC comme base d'application de l'approche CDfA apporte de nombreux avantages et notamment une plus grande maîtrise d'un système malgré sa complexité. Le modèle CTOC global remplit les conditions nécessaires à l'application de la méthodologie d'évaluation de la performance industrielle décrite par l'approche CDfA. Il est donc possible de formaliser une méthodologie globale de conception architecturale liant les vues fonctionnelle, physique et industrielle du produit applicable dès la phase de conception préliminaire.

7.2 LIMITATIONS

L'approche présente quelques limitations malgré les avantages potentiels pour l'architecture de systèmes complexes. C'est un problème récurrent de la conception des systèmes complexes mais descendre dans les niveaux de détail entraîne généralement une explosion du nombre de pièces, de systèmes, d'interfaces et d'éléments interconnectés. Cela va générer une nouvelle complexité tant au niveau de la conception et la modélisation par le CTOC qu'au niveau de l'évaluation de la performance industrielle par le CDfA. Une première réponse serait de spécifier les niveaux de détails adaptés aux besoins des concepteurs, en se concentrant sur le minimum d'éléments nécessaires à la compréhension du système et à son évaluation, on peut réussir à optimiser l'effort tout en obtenant les informations essentielles à l'étude. Si l'objectif est de réaliser un choix entre deux architectures proches, il n'est probablement pas nécessaire de descendre à des niveaux de détail importants. De même que si l'on cherche à optimiser l'assemblage d'un module interne, il n'est probablement pas utile de modéliser l'ensemble du système au même niveau de détail. La seconde réponse à apporter à cette limitation est bien plus lourde mais consisterait à automatiser le processus global, en guidant le concepteur à travers la méthode et optimisant les itérations si elles sont nécessaires.

7.3 PERSPECTIVES

Plusieurs perspectives de recherche sont identifiées pour ce domaine de recherche. Tout d'abord, continuer à développer les deux approches, séparément et au sein de l'approche globale. En les appliquant à de nouveaux cas d'études, il est probable que de nouvelles limitations apparaissent qui nécessiteront d'être levées. Dans cette logique, l'approche globale devra être appliquée à d'autres cas d'étude suffisamment complexes pour en vérifier la robustesse et l'applicabilité.

L'approche globale de conception a été décrite et formalisée, cependant un travail plus détaillé sera nécessaire dans le but de diffuser la méthode auprès de concepteurs volontaires. Cela permettra de recueillir leurs retours, remarques, impressions, ressentis.

Comme exprimé plus tôt, une limitation importante identifiée de cette méthode est liée à la nature des systèmes complexes. Ceux-ci sont nécessairement composés d'un grand nombre de composants, souvent interconnectés et leur conception ou leur étude génère donc une complexité si l'on souhaite les réaliser à un niveau de détail important. L'automatisation du processus de global de conception architecturale, au moins partiel, atténuerait cette limitation et permettrait de toute façon d'améliorer le confort d'utilisation du concepteur. De plus, cette méthode est itérative puisqu'elle permet de cibler des éléments critiques pour la performance industrielle dans le but de repenser l'architecture et de l'optimiser. L'automatisation de la méthode permettra de faciliter ce processus itératif et d'améliorer son potentiel d'innovation architecturale.

Enfin, l'analyse et l'évaluation de la vue industrielle du produit ne prennent aujourd'hui en compte que la partie assemblage, sans évaluer la fabrication, le stockage, les achats, l'approvisionnement, et d'autres facettes de la performance industrielle. Intégrer ces aspects à l'analyse de la performance industrielle permettrait de l'affiner, d'apporter plus d'éléments permettant de discriminer des architectures mais aussi d'intégrer des critères de performance économique. Des méthodes existent déjà dans ce but telles que le Design to Cost, le Design for Value. Cet axe de recherche consisterait plus à l'intégration de méthodes existantes au processus de conception architectural développé ici qu'à la création de nouvelles méthodes de conception ou d'évaluation.

8. BIBLIOGRAPHIE

AFNOR. (kein Datum). *Norme X50-151.* France.

Aida, S. (1985). *The Science and Praxis of Complexity.* Tokyo: United Nations University.

Airbus. (2019). *Global Market Forecast 2019-2038.* Airbus.

Akao, Y. (1990). *Integrating Customer Requirements into Product Design.*

Alavizadeh, A. (2010). *Usage of Axiomatic Design Methodology in the U.S. Industries.* George Washington University: International Journal of Modern Engineering, Volume 10, Number 2, Spring/Summer 2010.

Altshuller, G. (1984). *Creativity as an Exact Science.* New York: Gordon and Breach Science Publishers.

Altshuller, G. (2002). *40 Principles: TRIZ Keys to Innovation.*

Anderson, P., Arrow, K., & Pines., D. (. (1988). *The Economy as an Evolving Complex System.* Santa Fe, New Mexico.: Santa Fe Institute.

Andreasen, M. M., Hansen, C. T., & Mortensen, N. H. (1996). The Structuring of Products and Product Programmes. *Proceedings of the 2nd WDK Workshop on Product Structuring*, (S. 15-40).

Andreasen, M. M., Kähler, S., & Lund, T. (1988). *Design for Assembly* (2nd Ausg.). IFS.

Andreasen., M. M. (1987). *Integrated Product Development.* New York: NY: Springer.

Andreasen., M. M. (1994). Modelling - The Language of the Designer. *Journal of Engineering Design, 5(2)*, 103-115.

Ashby, M. F., Bréchet, Y. J., Cébon, D., & Salvo, L. (2004). Selection strategies for material and processes. *Materials and Design, 25(1)*, 51-67. Von https://doi.org/10.1016/S0261-3069(03)00159-6 abgerufen

Ashby, M. F., Bréchet, Y. J., Cébon, D., & Salvo, L. (2004). Selection strategies for materials and processes. *Materials and Design, 25*(1), 51-67. doi:https://doi.org/10.1016/S0261-3069(03)00159-6

Badhrinath, K., & Rao., J. R. (1996). Modeling for Concurrent Design Using Game Theory Formulations. *Concurrent Engineering*(4), 389-399.

Badii, R., & Politi, A. (1993). *Complexity, Hierarchical Structures and Scaling in Physics.* Cambridge: Cambridge University Press.

Barker, R., & Longman, C. (1992). *Case Method: Function and Process Modelling.* Addison-Wesley Professional.

Bennett., C. (1990). How to Define Complexity in Physics, and Why. In *Complexity, Entropy and the Physics of Information.* (S. 137-148). Redwood City California: Addison-Wesley.

Berry., B. (1994). Comprehending Complexity. *Urban Geography*(15), 695-697.

Blanchard, B., & Fabrycky., W. (1998). *Systems Engineering and Analysis. Prentice Hall International Series in Industrial and Systems Engineering.* Prentice Hall, 3rd edition.

Boothroyd, G. (July 1994). Product design for manufacture and assembly. *Computer-Aided Design, 26*(7), 505-520.

Boothroyd, G., & Alting, L. (1992). Design for Assembly and Disassembly. *CIRP Annals, 41*(2), 625-636. doi:https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63249-1

Boothroyd, G., & Dewhurst, P. (1984). *Design for Assembly.* Penton/IPC.

Boothroyd, G., Dewhurst, P., & Knight, W. (2002). *Product Design for Manufacture and Assembly.* New York: Marcel Dekker.

Börger., E. (1989). *Computability, Complexity, Logic.* Amsterdam.

Borutzky, W. (2010). *Bond Graph Methodology: Development and Analysis of Multidisciplinary Dynamic.* London: Springer-Verlag London.

Bremermann, H. (1974). Complexity of Automata, Brains and Behaviour. *BioMathematics*(4), 304-331.

Browning. (2001). Applying the Design Structure Matrix to System Decompositions and Integration Problems: A Review and New Directions. *IEEE Transactions on Engineering Management,* 48(3):292-306.

Bunge., M. (1963). *The Myth of Simplicity.* Englewood Cliffs: Prentice-Hall.

Caligiana, G., Liverani, A., Francia, D., Frizziero, L., & Donnici, G. (2017). Integrating QFD and TRIZ for innovative design. *Journal of Advanced Mechanical Design Systems and Manufacturing*.

Casti, J., & Karquist, A. (1985). *Complexity, Language and Life: Mathematical Models.* Berlin: Springer-Verlag.

Casti., J. (1979). *Connectivity, Complexity and Catastrophe.* New York: John Wiley.

Cavallo, R., & Klir., G. (1981). Reconstructability Analysis: Overview and Bibliography. *International Journal of General Systems.*(7), 1-6.

Chami, M., & Bruel, J.-M. (2018). A Survey on MBSE Adoption Challenges. *The Systems Engineering Conference of the Europe, Middle-East and Africa (EMEA) Sector of INCOSE (EMEASEC 2018).* Berlin, Germany.

Chami, M., & Bruel, J.-M. (2018). *A Survey on MBSE Adoption Challenges.* Berlin, Germany: INCOSE.

Chang, K., Silva, J., & Bryant, I. (1999). Concurrent Design and Manufacturing for Mechanical Systems. *Concurrent Engineering., 7(4)*, 290-308.

Chang, K., Silva, J., & Bryant., I. (1999). Concurrent Design and Manufacturing for Mechanical Systems. *Concurrent Engineering, 7*, 290-308.

Chapman., G. (1984). The Epistemology of Complexity and some Reflections on the Symposium. In *AIDA, et al (Ed). The Science and Praxis of Complexity.* (S. 357-374). Tokyo: United Nations University.

Clarke, S., & Tobias., A. (1995). Complexity in Corporate Modelling: A Review. *Business History*(37), 17-44.

Clarkson, J., & Eckert., C. (2005). *Design Process Improvement: A review of current practice.* Springer.

Claudio Favi, G. F.-E. (2019). Design for Assembly in the Conceptual Development of Aircraft Systems. *ADM 2019: Design Tools and Methods in Industrial Engineering* (S. 268-278). Springer. Von https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-31154-4_23 abgerufen

Collignan, A. (2011, Novembre 30). Methode d'optimisation et d'aide à la décision en conception mécanique: Application à une structure aéronautique. Bordeaux.

Cornacchio., J. (1977). System Complexity - A Bibliography. *International Journal of General Systems*(3), 267-271.

Cross, N. (2008). *Engineering Design Methods: Strategies for Product Design.* West Sussex: John Wiley.

Defense Acquisition University. (2001). *Systems Engineering Fundamentals.* Fort Belvoir, Virginia: Defense Acquisition University Press.

Do, Q., & Cook, S. (2012). *An MBSE Case Study and Research Challenges.* INCOSE.

E. Parrott, K. T. (17. February 2016). NASA GRC MBSE Implementation Status.

Edwards, K. L. (2003). Designing of engineering components for optimal materials and manufacturing process utilisation. *Materials and Design, 24*(5), 355-366. doi:https://doi.org/10.1016/S0261-3069(03)00041-4

Elmaraghy, W., Elmaraghy, H., Tomiyama, T., & Monostori., L. (kein Datum). Complexity in engineering design and manufacturing. *CIRP Annals - Manufacturing Technology, 61*, 793-814.

Favi, C., & Michele, G. (2012). A method to optimize assemblability of industrial product in early design phase: from product architecture to assembly sequence. *Int J Interact Des Manuf*, 6:155-169.

Favi, C., Formentini, G., Bouissière, F., Cuiller, C., Dereux, P.-E., & Corentin, M. (2019). Design for Assembly in the Conceptual Development of Aircraft Systems. *Design Tools and Methods in Industrial Engineering. ADM 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham.*, (S. 268-278).

Finger, S., Konda, S., & Subrahmanian., E. (1995). Concurrent design happens at the interfaces. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing (AI EDAM), 9(02)*, 89-99. doi:doi:10.1017/S0890060400002146

Formentini, G., Favi, C., Malchair, C., Bouissière, F., Cuiller, C., & Dereux., P.-E. (2019). Conceptual Design for Assembly in Aerospace Industry: A method to Assess Manufacturing and Assembly aspects of Product Architectures. *Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design, 1(1), 2961-2970. doi:10.1017/dsi.2019.303*, (S. 2961-2970).

Foster, M., & Martin, M. (1966). *Probability, Confirmation and Simplicity.* New York: Odyssey Press.

Fox, M. S., Finger, S., Gardner, E., Chandra, D. N., Safier, S. A., & Shaw, M. (1992). Design Fusion: An Architecture for Concurrent Design. In *Knowledge Aided Design.* Pittsburgh: Academic Press Ltd.

François Bouissière, C. C.-E. (2019). Conceptual Design for Assembly in Aerospace Industry: A Method to Assess Manufacturing and Assembly Aspects of Product Architectures. *Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design*, *Volume 1, Issue 1*, S. 2961-2970. doi:https://doi.org/10.1017/dsi.2019.303

Friedenthal, S. (2009). SysML: Lessons from Early Applications and Future Directions. *INCOSE INSIGHT, 12(4)*, 10-12.

Fry, R. S. (January-February 2004). A Century of Ramjet Propulsion Technology Evolution. *Journal of Propulsion and Power, 20*(1). doi:10.2514/1.9178

Garvin, D. A. (November-December 1987). Competing on the Eight Dimensions of Quality. *Harvard Business Review, 65*(6). Von https://hbr.org/1987/11/competing-on-the-eight-dimensions-of-quality abgerufen

Gero, J. S. (1990). Design Prototypes: A Knowledge Representation Schema for Design. *AI Magazine*, 11.

Gero, J. S., & Kannengiesser, U. (2004). The situated function-behaviour-structure framework. *Design Studies, 25(4),* 373-391.

Gero, J. S., & Mc Neill, T. (1998). An Approach to the Analysis of Design Protocols. *Design Studies., 19(1),* 21-61.

Giudice, F., Ballisteri, F., & Risitano, G. (Septembre 2009). A Concurrent Design Methods Based on DFMA--FEA Integrated Approach. *Concurrent Engineering, 17*(3), 183-202. Von 183–202. doi:10.1177/1063293X09343337 abgerufen

Godot, X. (2013). *Interactions projet/données lors de la conception de produits multitechnologiques en contexte collaboratif.* Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers.

Gottinger, H., & Leinfellner., W. (1978). *Decision Theory and Social Ethics: Issues in Social Choice.* Dordrecht: Reidel.

Grant, K. A. (2007). Tacit Knowledge Revisited – We Can Still Learn from Polanyi. *The Electronic Journal of Knowledge, 5*(2), 173-180.

Henk Jan Wassenaar, W. C. (2003). An approach to decision-based design with discrete choice analysis for demand modeling. *Journal of Mechanical Design, Transactions Of the ASME, 125(3),* 490-497. doi:https://doi.org/10.1115/1.1587156

Hesse., M. (1967). Simplicity. In *EDWARDS, P (Ed). Encyclopedia of Philosophy.* (S. 445-449). New York: Macmillan.

Hoerner, S. F. (1965). *Fluid-Dynamics Drag.* Paris: Gauthier-Villars Editeur.

Horváth, I. (2004). A treatise on order in engineering design research. *Research in Engineering Design, 15,* 155-181.

Hsiao, S. (2002). Concurrent design method for developing a new product. *International Journal of Industrial Ergonomics, 29,* 41-55. Von https://doi.org/10.1016/S0169-8141(01)00048-8 abgerufen

Huang, G. (1996). *Design for X: Concurrent Engineering Imperatives.* Berlin: Springer.

Huang, G. (1996). *Design for X: Concurrent Engineering Imperatives.* Berlin: Springer.

INCOSE. (2007). *INCOSE Systems Engineering Vision 2020.*

INCOSE. (2007). *Systems Engineering Vision 2020, INCOSE.*

INSA, R. (kein Datum). *Boucle fermée / Boucle ouverte.* Abgerufen am 23. 04 2020 von http://asi.insa-rouen.fr/enseignement/siteUV/auto/didacticiel/notions/boucle.htm

J. Hallqvist, J. L. (2016). Introducing MBSE By using Systems Engineering Principles. *INCOSE International Symposium, 26,* S. 512-525. doi:10.1002/j.2334-5837.2016.00175.x

John Gero, U. K. (2004). The situated function–behaviour–structure framework. *Design Studies, 25*(4), 373-391.

K. D. Robinson, D. T. (2010). Demonstrating. *Systems Engineering Test and Evaluation (SETE'10)*.

Kim, S. (2004). Axiomatic Design of Multi-Scale Systems. *The Third International Conference on Axiomatic Design,* (S. 1-5).

Kim, Y. -S., & Cochran, D. S. (2000). Reviewing TRIZ from the perspective of Axiomatic Design. *Journal of Engineering Design*.

Koller, R. (1998). *Konstruktionslehre für den Maschinenbau.* (4th Ausg.). Springer-Verlag.

Kuo, T.-C., Huang, S. H., & Zhang, H.-C. (2001). Design for manufacture and design for X: concepts, applications, and perspectives. *Computer & Industrial Engineering, 41*(3), 241-260.

Leifer, L., & Steinert., M. (2011). Dancing with ambiguity: Causality behavior, design thinking, and triple-loop-learning. *Information, Knowledge, Systems Management, 10(1)*(151-173), 151-173.

Li, M., & Vitanyi., P. (1993). *An Introduction to Kolmogorov Complexity and Its Applications.* New York: Springer-Verlag.

Liu, R., & Yang, X. (2001). Design for Manufacturing. In G. Salvendy, *Handbook of Industrial Engineering Technology and Operations Management* (S. 1311-1331). Institude of Industrial Engineers.

Liu, R., & Yang., X. (2001). Design for Manufacturing. In *Handbook of Industrial Engineering Technology* (S. 1311-1331).

Löfgren., L. (1987). Complexity of Systems. In *SINGH, M (Ed). Systems and Control Encyclopedia.* (S. 704-709). Oxford: Pergamon.

Lovatt, a. M., & Shercliff, H. R. (1998). Manufacturing process selection in engineering design. Part 2: a methodology for creating task-based process selection procedures. *Materials and design, 19*(5-6), 217-230. doi:https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0261-3069(98)00039-9

Maddox, J. (1990). Complicated Measures of Complexity. *Nature*(344), 705.

Magrab, E. B., Gupta, S., Mccluskey, F. P., Sandborn, P. A., & Group, F. (2010). *Integrated Product and Process Design and Development (2nd ed.).* Taylor & Francis Group.

Malmiry, R. B. (2016). Managing Complexity and Uncertainty by a Modelling Approach for Decision Making in Integrated Product/Process Design. Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers - ENSAM.

Malmiry, R. B., & Perry, N. (2013). Complexity Management in Product/Process Simultaneous Design for Implementing a Fresnel Thermodynamic Solar Plant. In M. Abramovici, & R. Stark, *Smart Product Engineering* (S. 411-420). Berlin, heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-642-30817-8

Matsuoka, Y. (2008). *Design Science: 'Six Viewpoints' for the Creation of Future.* Tokyo: Maruzen.

Matsuoka., Y. (2010). Multispace Design Model as a Framework for Design Science toward Integration of Design. *International Conference on Design Engineering and Science,* (S. 998-1002).

Mavris, D. N., Baker, A. P., & Schrage, D. P. (1997). *IPPD through Robust Design Simulation for an Affordable Short Haul Civil Tiltrotor.* Aerospace Systems Design Lab Publications (ASDL).

McDowell, D. L., Panchal, J. H., Choi, H., Seepersad, C. C., Allen, J. K., & Mistree, F. (2010). Overview of the Framework for Integrated Design of Materials, Products and Design Processes. In D. L. McDowell, J. H. Panchal, H. Choi, C. C. Seepersad, J. K. Allen, F. Mistree, & Butterworth-Heinemann (Hrsg.), *Integrated Design of Multiscale, Multifonctional Materials and Products* (S. 39-64). Butterworth-Heinemann.

McDowell, D., & Olson, G. B. (2009). Concurrent design of hierarchical materials and structures. *Lecture Notes in Computation Science and Engineering, 68*, 207-240. Von https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9741-6_14 abgerufen

Milton, N. R. (2007). *Knowledge Acquisition in Practice: A Step-by-step Guide.*

Nomura, Y., Ujiie, Y., & Matsuoka, Y. (2007). A design method that integrates the early and late process of design. *16th Internation Conference on Engineering Design, ICED'07.* Paris, France.

Novak, J. D. (2010). *Learning, creating, and using knowledge: Concept maps as facilitative tools in schools and corporations.*

Nowak, P., Rose, B., Saint-Marc, L., Callot, M., Eynard, B., Gzara-Yesilbas, L., & Lombard, M. (2004). Towards a design process model enabling the integration of product, process and organization. *5th International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering - IDMME'2004.* Bath, UK.

Odell, D. L., & Wright, P. K. (2002). Concurrent Product Design: a Case Study on the Pico Radio Test Bed. *7th Design for Manufacturing Conference. 3.* Montreal, Quebec, Canada: ASME 2002 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in.

O'Driscoll, M. (2002). Design for manufacture. *Journal of Materials Processing Technology, 122*, 318-321. doi:https://doi.org/10.1049/me:19930026

Oppelt, W. (1972). *Kleines Handbuch technischer Regelvorgänge (5th ed.). Weinheim: Verlag Chemie.*

Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., & Grote, K.-H. (2007). *Engineering Design - A systematic approach.* London: Springer.

Pailhes, J., Sallaou, M., & Nadeau, J.-P. (2007). Knowledge Base Formulation for Aided Design Tool. *Advances in Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering II*, 231-243.

Parsaei, H. R., & Sullivan, W. G. (1993). *Concurrent Engineering.* Springer-Science+Business Media. doi:https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004

Pattee., H. (1973). *Hierarchy Theory, the Challenge of Complex Systems.* New York: Braziller.

Paynter, H. M. (1961). *Analysis and design of engineering systems.* Cambridge: M.I.T. Press.

Perlis, A., Sayward, F., & Shaw., M. (1981). *Software Metrics.* Cambridge: MIT Press.

Pimmler, T., & Eppinger, S. (1994). Integration analysis of product decompositions. *Proceedings of the ASME Design Theory and Methodology Conference*, (S. 343-351). Minneapolis.

Pippenger., N. (1978). Complexity Theory. *Scientific American*(239), 90-100.

Polanyi, M. (2009). *The Tacit Dimension.*

Prasad, B. (1996). *Concurrent Engineering Fundamentals: Integrated Product Development.* (Bd. 2). New Jersey: Prentice Hall PTR.

R. Cloutier, M. B. (2015). MBSE Survey. *January 2015 INCOSE IW.* Los Angeles, CA.

R. Liu, X. Y. (2001). Design for Manufacturing. *Handbook of Industrial Engineering Technology.*, S. 1311-1331.

Redford, A. (1994). Design for Assembly. *Engineering Designer, 20(5).*

Robert R Hoffman, G. L. (2006). Eliciting and representing the knowledge of experts. In *Cambridge handbook of expertise and expert performance* (S. 203-222).

Rodenacker, W. G. (1991). *Methodisches Konstruieren.* Sprnger.

Roth, K. (2000). *Conception avec Catalogues de Conception (Konstruieren mit Konstruktionskatalogen).* Springer.

S Finger, J. D. (1989a). A Review of Research in Mechanical Engineering Design. Part I: Descriptive, Prescriptive, and Computer-based Models of Processes. *Research in Engineering Design, 1(1)*, 51-67.

S Finger, J. D. (1989b). A Review of Research in Mechanical Engineering Design. Part II: Representations, Analysis, and Design for the Life Cycle. *Research in Engineering Design, 1(2)*, 121-137.

Sahal., D. (1976). Elements of an Emerging theory of Complexity Per Se. *Cybernetica*(19), 5-38.

Sakae, Y., Kato, T., Sato, K., & Matsuoka, Y. (2016). Classification of Design Methods from the Viewpoint of Design Science. *Internation Design Conference - Design 2016* (S. 493-502). Dubrovnik - Croatia: Design 2016.

Sambrook, T., & Whiten., A. (1977). On the Nature of Complexity in Cognitive and Behavioural Science. *Theory and Psychology*(7), 191-213.

Sanford Friedenthal, A. M. (2008). *Practical Guide to SysML: Systems Modeling.* San Francisco, CA: Morgan Kaufmann Publishers, Inc.

Selvaraj, P., Radhakrishnan, P., & Adithan., M. (2009). An integrated approach to design for manufacturing and assembly based on reduction of product development time and cost. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology.*, 13-29.

Serra., R. (1988). Some Remarks on Different Measures of Complexity for the Design of Self-organising Systems. In *TRAPPL, R (Ed). Cybernetics and Systems '88* (S. 141-148). Dordrecht: Kluwer Academic.

Simon., H. (1981). The Architecture of Complexity. In *The Sciences of the Artificial.* (S. 192-229). Cambridge, Massachussetts: MIT Press.

Stein., D. (1989). *Lectures in the Sciences of Complexity.* Redwood City, California.: Addison-Wesley.

Stone, K., & Wood, R. (2000). Development of a functional basis for design. *Journal of Mechanical Design, Vol. 122, No. 4*, 359-370.

Stone, R., Wood, K., & Crawford., R. (2000). A heuristic method for identifying modules for product architectures. *Design Studies*, 5-31.

Suh, N. P. (1990). *The Principles of Design.* Oxford: OXFORD University Press.

Suh, N. P. (2001). *Axiomatic Design: Advances and Applications.* Oxford: Oxford University Press.

Suh, N. P. (2001). *Axiomatic Design: Advances and Applications.* Oxford, NY: Oxford University Press.

Suh, N. P. (2005). Complexity in Engineering. *CIRP Annals, 54*(2), 46-63.

Swift, K. G., & Booker, J. D. (2003). *Process Selection: From Design to Manufacture (second).* Butterworth-Heinemann.

Takahashi, M. (2002). *The Bible of Creativity.* Tokyo: Nikka-giren.

Takashi Asanuma, J. K. (2007). A Proposal of Classification and Guideline of Selection for Design Modeling Methods. *ASME 2007 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, *2*, S. 551-558.

Tichem, M. (1997). *A Design Coordination Approach to Design for X.* Delft: Delft University Press.

Tolio, T., Ceglarek, D., Elmaraghy, H., Fischer, A., Hu, S. J., Laperrière, L., & Váncza., J. (2010). SPECIES: Co-evolution of products, processes and production systems. *CIRP Annals - Manufacturing Technology, 59(2),* 672-693. doi:https://doi.org/10.1016/j.cirp.2010.05.008

Tomiyama, T. (2009). Design Methodologies: Industrial and educational applications. *CIRP Annals – Manufacturing Technology.*

Tomiyama, T., Gu, P., Jin, Y., Lutters, D., Kind, C., & Kimura., F. (2009). Design methodologies: Industrial and educational applications. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*(58), 543-565.

Trappl., R. (1986). *Power, Autonomy, Utopia: New Approaches towards Complex Systems.* New York: Plenum Press.

Ulrich, K., & Eppinger., S. (2008). *Product design and development.* New York: McGraw-Hill Higher Education.

Van, T. N. (2006). *System engineering for collaborative data management systems: Application to design / simulation loops.* Paris: Ecole Centrale Paris.

Wackerbauer, R., Witt, A., Altmanspracher, H., & al., e. (1994). Comparative Classification of Complexity Measures based on distinguishing partitions in phase space as well as structural v. dynamic elements. *Chaos, Solitons and Fractals*(4), 133-173.

Wang, B. (1997). *Integrated Product , Process and Enterprise Design.* Springer-Science+Business Media.

Wang, F.-C., & Wright, P. K. (1996). A Multidisciplinary Concurrent Design Environment for Consumer Electronic Product Design. *Concurrent Engineering, 4(4),* 347-359.

Warmack JP, J. D. (1991). *The Machine that Changed the World: The Story of Lean Production.* New York: harper Perennial.

Weber, C. (2005a). CPM/PDD - An Extended Theoretical Approach to Modelling Products and Product Development Processes. Proceedings of the 2nd German - Israeli Symposium on Advances in Methods and Systems for Development of Products and Processes.

Weber, C. (2005b). Simulation Models of Machine Elements as Components of Mechatronic Systems. *AEDS 2005 Workshop.* Pilsen, Czech Republic.

Weber, C. (2005c). What is "Complexity"? *International Conference on Engineering Design ICED 05.* Melbourne.

Weber, C. (2007). Looking at “DFX” and “Product Maturity” from the Perspective of a New Approach to Modelling Product and Product Development Processes. *17th CIRP Design Conference: The Future of Product Development.* (S. pp. 85–104). Berilin: Springer Berlin Heidelberg.

Wolfram, S. (1986). *Theory and Applications of Cellular Automata.* Singapore: World Scientific.

Wood, W. H. (2004). Decision-Based Design: A Vehicle for Curriculum Integration. *International Journal of Engineering Education, 20(3)*, 433-439.

Wood., R. (1986). Task Complexity: definition of the construct. *Organisational Behaviour and Human Decision Processes*(36), 60-82.

Woodward., D. (1992). *Understanding Complexity: A Critique and Synthesis.* Henley-on-thames: Henley Management College.

Wu, Y., Zhou, F., & Kong, J. (2019). Innovative design approach for product design based on TRIZ, AD, fuzzy and Grey relational analysis.

Yoshikawa, H. (1985). Design Theory for CAD/CAM Integration. *Annals of CIRP, 34(1)*, 173-178.

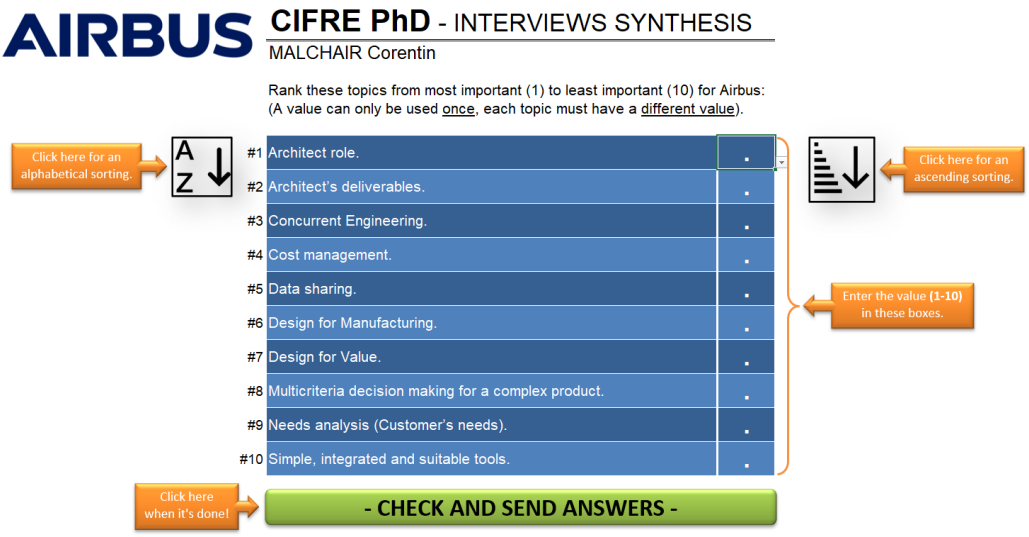
Yuji Nomura, Y. U. (2007). A Design Method that Integrates the Early and Late Process of Design. *INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING DESIGN, ICED’07* . Paris, France.

Zha, X. F., Du, H. J., & Qiu, J. H. (2001). Knowledge-based approach and system for assembly oriented design,. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*(14), 61-75.

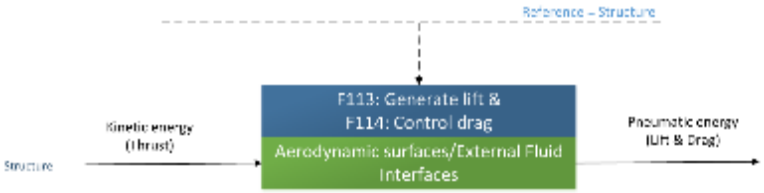
Zuse, H. (1991). *Software Complexity.* Berlin: Walter de Gruyter.

9. ANNEXE

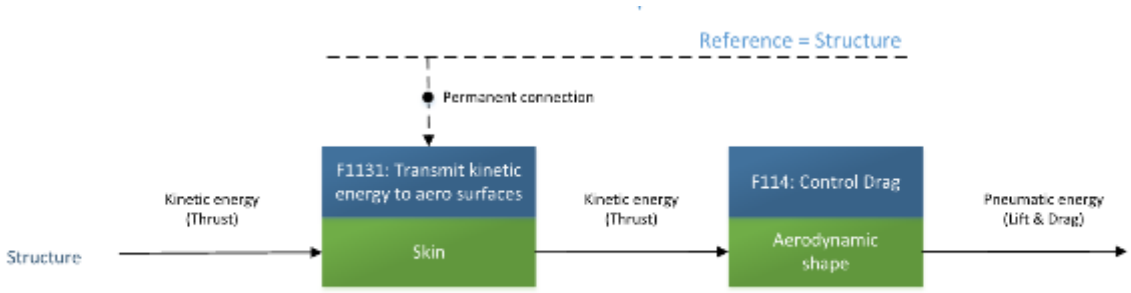
Annexe 1: Sondage vierge envoyé aux personnes interviewées. Les 10 thèmes retenus doivent être classés de 1 à 10 selon une échelle d'importance subjective.



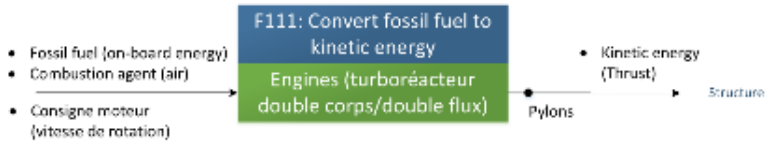
Annexe 2 – Modélisation CTOC de la pointe avant – Modélisation spécifique de l'entité « Interface Surfaces aérodynamiques / Fluide extérieure »



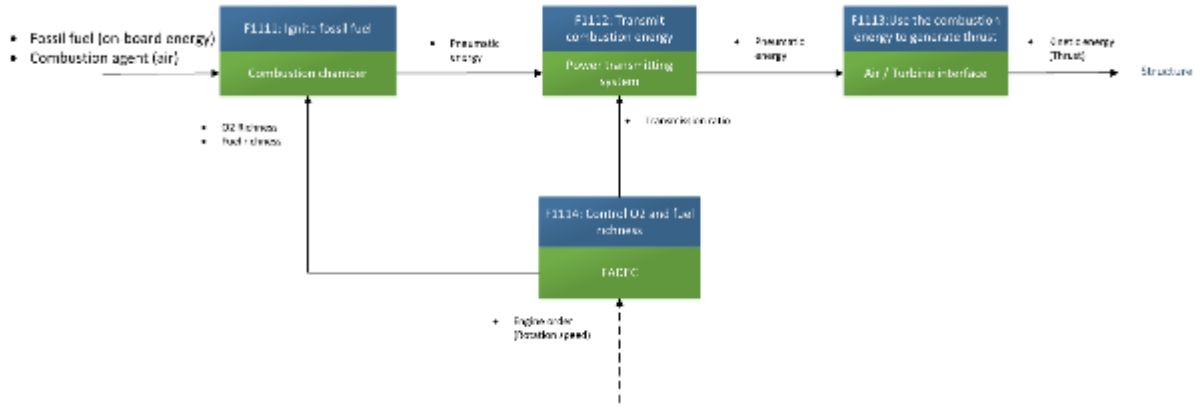
Annexe 3 – Modélisation CTOC de la pointe avant – Niveau d'abstraction -1 de l'entité « Interface Surfaces aérodynamiques / Fluide extérieure ».



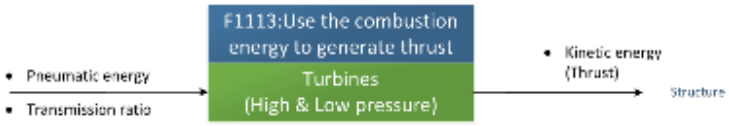
Annexe 4 – Modélisation CTOC de la pointe avant – Modélisation spécifique de l'entité « Moteurs (Turboréacteur double corps/double flux ».



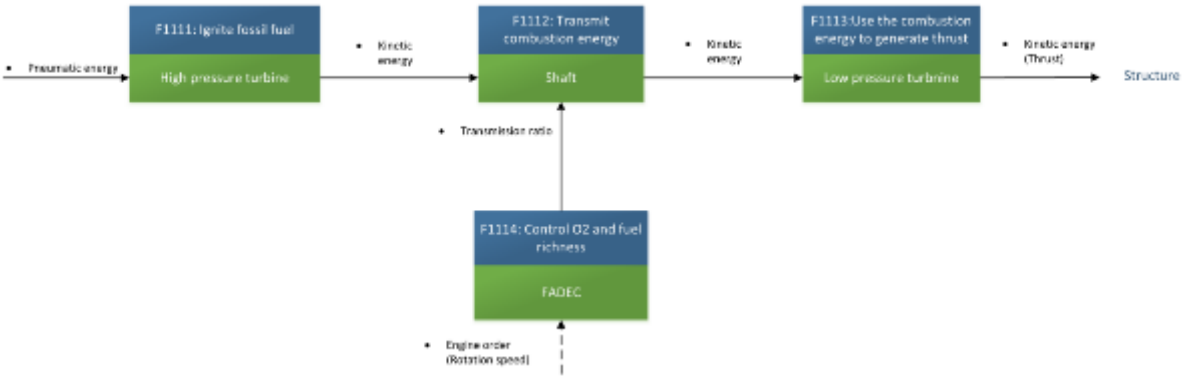
Annexe 5 – Modélisation CTOC de la pointe avant – Niveau d'abstraction -1 de l'entité « Moteurs (Turboréacteur double corps/double flux », boucle de contrôle du régime moteur.



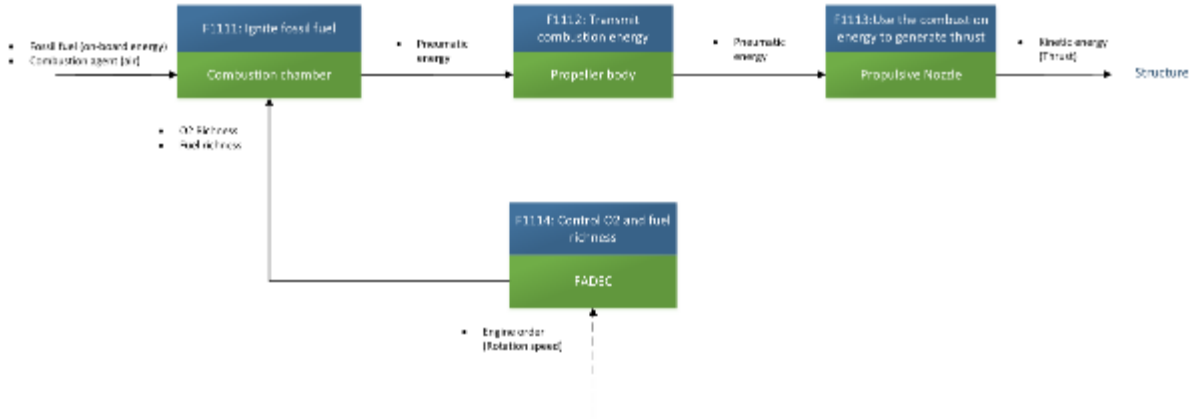
Annexe 6 – Modélisation CTOC de la pointe avant – Etude de l'entité « Turbines (Haute & Basse pression ».



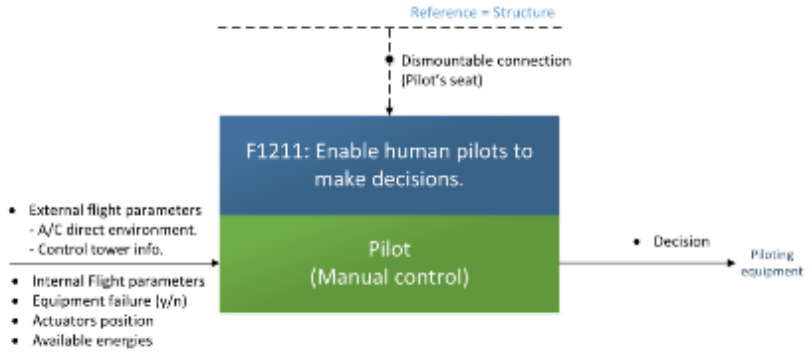
Annexe 7 – Modélisation CTOC de la pointe avant – Niveau d'abstraction -1 de l'entité « Moteurs (Turboréacteur double corps/double flux », Génération de poussée, turbine haute pression.



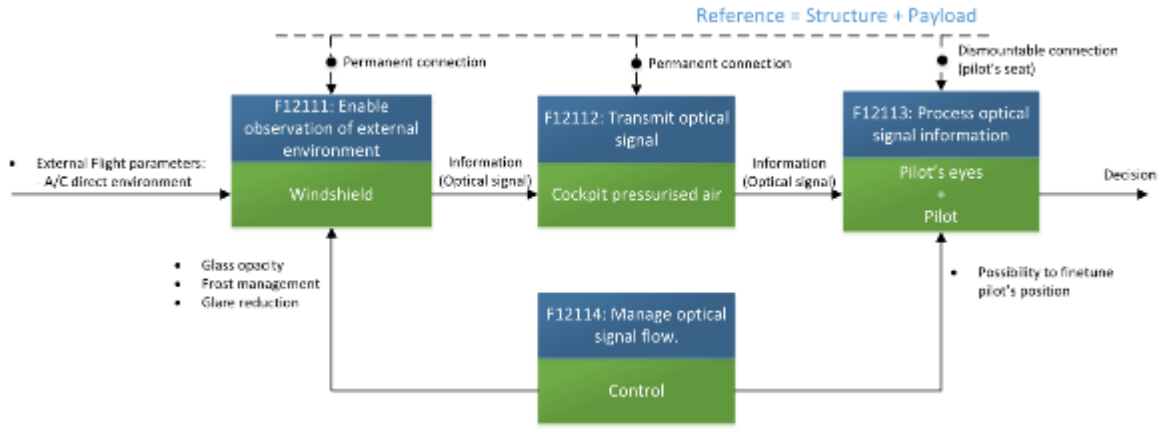
Annexe 8 – Modélisation CTOC de la pointe avant – Niveau d'abstraction -1 de l'entité « Moteurs (Turboréacteur double corps/double flux », boucle de contrôle du régime moteur.



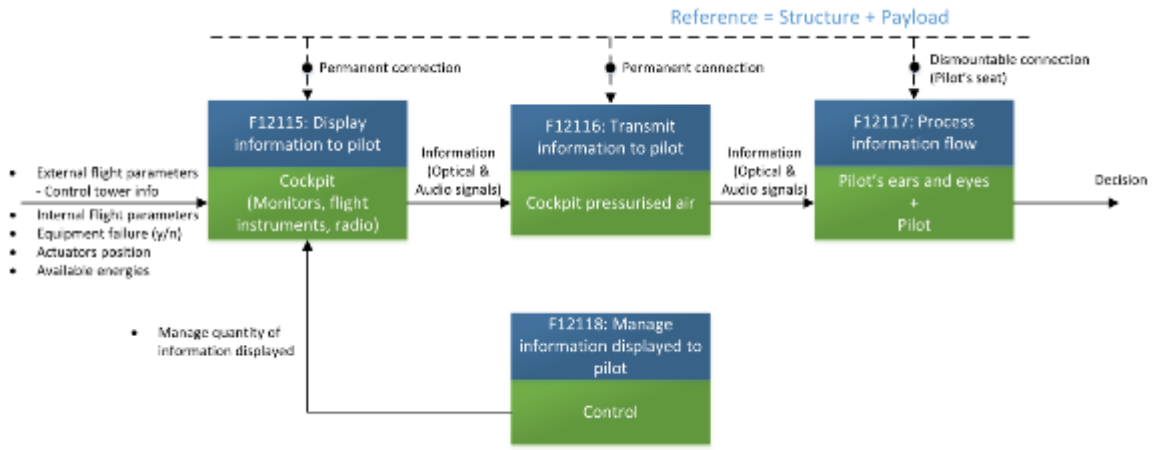
Annexe 9 – Modélisation CTOC de la pointe avant – Modélisation spécifique de l'entité « Pilotes (Boucle de contrôle manuel).



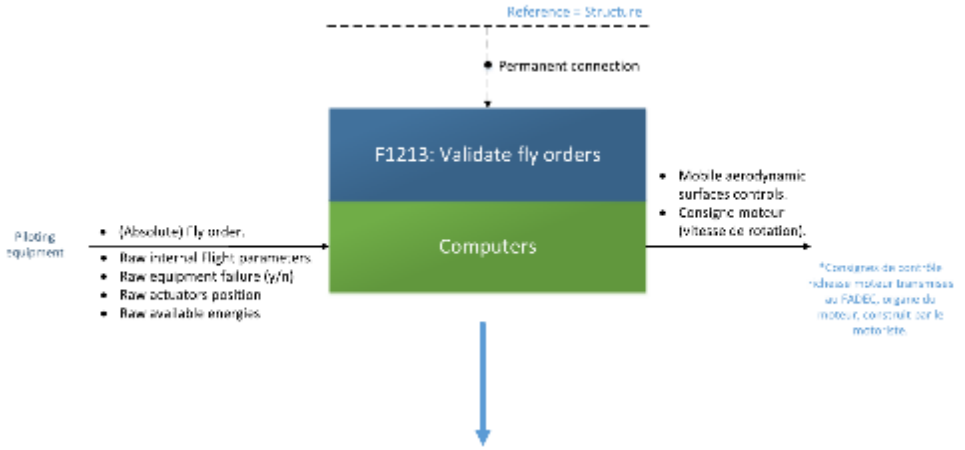
Annexe 10 – Modélisation CTOC de la pointe avant – Niveau d'abstraction -1 de l'entité « Pilotes (Boucle de contrôle manuel) », flux d'information optique direct.



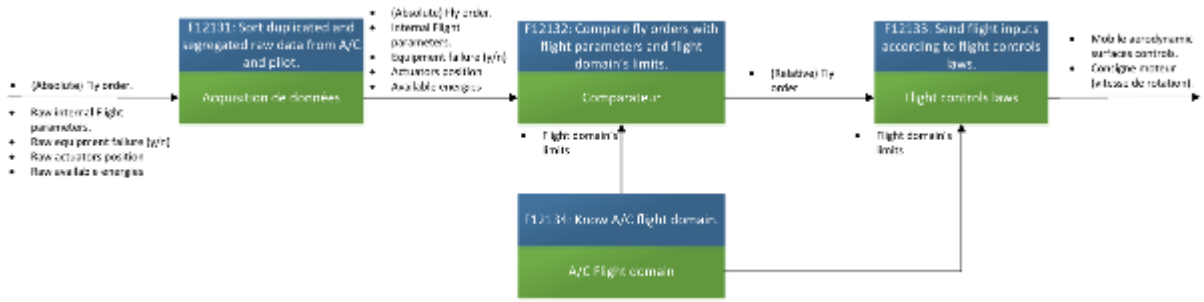
Annexe 11 – Modélisation CTOC de la pointe avant – Niveau d'abstraction -1 de l'entité « Pilotes (Boucle de contrôle manuel) », flux d'information indirects (délivrés par les équipements du cockpit).



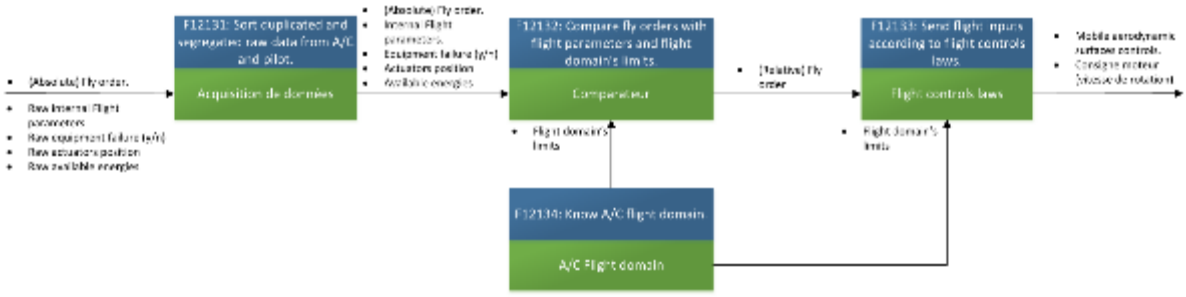
Annexe 12 – Modélisation CTOC de la pointe avant – Modélisation spécifique de l'entité « Ordinateurs ».



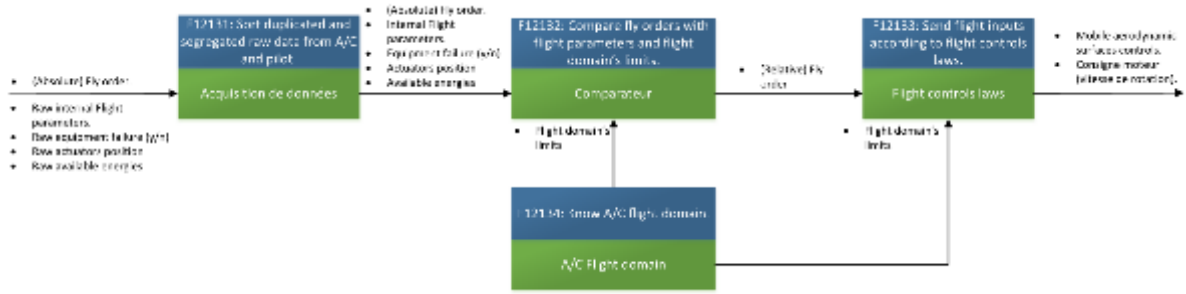
Annexe 13 – Modélisation CTOC de la pointe avant – Niveau d'abstraction -1 de l'entité « Ordinateurs ». Modélisation des lois de pilotage, cas 1 : Pilotage.



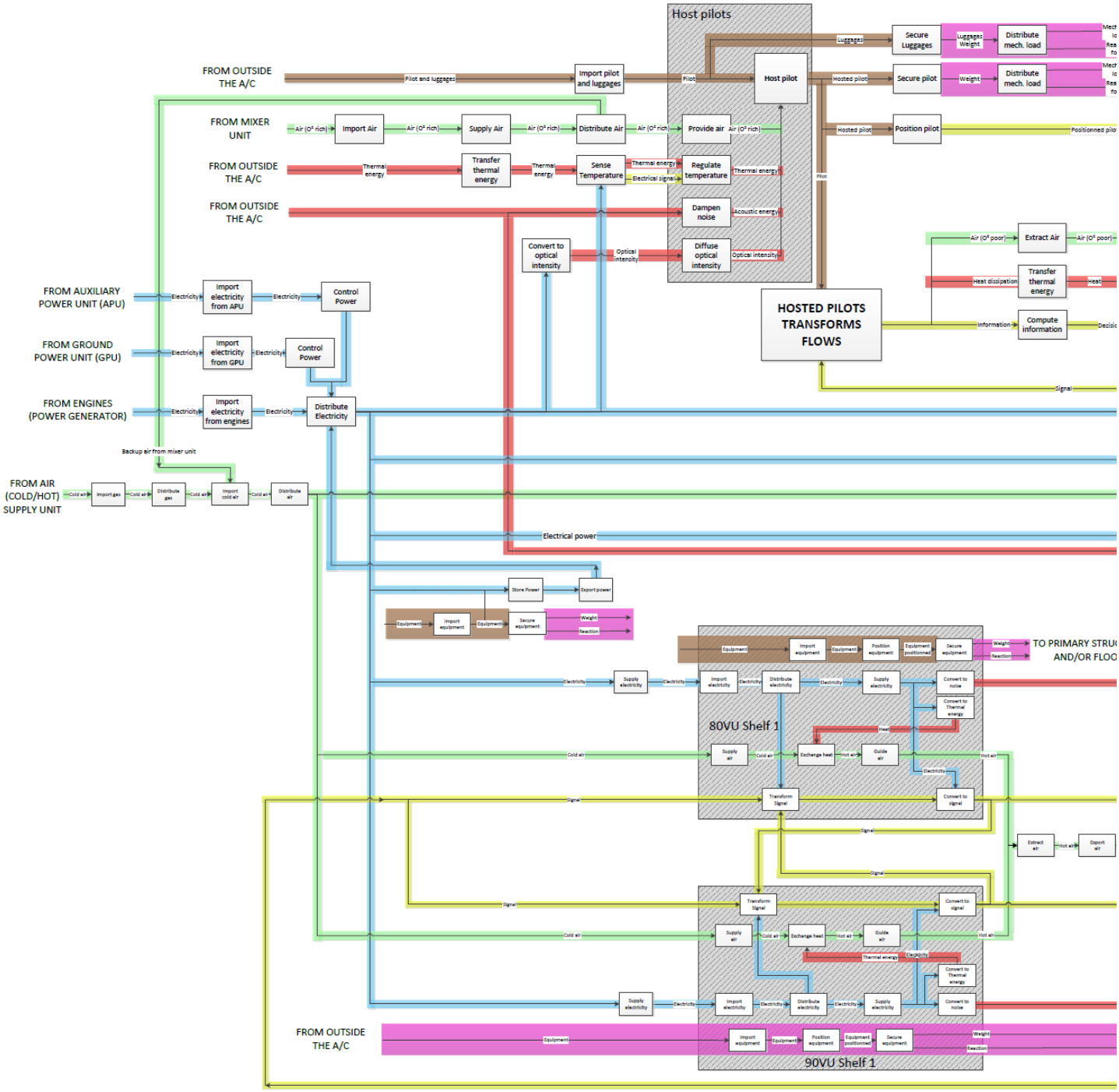
Annexe 14 – Modélisation CTOC de la pointe avant – Niveau d'abstraction -1 de l'entité « Ordinateurs ». Modélisation des lois de pilotage, cas 1 : Guidage.

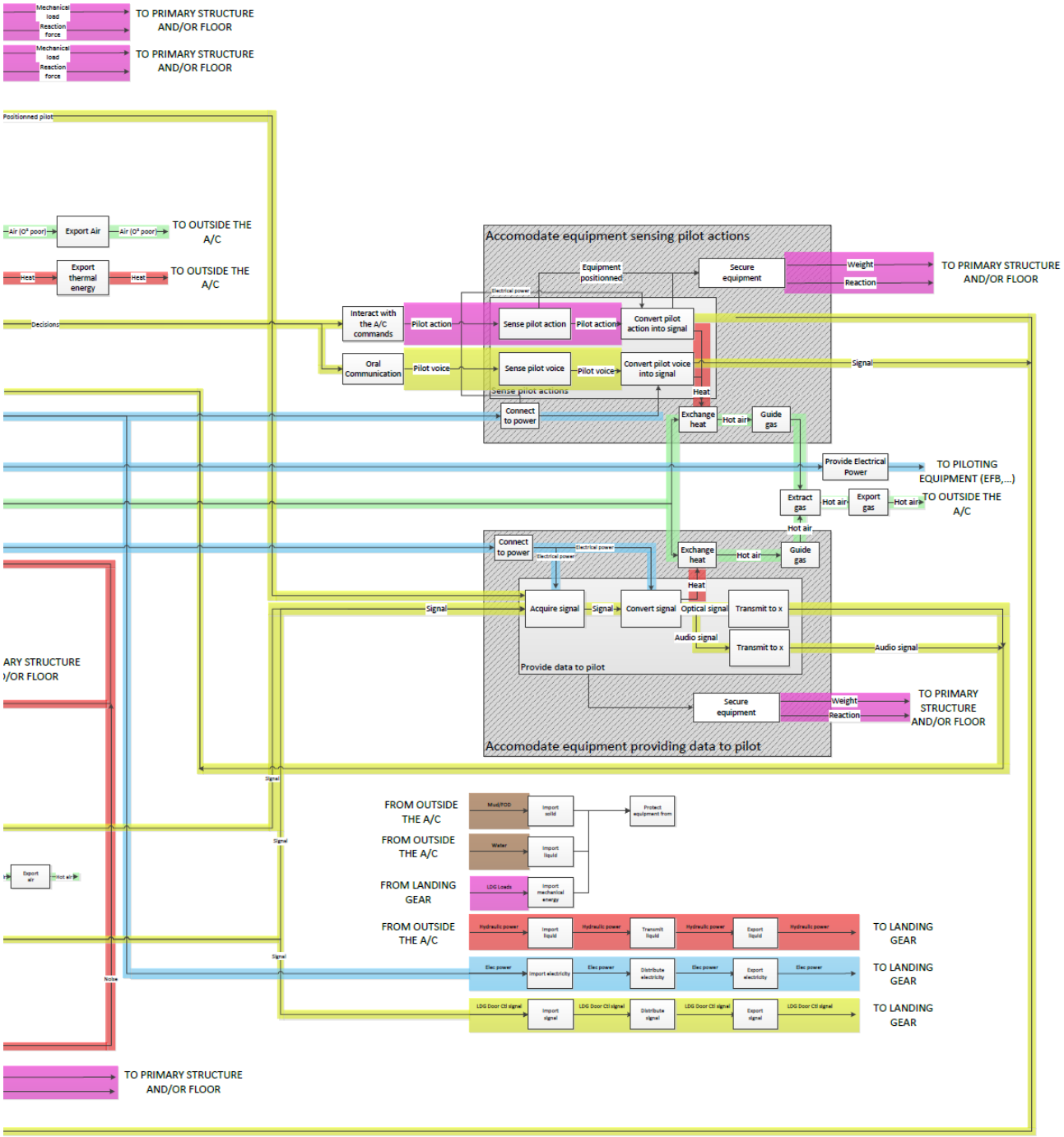


Annexe 15 – Modélisation CTOC de la pointe avant – Niveau d'abstraction -1 de l'entité « Ordinateurs ». Modélisation des lois de pilotage, cas 1 : Navigation.



Annexe 16 Vue d'ensemble de la modélisation énergétique basée sur l'analyse fonctionnelle de la pointe avant.




Mechanical load
Reaction force
TO PRIMARY STRUCTURE AND/OR FLOOR
Mechanical load
Reaction force
TO PRIMARY STRUCTURE AND/OR FLOOR
Positionned pilot
Air (O² poor)
Export Air
Air (O² poor)
TO OUTSIDE THE A/C
Heat
Export thermal energy
Heat
TO OUTSIDE THE A/C
Decisions
Accomodate equipment sensing pilot actions
Equipment positionned
Secure equipment
Weight
Reaction
TO PRIMARY STRUCTURE AND/OR FLOOR
Electrical power
Interact with the A/C commands
Pilot action
Sense pilot action
Pilot action
Convert pilot action into signal
Oral Communication
Pilot voice
Sense pilot voice
Pilot voice
Convert pilot voice into signal
Signal
Sense pilot actions
Heat
Connect to power
Exchange heat
Hot air
Guide gas
Provide Electrical Power
TO PILOTING EQUIPMENT (EFB,...)
Extract gas
Hot air
Export gas
Hot air
TO OUTSIDE THE A/C
Hot air
Connect to power
Electrical power
Electrical power
Exchange heat
Hot air
Guide gas
Heat
Signal
Acquire signal
Signal
Convert signal
Optical signal
Transmit to x
Audio signal
Transmit to x
Audio signal
Provide data to pilot
Secure equipment
Weight
Reaction
TO PRIMARY STRUCTURE AND/OR FLOOR
Accomodate equipment providing data to pilot
ARY STRUCTURE
)/OR FLOOR
Signal
Signal
Export air
Hot air
Noise
FROM OUTSIDE THE A/C
Mud/FOD
Import solid
Protect equipment from
FROM OUTSIDE THE A/C
Water
Import liquid
FROM LANDING GEAR
LDG Loads
Import mechanical energy
FROM OUTSIDE THE A/C
Hydraulic power
Import liquid
Hydraulic power
Transmit liquid
Hydraulic power
Export liquid
Hydraulic power
TO LANDING GEAR
Elec power
Import electricity
Elec power
Distribute electricity
Elec power
Export electricity
Elec power
TO LANDING GEAR
LDG Door CtI signal
Import signal
LDG Door CtI signal
Distribute signal
LDG Door CtI signal
Export signal
LDG Door CtI signal
TO LANDING GEAR
TO PRIMARY STRUCTURE AND/OR FLOOR

Corentin MALCHAIR

Conception Architecturale de Systèmes Complexes par une Approche Energétique : Application au Domaine Aéronautique.

Résumé

La conception architecturale des systèmes complexes présente de nombreuses difficultés et les méthodes de conception classiques ne peuvent apporter qu'une réponse limitée aux problématiques actuelles. De nombreuses méthodologies proposent des solutions en se concentrant sur une facette du processus de développement ou un critère de conception spécifique. La mondialisation et l'augmentation de la population imposent aux industriels des cadences de production élevées, tandis que les nouveaux modes de consommation leur demandent une forte agilité pour s'adapter rapidement aux besoins des clients. Ces contraintes mettent en évidence les limites du paradigme de conception actuel et exacerbent les problématiques issues du processus de développement du produit. La décorrélation entre les différentes vues du produit (fonctionnelle, physique et industrielle) favorise l'apparition d'incohérences et complexifie un processus déjà très contraint. Ces travaux de recherche proposent de lier les différentes vues du produit au cours de son développement afin de renforcer la robustesse de la conception, favoriser la conception collaborative et améliorer la traçabilité des choix de conception au cours du développement d'un produit. L'approche CTOC (Convertisseur, Transmetteur, Opérateur, Contrôle) formalisée ici fait écho à cette proposition en offrant un cadre de conception robuste permettant de construire simultanément les vues fonctionnelle et physique du produit. Des développements de la méthode CTOC sont présentés dans cette thèse afin de répondre aux problématiques identifiées dans le contexte de l'étude mais aussi pour offrir un environnement de conception favorisant l'innovation architecturale.

Les choix de conception réalisés durant la phase de conception architecturale impactent l'ensemble du développement et les conséquences de ces choix peuvent n'apparaitre que bien plus tard. Ainsi, la phase d'industrialisation du produit peut révéler une performance industrielle insatisfaisante dont l'origine remonte à des choix de conception réalisés au début du processus de développement. L'intégration de critères d'évaluation de la performance industrielle dès la phase de conception préliminaire permet aux concepteurs de discriminer très tôt des architectures candidates et d'évaluer leur performance industrielle. Les travaux présentés dans cette thèse apportent des développements à la méthode CDfA (Conceptual Design for Assembly) qui se concentre sur l'évaluation de la performance industrielle d'assemblage et propose une méthode pouvant être étendue à d'autres critères dans le futur.

L'identification d'une forte synergie entre les approches CTOC et CDfA a permis de les regrouper en une méthodologie de conception architecturale. L'utilisation du modèle CTOC comme base d'application de l'approche CDfA apporte de nombreux avantages et notamment une plus grande maîtrise d'un système malgré sa complexité. Le modèle CTOC global remplit les conditions nécessaires à l'application de la méthodologie d'évaluation de la performance industrielle décrite par l'approche CDfA. Ces travaux formalisent une méthodologie globale de conception architecturale liant les vues fonctionnelle, physique et industrielle du produit et applicable dès la phase de conception préliminaire.

Corentin MALCHAIR

Conception Architecturale de Systèmes Complexes par une Approche Energétique : Application au Domaine Aéronautique.

Abstract

The architectural design of complex systems presents many difficulties and conventional design methods can only provide a limited response to the current issues. Many methodologies offer solutions by focusing on one facet of the development process or a specific design criterion. Globalization and population growth require high production rates from manufacturers, while new consumption patterns require a high degree of agility to adapt quickly to customer needs. These constraints highlight the limits of the current design paradigm and highlight the issues arising from the product development process. The decorrelation between the different views of the product (functional, physical and industrial) encourages the appearance of inconsistencies and makes an already highly constrained process more complex. This research proposes to link the different views of the product during its development in order to reinforce the robustness of the design, to promote collaborative design and to improve the traceability of the design choices during the development of a product. The CTOC (Converter, Transmitter, Operator, Control) approach formalized here echoes this proposal by offering a robust design framework allowing to build simultaneously the functional and physical views of the product. Developments of the CTOC method are presented in this thesis in order to respond to the issues identified in the context of the study but also to provide a design environment conducive to architectural innovation.

The design choices made during the architectural design phase impact the whole development and the consequences of these choices may not appear until much later. Thus, the industrialization phase of the product may reveal unsatisfactory industrial performance, the origin of which can be traced back to design choices made at the beginning of the development process. The integration of industrial performance evaluation criteria as early as the preliminary design phase allows designers to discriminate candidate architectures very early on and to evaluate their industrial performance. The work presented in this thesis brings developments to the CDfA (Conceptual Design for Assembly) method which focuses on the evaluation of the industrial performance of assembly and proposes a method that can be extended to other criteria in the future.

The identification of a strong synergy between the CTOC and CDfA approaches has allowed to group them into a global architectural design methodology. The use of the CTOC model as a basis for the application of the CDfA approach brings many advantages and in particular a greater mastery of a system despite its complexity. The global CTOC model fulfils the necessary conditions for the application of the industrial performance assessment methodology described by the CDfA approach. This work formalizes a global architectural design methodology linking the functional, physical and industrial views of the product and applicable from the preliminary design phase.