



**HAL**  
open science

**Optimisation des interfaces entre processus de  
conception amont et système de production :  
Elaboration de la méthode DfMMFALApplication à  
l'industrie hélicoptériste**

Edouard Boyault

► **To cite this version:**

Edouard Boyault. Optimisation des interfaces entre processus de conception amont et système de production : Elaboration de la méthode DfMMFALApplication à l'industrie hélicoptériste. Génie des procédés. HESAM Université, 2023. Français. NNT : 2023HESAE040 . tel-04471395

**HAL Id: tel-04471395**

**<https://pastel.hal.science/tel-04471395>**

Submitted on 21 Feb 2024

**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.

**ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES DES MÉTIERS DE L'INGÉNIEUR**  
[Laboratoire de Conception de Produits et Innovation – Campus de Paris]

# THÈSE

présentée par : **Edouard BOYAULT**  
soutenue le : 30 juin 2023

pour obtenir le grade de : **Docteur d'HESAM Université**  
préparée à : **École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers**  
Spécialité : **Génie Industriel**

**Optimisation des interfaces entre processus de  
conception amont et systèmes de production :**

**Élaboration de la méthode DfMMFAL**  
Application à l'industrie hélicoptériste

THÈSE dirigée par :  
**Pr. AOUSSAT Améziane**

et co-encadrée par :  
**Dr. JEAN Camille**  
Responsable entreprise  
**Dr. BERNIER Vincent**

## Jury

**M. Xavier FISCHER,**  
**M. Frédéric NOEL,**  
**M. Samuel GOMES,**  
**Mme Élise GRUIER,**  
**M. Améziane AOUSSAT,**  
**M. Camille JEAN,**  
**M. Vincent BERNIER,**

Professeur des Universités, ESTIA Recherche, ESTIA  
Professeur des Universités, G-SCOP, INP Grenoble  
Professeur des Universités, ICB, UTBM  
Maître de Conférence, I2M, Arts et Métiers S&T  
Professeur des Universités, LCPI, Arts et Métiers S&T  
Maître de Conférences, LCPI, Arts et Métiers S&T  
Expert industriel MBSE, Airbus Helicopters

Rapporteur  
Rapporteur  
Président  
Examinatrice  
Examinateur  
Examinateur  
Examinateur



## Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mon mentor, Dr. Vincent BERNIER, Docteur Ingénieur chez Airbus Helicopters pour sa présence inestimable tout au long de cette aventure de presque quatre ans. Sa disponibilité sans faille a été un soutien précieux qui m'a permis d'avancer sereinement dans mes recherches. Chaque fois que j'avais besoin de réponses à mes questions, il était là, prêt à partager ses connaissances techniques, scientifiques et industrielles avec générosité et patience. Son expertise et ses conseils éclairés ont grandement contribué à la réussite de ma thèse et à mon épanouissement professionnel. Travailler à ses côtés a été une expérience enrichissante, qui m'a permis de grandir tant sur le plan académique que personnel.

Merci également à Bernard FUJARSKI pour m'avoir offert l'opportunité d'entrer dans l'univers d'Airbus Helicopters. Mes travaux n'auraient pas été aussi riches sans la passion pour les voilures tournantes qu'il m'a aidé à développer. *Je n'ai pas encore fini les livres que tu m'as laissés mais je suis déjà prêt pour l'interrogation !* Merci à Bertrand RIEUL qui fut le premier à me présenter le sujet qui devenait quelques mois plus tard ma thèse de doctorat alors que j'étais stagiaire en fin d'études d'ingénieur dans son équipe. Sans sa confiance je n'aurais jamais trouvé ce sujet passionnant.

Je tiens à remercier mon directeur de thèse, le professeur Améziane AOUSSAT, de m'avoir accueilli au sein du Laboratoire Conception de Produit & Innovation (LCPI) et pour son rôle crucial dans mon parcours académique qui a abouti à l'obtention de mon doctorat. Sa précieuse contribution a été essentielle pour m'aider à apporter la rigueur nécessaire à mes travaux de recherche. Merci à mon co-directeur, Dr. Camille JEAN qui, grâce à ses conseils avisés et à sa persévérance à vouloir le meilleur pour moi, m'a permis de progresser considérablement dans ma démarche scientifique.

J'aimerais remercier le professeur Xavier FISCHER, le professeur Frédéric NOEL, le professeur Samuel GOMES et le Dr. Maître de Conférences Éloïse GRUHIER pour avoir accepté de prendre le temps d'évaluer ces travaux de recherche.

Merci également à tous mes collègues doctorants, pour tous les moments précieux que l'on a partagé ensemble, votre écoute et votre énergie toujours positives ces trois années. Merci aux indissociables Armand pour m'avoir accueilli parmi les doctorants du labo, merci également à Chawki, Antoine, Clara, Elliott, Annelinne et bien sûr Arava, vous m'avez montré l'exemple. *Sylvia, bravo à toi pour avoir fini ta thèse avant nous ! Duc-Nam, contrairement à ce que tu as écrit dans tes remerciements, c'est moi le dernier de nous trois à finir !* Merci à toi, à notre binôme et à notre efficacité dans nos travaux communs ! Romain, merci pour son amitié infaillible quotidienne au laboratoire. Merci et bonne chance aux doctorants actuels du Laboratoire ; Tristan, Orphée, Jean-René, Quentin, Marine et Mathis dans vos travaux, je serai toujours disponible pour vous.

Je tiens à remercier chaleureusement mes collègues d'Airbus Helicopters, Philippe, David, Lucas, Patrice, Gilles, Thibaut, Laure, Benjamin ainsi que Serge, Guillaume, Mathieu et Camille pour leur soutien, leur disponibilité et leur implication durant mes travaux. Merci d'avoir, d'une manière ou d'une autre, subi ma trop grande curiosité. Merci également à Pierre-Henri, Ludovic et Stéphane pour leur aide précieuse lors de mes expérimentations.

Comment parler de mes journées à Airbus sans citer notre incroyable club avec Elodie, Lalo, Jérémy, Lucas, Camille, Lori, Sébastien, Valentine, Victor et Célian, sans oublier Hugo, Alex, Arthur, Lucien et Patricia. Merci pour tous les « 12h W11 » et les moments que nous avons pu partager ensemble au Mont Sampi ou aux Cardeurs qui ont fait de mon séjour Aixois, une expérience inoubliable. Merci à vous tous. Je tiens également à remercier Alex, mon « F1 Partner » grâce à qui je pouvais me défouler lors de ses interminables séances de HiiT, EMOM, TABATA et autres tortures qui m'ont permis de garder le cap et de rester motivé tous les jours. A toutes ces soirées F1 qui me permettaient de me

venger de la séance de sport précédente ! Merci aux encadrants de la salle de sport, Juline et François pour l'accueil qui ont fait de toutes ces séances un exutoire quotidien.

Je dois également cette réussite à la musique et particulièrement aux groupes Metallica, Iron Maiden ou Two Steps From Hell, qui à maintes reprises m'ont reconcentré et remotivé. Je le dois également à Lewis Hamilton qui démontre à chaque Grand Prix, la récompense de l'abnégation et la volonté de performer.

Ma dernière année de thèse fut également marquée par ma formation d'Officier de réserve dans la Marine Nationale, c'est l'occasion pour moi de remercier mes camarades de formation pour l'esprit de cohésion, pour les moments passés en section et surtout pour les moments plus durs. Cette formation m'a permis de mettre en pratique la rigueur et la discipline au sein mes travaux de thèse.

Enfin, le soutien le plus important et à qui je tiens à exprimer toute ma gratitude revient à ma famille et mes proches. Le soutien infaillible que j'ai reçu fut la meilleure bénédiction et encouragement dont je pouvais bénéficier pendant ces longues années, même à distance. J'aimerais leur faire savoir toute l'importance de vos mots, de vos encouragements et de tous les moments que j'ai pu passer avec vous. Ainsi, à mes parents qui m'ont toujours accueillis plus que confortablement lors de mes nombreux passages en région parisienne, facilitant ainsi grandement mon séjour. A mes frères, Guillaume et Alexandre pour votre présence, merci pour cette fraternité aussi grande que précieuse. A Irlande pour tous les conseils qui m'ont permis, l'été de ne pas trop m'encrasser. Je remercie mes amis, particulièrement Louis, Léa, Estéban, Victor et Clément pour tous les bons moments qui m'ont permis de tenir le coup.

A Cloé,

Je suis profondément reconnaissant pour le soutien et la présence quotidiens et inestimables. Merci de m'avoir encouragé et écouté lorsque j'en avais besoin, surtout lorsque la route devenait plus difficile, en particulier lorsqu'il s'agissait de rédiger le manuscrit, de préparer l'article ou de me préparer pour la soutenance. Je sais que je ne pourrai jamais te remercier suffisamment pour tout ce que tu as fait pour moi. Ta générosité et ta bienveillance ont été une véritable bouée de sauvetage pendant cette traversée.





## Sommaire

Remerciements .....	3
Sommaire .....	7
Glossaire .....	9
Introduction générale.....	14
Chapitre 1 : Positionnement de la thèse et état de l’art .....	22
Introduction du premier chapitre.....	22
1.1. Positionnement de la thèse .....	23
Positionnement de la recherche .....	24
Axes de recherche du LCPI et positionnement de la thèse.....	26
1.2. Contexte industriel et problématique industrielle .....	28
1.2.1. Contexte industriel.....	28
1.2.2. Problématique industrielle .....	32
1.3. État de l’art.....	37
1.3.1. Systèmes de production .....	38
1.3.2. Processus de conception amont .....	48
1.3.3. Gestion des Interfaces d’assemblage .....	56
1.3.4. Règles de conception .....	64
Synthèse du premier chapitre .....	67
Chapitre 2 : Problématique et hypothèses .....	72
Introduction du deuxième chapitre.....	72
2.1. Problématique.....	73
2.2. Formalisation de la méthode DfMMFAL .....	74
2.2.1. Formaliser les connaissances .....	77
2.2.2. Formaliser les pratiques existantes .....	81
2.3. Hypothèses .....	95
Synthèse du deuxième chapitre .....	97
Chapitre 3 : Expérimentations.....	100
Introduction du troisième chapitre .....	100
3.1. Etape 1 : Formaliser les connaissances – Expérimentation.....	101
3.1.1. Résultats escomptés.....	103
3.1.2. Déroulement de l’étape 1 .....	104
3.1.3. Vérification et synthèse des entretiens.....	122
3.2. Formaliser les pratiques existantes – Expérimentations .....	127
3.2.1. Étape 2.0 .....	129

3.2.2. Étape 2.1 .....	133
3.2.3. Étape 2.2 .....	147
3.2.4. Étape 2.3 .....	160
3.3. Synthèse de l'expérimentation des étapes de la méthode DfMMFAL.....	168
3.4. Discussions.....	169
Étape 1 .....	169
Étape 2.0.....	169
Étape 2.1 .....	170
Étape 2.2.....	170
Étape 2.3.....	171
Validation de nos hypothèses .....	172
Synthèse du troisième chapitre.....	173
Chapitre 4 : Apports et limites .....	178
Introduction du quatrième chapitre .....	178
Apports .....	178
Limites.....	183
Conclusion générale .....	188
Perspectives .....	189
Publications et communications.....	195
Publications .....	195
Livrables industriels .....	195
Bibliographie .....	196
Tables des annexes.....	204
Table des figures .....	214
Table des tableaux.....	218

## Glossaire

<b>Abréviation</b>	<b>Définition</b>
AM	Amplitude Modulation (Modulation d'amplitude)
APP	Assembly Product Plan
AR	Analyse Reuse
AS	Assembly Solution (Opération d'assemblage)
BE	Bureau d'étude
BI	Bureau industriel
BNAE	Bureau de Normalisation de l'Aéronautique et de l'Espace
BoM	Bill of Material (Nomenclature)
c	Composant
CA	Constituent Assembly (Assemblage de composants)
CAO	Conception assistée par ordinateur
CE	Chief Engineer (Ingénieur en chef)
CIFRE	Convention Industrielle de formation par la recherche
CR	Criticité
DDMS	Digital Design, Manufacturing & Services (Conception, fabrication et services numériques)
DfAM	Design for Additive Manufacturing
DfA	Design for Assembly
DfM	Design for Manufacture
DfMA	Design for Manufacture and Assembly
DfMMFAL	Design for Mixed Model Final Assembly Line
DfR	Design for Reuse

DfX	Design for X
DSM	Design Structure Matrix (Matrice de la structure de conception)
E	Element (Élément)
E/R	Émetteur/Récepteur
ECS	Environmental Control System (Système de contrôle de la climatisation)
EIM	Extended Interference Matrix (Matrice d'interférence étendue)
EMS	Emergency Service (Service d'urgence)
EP	Elementary Part (Pièce élémentaire)
EQ	Equipment (Équipement)
FAL	Final Assembly Line (Ligne d'assemblage finale)
FLIR	Forward Looking InfraRed (Système Infrarouge tourné vers l'avant)
FM	Frequency Modulation (Modulation de fréquence)
FMS	Flight Management System (Système de gestion de vol)
GPA	Generic Product Architecture (Architecture de produit générique)
GPS	Global Positioning System (Système de positionnement global)
H1	Hypothèse 1
H2	Hypothèse 2
HEEL	Helicopter Emergency Egress Lighting (Eclairage des issues de secours pour hélicoptère)
HIL	Hélicoptère Interarmée Léger
HUMS	Health & Usage Monitoring System (Système de surveillance de la santé et de l'utilisation)
i	Indice d'interface
ICARRE	Identification des Interfaces - I <sup>2</sup>
IFF	Identification Friend or Foe (Identification d'ami ou ennemi)

ILS	Instrument Landing System (Système d'atterrissage aux instruments)
IPO	Industrial Product Officer (Ingénieur en chef industriel)
LCPI	Laboratoire Conception Produit & Innovation
MBD	Model Based Design (Conception à base de modèle)
MBSE	Model Based System Engineering
MCA	Major Component Assembly (Assemblage de composants majeur)
ME	Mechanics (Transmission mécanique)
MFD	Modular Functional Deployment (Déploiement fonctionnel modulaire)
MILDS	Missile Launch Detection Sensors (Senseurs de détection de départ de missile)
MMFAL	Mixed Model Final Assembly Line (Ligne d'assemblage finale multi-modèle)
MTOW	Maximum Take Off Weight (Masse maximale au décollage)
O&G	Oil & Gas
PE	Poutre de Queue – Extérieur
PFMP	Product Family Plan Master (Plan directeur de famille de produits)
PLM	Product Lifecycle Management
PSO	Product Support Officer (Ingénieur en chef du support)
QCD	Quality Cost Delivery
QD	Quart de Coque Droit
r	Indice de réutilisation
R&D	Research & Development (Recherche & Développement)
SA	Sub-assembly (Sous-assemblage)
SAR	Search and Rescue (Recherche et Sauvetage)
SDE	Structure Design Engineer (Ingénieur en conception de structure)
SE	System Engineering

ST	Standard article (Article standard)
UHF	Ultra-High Frequency (Ultra Haute Fréquence)
VHF	Very-High Frequency (Très Haute Fréquence)
VIP	Very Important Personality (Haute personnalité)
WIP	Work in Progress (En cours de production)



## Introduction générale

### *Cadre et objet de la recherche*

Le travail présenté dans cette thèse de doctorat, dont l'intitulé est « Optimisation des interfaces entre processus de conception amont et systèmes de production », appliqué à l'élaboration d'une méthode de conception pour l'industrie hélicoptériste s'inscrit dans le cadre du programme de recherche initié par Airbus Helicopters. Ce programme de recherche a pour objet d'apporter des éléments de réponses à la question principale suivante : Comment faire évoluer la conception amont et les systèmes de production afin d'assembler deux hélicoptères différents sur une ligne d'assemblage finale multi-modèle (Mixed Model Final Assembly Line - MMFAL) ?

L'objet de ce travail de recherche est de proposer une nouvelle méthode de conception (amont) intégrant les spécificités de la production (aval). Les interfaces entre les processus de conception amonts et les systèmes industriels seront notamment étudiées. Les systèmes industriels représentent les activités de fabrication et d'assemblage nécessaires pour produire un bien. L'application de cette méthode de conception qui porte le nom de Design for Mixed Model Final Assembly Line (DfMMFAL) fait l'objet d'un cas d'étude pour l'industrie hélicoptériste.

Afin de réagir plus rapidement quant aux fluctuations du marché, de réduire les délais, les stocks intermédiaires et d'améliorer la productivité, Airbus Helicopters désire profiter pleinement des opportunités qu'apporte l'industrie du futur. Un des enjeux de l'industrie du futur est l'utilisation du plein potentiel des nouvelles technologies du numérique. Celles-ci sont vues comme un des moyens d'optimiser à la fois le processus de conception de nouveaux produits et celui de production. Airbus Helicopters souhaite notamment développer de nouveaux appareils selon une méthode qui apporterait de la flexibilité en production et notamment de permettre un assemblage sur des lignes à modèles mélangés. Au lieu d'être assemblés sur des lignes dédiées, les hélicoptères entrent dans une ligne multi-modèle, à l'instar de l'industrie automobile.

Cette nouvelle mise en production est l'occasion d'amener des ruptures dans la manière de concevoir en amont les systèmes afin de bénéficier pleinement de ce nouveau mode. Cependant, il n'existe pas de pratiques adaptées au cadre de notre recherche pour organiser une telle production. Les méthodes de conception et d'industrialisation ne sont pas toujours en phase pour optimiser la production sur une MMFAL et bien qu'il arrive que certains modèles différents soient assemblés sur de telles chaînes de production, les pratiques de conception y ayant conduit n'ont pas été formalisées. De plus les compétences nécessaires à l'époque ne sont pas toujours disponibles compte tenu de la longue période entre deux développements d'un même segment du marché.

Une première approche consiste donc à formaliser des recommandations techniques issues de ces derniers développements afin de mettre au point une pratique générique et applicable à toutes les industries manufacturières. Cette pratique a pour but de guider les équipes du développement à

concevoir des produits compatibles avec une MMFAL à travers la mise à disposition de ces recommandations lors des différentes phases de développement d'un nouveau produit.

### *Contexte général de la problématique*

Au fil des années les systèmes de production, plus précisément les lignes d'assemblage finales (Final Assembly Lines - FAL) sont devenues une fonction stratégique dans l'industrie. Garanties du bon assemblage des produits, elles contribuent à améliorer la vitesse de production, la qualité des produits et à diminuer les coûts.

Le marché de l'industrie aéronautique et plus particulièrement des hélicoptères évolue rapidement et la concurrence se resserre. Le marché est désormais mature et a besoin de flexibilité pour rester compétitif. Cela peut se traduire en production par un assemblage multi modèle.

Aujourd'hui l'industrialisation commence tout juste à être au cœur du développement d'un hélicoptère, notamment avec le dernier né des hélicoptères Airbus, le H160. Il est le premier appareil à prendre en compte des contraintes d'industrialisation et de production lors de sa conception.

Dans le même sens, il est également possible, grâce à l'élaboration de règles et recommandations à suivre pendant la conception amont d'un nouveau produit, de le rendre compatible avec une ligne d'assemblage finale multi-modèle, ce principe est le DfMMFAL.

### *Champ de la problématique*

Le champ de la problématique couvre d'une part les aspects méthodologiques, avec notamment une réflexion autour des nouvelles technologies dans la continuité des méthodes conventionnelles. D'autre part, elle couvre également les aspects de gestion des connaissances au sein d'une entreprise. Ces thèmes s'inscrivent dans ceux portés par le Laboratoire de Conception de Produit et d'Innovation (LCPI). Notre objectif est de proposer à Airbus Helicopters, et plus généralement aux entreprises liées à l'industrie manufacturière avec un marché similaire, une méthodologie de DfMMFAL formalisant une analyse fine des développements passés portée sur l'architecture modulaire et la réutilisation de composants afin de faciliter le passage de deux produits différents sur une même FAL.

Nous avons initié notre recherche par l'étude du contexte industriel puis celle de l'état de l'art autour des systèmes de production afin d'identifier les spécificités d'une MMFAL et ses principales caractéristiques. Il en ressort que la conception amont contribue fortement à faciliter l'assemblage et la production de produits, notamment à travers l'intégration d'une architecture modulaire et en suivant les principes de Design for Assembly (DfA) ou Design for Manufacturing Assembly (DfMA). Nous avons ensuite cherché quels outils et pratiques permettaient d'optimiser la conception amont d'un produit et dans quelles mesures ils pouvaient s'appliquer à un contexte industriel tel que l'industrie aéronautique hélicoptériste. Aussi, nous avons analysé comment la gestion des connaissances était

utile pour adresser des règles et recommandations aux équipes de développement dès ces phases de conception amont. Cela nous a permis d'une part de mettre en évidence les contraintes d'application et les difficultés de mise en œuvre des solutions d'optimisation de la conception amont présentes dans la littérature, et d'autre part d'identifier les recommandations et paramètres pertinents influençant la bonne utilisation de ces modèles.

### *Structure du document*

Ce document s'articule autour de **4 chapitres**.

**Dans le premier chapitre**, nous présentons de manière synthétique notre positionnement par rapport au domaine du génie industriel et de l'ingénierie de la conception. Plus particulièrement nous nous intéressons à la conception amont de produits, à leurs caractéristiques ainsi qu'à leurs systèmes de production. **Aussi**, nous présentons d'une part le contexte industriel de la structure d'accueil de ces travaux de recherche. D'autre part, nous présentons une étude de l'état de l'art sur les processus de conception amont, les systèmes de production et la gestion des interfaces d'assemblage. La gestion des connaissances et l'usage de règles de conception sont aussi des domaines analysés dans l'état de l'art. Les principaux constats de l'état de l'art sont formalisés à travers une synthèse, où nous identifierons également les recommandations proposées par la littérature. Cette analyse nous permet de mettre en avant les éléments essentiels impactant l'optimisation de la conception amont et apporte des éléments de construction pour notre problématique de recherche ainsi que notre hypothèse de résolution.

**Dans le deuxième chapitre**, la proposition d'une formalisation de recommandations techniques DfMMFAL, organisant le travail afin d'aider les équipes de conception à développer un produit compatible avec une MMFAL est envisagée **comme une optimisation des interfaces entre les processus de conception amont et les systèmes de production**. On présente aussi notre méthodologie globale pour prendre en compte nos hypothèses et parvenir à formaliser et mettre en place une méthode de conception suivant les principes de DfMMFAL. La méthode s'adresse aux entreprises ayant déjà assemblé deux produits sur une MMFAL mais dont aucune pratique ou règle n'ont été formalisée. Elle présente deux axes principaux, le premier consiste à formaliser les connaissances et recueillir les spécificités du terrain. Le second axe repose sur l'utilisation des résultats d'une analyse de la réutilisation de composants entre deux appareils assemblés en MMFAL. C'est à partir du traitement de ces résultats que trois étapes proposent une formalisation des pratiques visant à modéliser des règles et recommandations à destination des équipes de développement. L'objectif de cette méthode de formalisation est de tenter de répondre à la problématique :

## **Comment assister les équipes de développement à concevoir de manière optimisée des nouveaux produits compatibles avec une ligne d'assemblage finale multi-modèles ?**

**Dans le troisième chapitre**, nous utilisons notre méthode formalisée de règles de DfMMFAL. D'une part nous menons notre série d'entretiens qualitatifs nécessaires à la formalisation des connaissances et à la compréhension des spécificités du terrain ainsi qu'à l'organisation des différentes phases de développement d'un nouveau produit. Ensuite, les trois étapes de traitement de notre méthode DfMMFAL sont utilisés sur des cas d'étude proposés par la structure d'accueil de ces travaux, Airbus Helicopters. Ces expérimentations nous ont permis de **formaliser les connaissances** et **formaliser les pratiques existantes** qui ont conduit à la mise en place d'une MMFAL. Il se termine par une synthèse dans laquelle les résultats sont discutés. Enfin, nous comparons les résultats obtenus à l'issue des expérimentations avec les résultats attendus pour valider, ou non, nos hypothèses de recherche.

**Dans le quatrième chapitre**, nous présentons les apports et les limites de nos travaux de recherches, si nos hypothèses de recherche sont validées, nous avons découvert certaines limites dans l'application de notre méthode DfMMFAL lors des expérimentations qui nécessite une recherche ultérieure pour les résoudre.

Enfin, dans la **conclusion générale** de ce manuscrit nous reprenons l'ensemble des travaux réalisés au cours de nos 3 années de thèses puis nous passerons en revue les perspectives de nos apports de thèse.

La Figure 1 synthétise le plan de thèse.

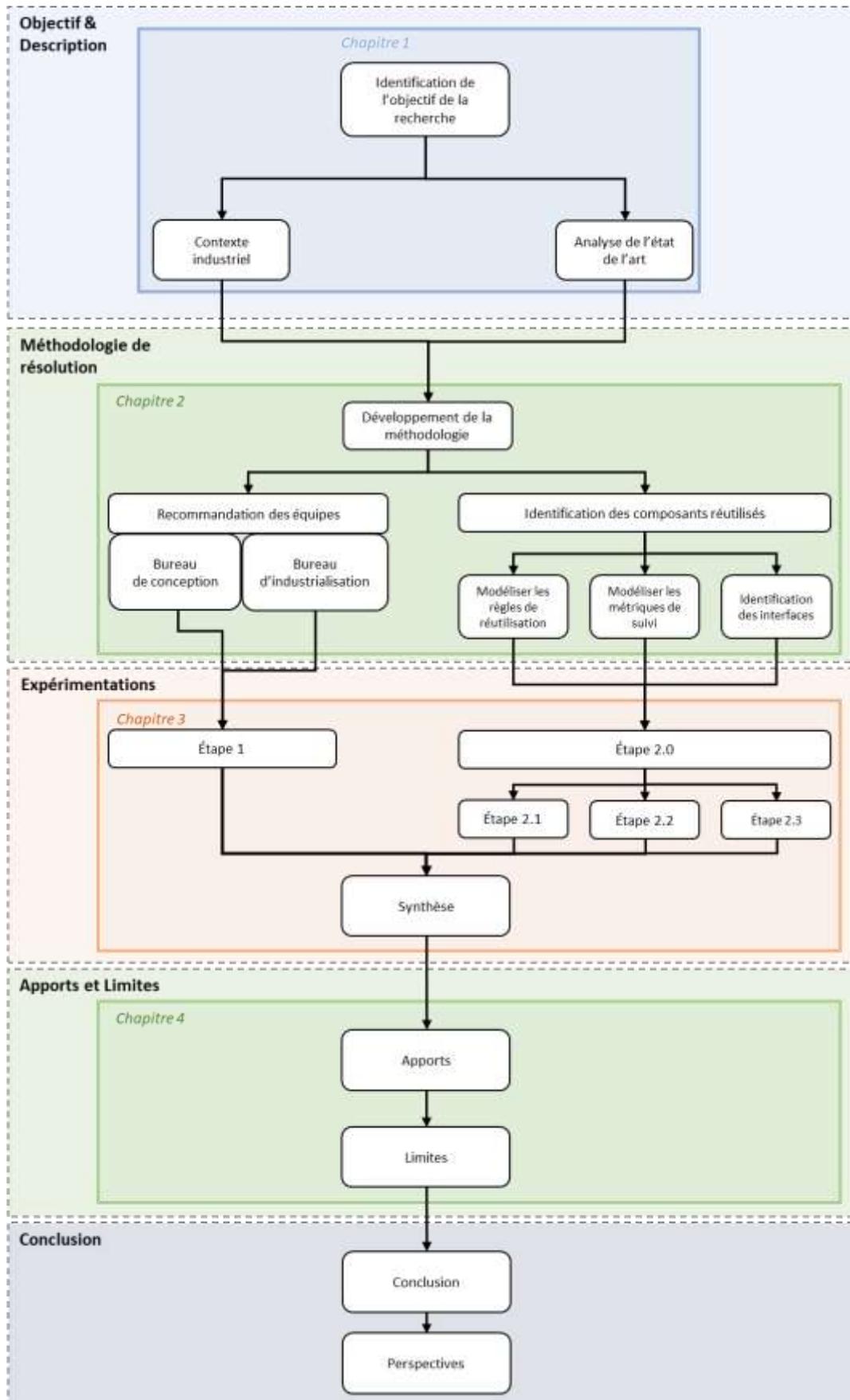


Figure 1 : Résumé de la démarche de résolution





# Chapitre 1

Positionnement de la thèse

&

État de l'art

# Chapitre 1 : Positionnement de la thèse et état de l'art

## Introduction du premier chapitre

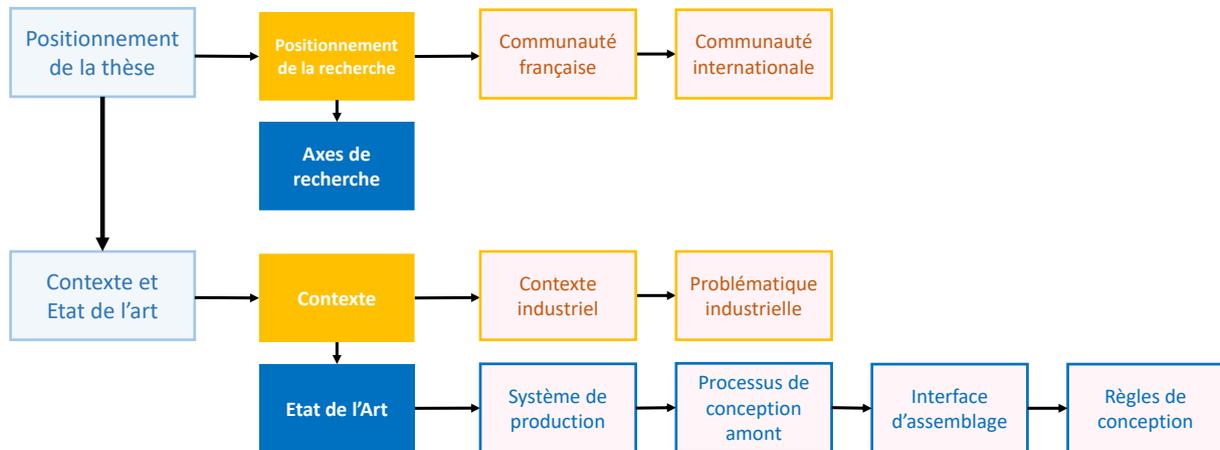


Figure 2: Structure du premier chapitre

Dans ce premier chapitre, nous présentons dans un premier temps le positionnement scientifique de notre recherche. Nous définissons alors les domaines et les acteurs qui interagissent avec notre recherche. Dans un second temps, nous présentons comment ces domaines et acteurs s'inscrivent dans les axes de recherche du LCPI. La Figure 2 représente la structure du premier chapitre.

Dans un second temps, nous explorerons le contexte industriel dans lequel évoluent nos travaux de recherche qui nous ont conduits à exprimer notre besoin. ; produire de manière plus flexible pour s'adapter rapidement aux fluctuations du marché. Cette section se découpe en 2 parties :

- 1) Contexte industriel : Cette thèse CIFRE (Conventions Industrielles de Formation par la Recherche) a été faite en partenariat avec l'entreprise Airbus Helicopters. Il convient alors de présenter le groupe, son activité ainsi que le projet dans lequel s'inscrivent nos travaux de recherche.
- 2) Problématique industrielle : La compréhension du contexte dans lequel se déroule ces travaux nous conduisent à formuler la problématique initiale de l'entreprise : *Comment aider les concepteurs à développer de manière optimisée les nouveaux appareils afin de répondre aux besoins de flexibilité souhaités par l'entreprise, plus particulièrement en développant suivant une approche modulaire sur un système de production flexible ?*

Enfin, nous analyserons à travers l'état de l'art les différentes approches existantes de l'industrie manufacturière pour répondre à ce besoin de flexibilité. Après avoir montré l'importance de

notre sujet d'étude grâce l'identification du manque de pratiques adaptées, nous serons en mesure de nous poser la problématique de recherche suivante : *Comment aider les équipes de développement à concevoir de manière optimisée des nouveaux appareils compatibles avec une Ligne d'Assemblage Finale Multi-Modèles ?*

Une réponse hypothétique à cette question sera formulée à la suite de ce chapitre à partir de la synthèse de l'état de l'art sous forme de trois constats. Pour nous conduire à ces constats ; l'état de l'art se découpe en 4 parties :

- 1) Pour commencer nous étudierons quels **systèmes de production** nous propose la littérature afin de répondre au besoin de flexibilité.
- 2) Les contraintes des systèmes de production peuvent être prises en compte dès le **processus de conception amont** d'un nouveau produit. Cette partie vise à explorer quelles sont les méthodologies les plus adaptées pour à la fois répondre au besoin de flexibilité et être compatible avec le système de production envisagé. Aussi, il convient de savoir gérer la connaissance afin de l'adresser aux équipes de conception.
- 3) Les **interfaces d'assemblage** sont responsables de l'intégration des composants en lignes d'assemblage. Ainsi nous analyserons ici comment, à partir de produits existants il est possible d'identifier les interfaces responsables de la réutilisation des composants dans le but de formaliser les connaissances.
- 4) Enfin, afin d'adresser les contraintes du système de production aux équipes de développement d'un nouveau produit, nous analyserons la littérature à propos des **règles de conception**.

Enfin, la synthèse du Chapitre 1 présentera les trois constats qui nous amèneront à étudier la possibilité d'une nouvelle méthodologie outillée permettant aux équipes de développement de concevoir un produit pour un assemblage sur un système de production flexible.

## 1.1. Positionnement de la thèse

Notre recherche débute par le système de production et son contexte pour identifier et définir les différentes applications, et leurs enjeux. Cette première analyse met en avant une notion importante : la production sur lignes d'assemblage à modèles mélangés. Puis, nous nous sommes intéressés aux solutions existantes de conception de produits permettant de répondre au besoin de flexibilité. Nous avons alors distingué les différentes approches de conception amont ; l'architecture modulaire du produit, la conception par réutilisation et la standardisation des interfaces d'assemblage. Cette analyse a soulevé l'importance capitale de disposer de ces approches de conception amont afin

d'assembler plusieurs produits sur une même ligne d'assemblage. Ce point, pourtant essentiel, semble ignoré ou peu considéré dans l'industrie aéronautique hélicoptériste et s'avère être disqualifiant lorsque nous cherchons à assembler deux appareils différents sur une même ligne d'assemblage. Nous avons cherché, à travers ces travaux de recherche comment la proposition d'une méthode de DfMMFAL peut aider à comprendre pourquoi ces méthodes sont peu considérées et proposer des règles de conception pour optimiser les interfaces entre les processus de conception amont et les systèmes de production.

## Positionnement de la recherche

En abordant la question d'optimisation des interfaces entre les processus de conception amont et des systèmes de production, notre recherche se positionne dans le domaine du génie industriel. La recherche académique a depuis longtemps considéré la conception amont comme une fonction stratégique ; elle a donc cherché à l'outiller et à l'optimiser. Par conséquent, la littérature scientifique abonde en modèles d'optimisation de la conception amont. Souvent, il arrive que les solutions proposées abordent la question d'optimisation de manière spécifique au milieu dans lequel elles sont développées. Il est donc difficile de les généraliser pour une application au milieu industriel hélicoptériste. Notre recherche s'articule autour du déploiement de règles et recommandation de Design for Mixed Model Final Assembly Line (DfMMFAL).

## *Communauté internationale*

Nos travaux portent sur l'optimisation des interfaces entre les processus de conception amont et les systèmes de production. Les équipes de chercheurs qui publient sur ce sujet à l'international sont principalement situées en Asie, en Amérique du Nord et en Europe et travaillent dans les domaines de l'industrie manufacturière, de l'optimisation de la conception et des systèmes de production (Tableau 1)

Tableau 1 : Entités de recherche travaillant sur l'optimisation entre les processus de conception et les systèmes de production à l'international

Pays		Établissements	Entités de recherche	Description
Asie	Chine	Beihang University	School of Mechanical Engineering and Automation	Solution d'intégration de grands ensembles en FAL
	Taiwan	National Chiao Tung University Taiwan	Department of Industrial Management	Optimisation des systèmes de production
Amérique du Nord	Canada	University of Windsor	Intelligent Manufacturing System (IMS) Centre	Design et ingénierie autour des systèmes de production flexibles
	Canada	École de Technologie Supérieure	Department of Automated Production Engineering	Conception de produit autour de la réutilisation de composant et la modularité
	État Unis	The University of Michigan	Department of Mechanical Engineering	Conception et optimisation des systèmes de production
Europe	Suède	Mälardalen University	Division of Product Realization	Design et ingénierie de l'innovation autour de la modularité et des systèmes de production
	Belgique	University Libre de Bruxelles	CAD CAM Department	Conception de MMFAL
	Royaume Uni	The University of Nottingham	The University of Nottingham	Méthodologies de Design for X
	Finlande	Tampere University of Technology	Department of Mechanical Engineering and Industrial System	Optimisation du processus de conception
	Italie	Università Politecnica delle Marche	Department of Industrial Engineering and Mathematical Science	Méthodologie de Design for X
	Allemagne	Technische Universität Berlin	Institute for Machine-tools and Factory Management	Conception de produit modulaire

### Communauté française

En France, les laboratoires travaillant à l'optimisation des processus de conception et des systèmes de production sont spécialisés dans le génie industriel ou dans les sciences de l'ingénierie de la conception (Tableau 2).

Tableau 2 : Entités de recherche travaillant sur l'optimisation entre les processus de conception et les systèmes de production en France

Ville	Établissements	Entités de recherche	Description
Paris	École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers	LCPI : Laboratoire de Conception de Produit et d'Innovation	Optimisation du processus de conception
		LISPEN : Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes Physiques et Numériques	Conception de produit/process Industrie du Futur
	École Centrale Paris Université Paris-Saclay	Laboratoire de Génie Industriel	Ingénierie de la conception
Bidart	École Supérieure des Technologies Industrielles Avancées	ESTIA-Recherche	Ingénierie des systèmes complexes
Bordeaux	École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers	I2M : Institut de mécanique et ingénierie	Conception de produits sur l'ensemble des phases de vie et méthodes d'optimisation
Albi	Université Champollion	Institut Clément Ader	Génie Mécanique
Compiègne	Université de Technologie de Compiègne	Roberval : Laboratoire Mécanique, énergie et électricité	Conception modulaire produit/process
Grenoble	Grenoble INP	G-SCOP : Laboratoire des Sciences pour la Conception, l'Optimisation et la Production	Conception de produit ; Ingénierie des connaissances
Troyes	Université de Technologie Troyes	LASMIS: Laboratory of Mechanical & Material Engineering	Product Lifecycle Management
Nancy	École des Mines Université de Lorraine	Institut Supérieur d'Ingénierie de la Conception	Méthodes avancées de conception et de fabrication

### Axes de recherche du LCPI et positionnement de la thèse

Créé en 1978, le LCPI est un laboratoire de recherche des Arts et Métiers Sciences et Technologies situé sur le campus de Paris dans le domaine du génie industriel.

L'objectif de recherche du LCPI est d'optimiser les processus de conception et d'innovation. Ce développement se traduit par la construction de modèles théoriques de processus projets/métiers liés à l'activité de conception et d'innovation. Ces modèles sont évalués en contexte opérationnel afin de valider des connaissances, méthodes et outils dont l'intégration contribue à une dynamique d'avancée scientifique et de progrès industriel. Les résultats de cette recherche sont des modèles de processus (formalisation des pratiques métiers) et des outils pour la conception (proposition d'outils méthodologiques et technologiques). L'une des originalités de la recherche du LCPI est l'effort particulier porté sur les phases amont du processus de conception. La recherche du laboratoire se décompose en deux axes :

- L'axe métiers vise à enrichir le processus de conception par l'intégration de nouvelles connaissances, règles et outils métiers (design, ergonomie, ingénierie...).
- L'axe processus ambitionne la formalisation globale du processus de conception pour mieux le comprendre et l'optimiser.

Ces travaux de thèse visent à apporter une solution aux systèmes de production en proposant des règles et recommandations aux processus de conception. Ils s'inscrivent donc dans l'axe processus du laboratoire et s'appuient sur l'expertise du laboratoire dans **la gestion des connaissances et du cycle de vie des produits** (Figure 3).

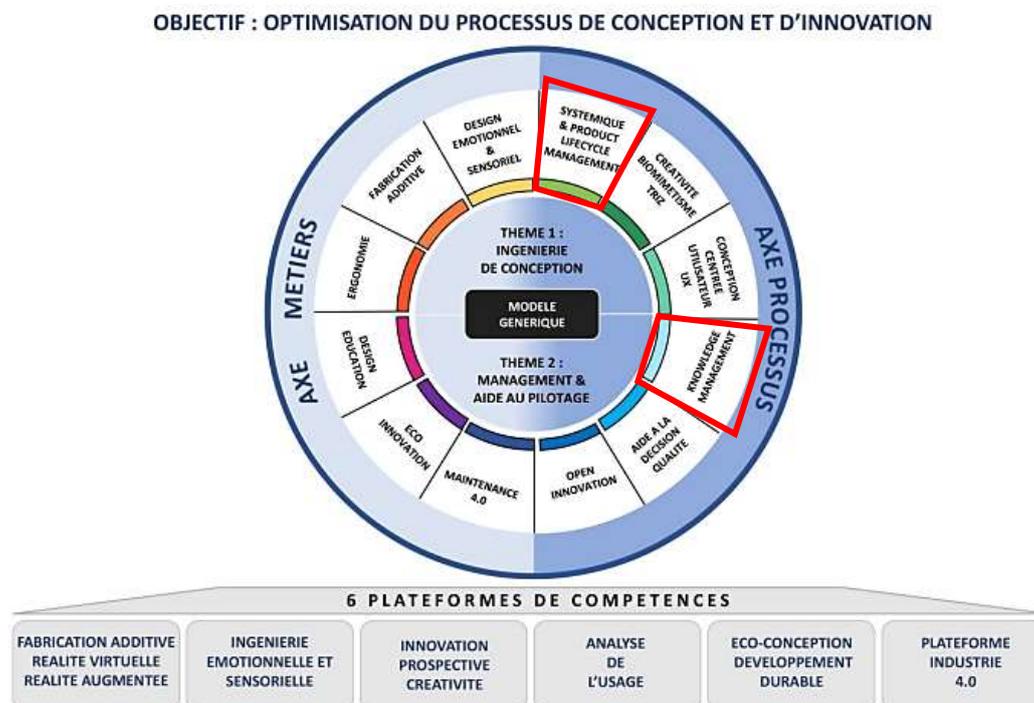


Figure 3 : Thèmes et axes de recherche du LCPI

## 1.2. Contexte industriel et problématique industrielle

### 1.2.1. Contexte industriel

Airbus Helicopters est une entreprise européenne née en 1992 de la fusion des divisions hélicoptères d'Aérospatiale et Deutsche Aerospace (se référer à la Figure 4). À l'origine de cette fusion, l'entreprise a pris le nom d'Eurocopter. Faisant parti du groupe Airbus, Airbus Helicopters est aujourd'hui le leader mondial de l'hélicoptère civil avec 52% des parts de marchés en 2021. Ces chiffres se justifient par l'omniprésence de l'entreprise dans toutes les gammes d'appareils<sup>1</sup> en proposant à ses clients un très large portfolio d'hélicoptères pour tous types de missions, civiles, parapubliques ou militaires.

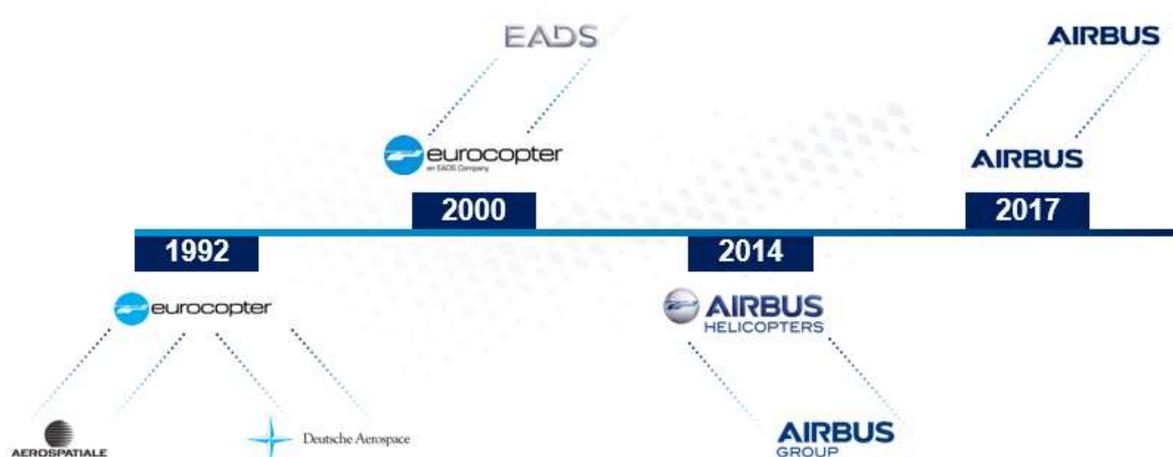


Figure 4 : Évolution de l'entité 'hélicoptère' d'Airbus

Aujourd'hui, le marché de l'hélicoptère est en retrait. Le ralentissement brutal de l'activité pétrolière et gazière en 2008 qui trouve ses origines dans la chute du baril de pétrole est en partie la cause de cette baisse.

Pour les prochaines années, Airbus Helicopters se prépare et adopte une stratégie précise ; pour obtenir des parts de marché, il faut produire mieux, moins cher et plus vite en misant sur les nouveaux programmes innovants.

Au cœur d'un marché concurrentiel, Airbus Helicopters tente depuis plusieurs années d'accroître son efficacité industrielle. La division spécialisée dans le développement, la fabrication et le support d'hélicoptères du groupe Airbus s'inscrit dans une politique de satisfaction client. En effet, pour atteindre son objectif, Airbus Helicopters s'appuie sur les 3 critères du triptyque Quality-Cost-Delivery (QCD) : qualité du produit vendu au client, coût de la machine et délai de livraison. C'est en maximisant la qualité et en minimisant les délais de livraison que l'entreprise a su maintenir sa position de leader notamment sur le marché des hélicoptères civils.

<sup>1</sup> Plus de 5 sièges et 2 tonnes.

## Effectif

Airbus Helicopters emploie 19 869 employés en 2022 à travers ses différents sites en Europe et dans ses 31 Customer Center et sites affiliés dans 24 pays.

## Produits

L'entreprise fournit des solutions de vol vertical dans les domaines civils et militaires (Figure 5) les plus efficaces à ses clients qui servent, protègent et sauvent des vies et transportent des passagers en toute sécurité dans des environnements parfois très exigeants.

Le chiffre d'affaires en 2021 est de 6,509 Mds€ et est issu d'une part de 44% d'activité de service et d'autre part de 56% de produits. Parmi ces produits on retrouve 56% d'appareils militaires et 44% d'appareils civils. Toutes les catégories sont couvertes : machines monomoteurs légères (H125, H130), bimoteurs mediums et super mediums (H135, H145, H160, H175), les hélicoptères lourds (H215, H225), l'hélicoptère de combat Tigre (EC 665) ou le NH90, fruit d'une collaboration avec l'Italie et les Pays Bas. Airbus Helicopters possède ainsi la plus grande gamme d'hélicoptères civils et militaires du monde. La flotte des hélicoptères de la gamme est mondiale avec 3 111 opérateurs dans le monde volants sur 12 012 hélicoptères en service dans 153 pays et ayant accumulés en 2021 presque trois millions d'heures de vol.

Le dernier né de la gamme, le H160 est un hélicoptère moyen de 6 tonnes. Il fut développé pour permettre d'assurer différents types de missions telles que le transport dans le secteur pétrolier et gazier, le transport privé de passagers ou des missions de sauvetage et d'urgences médicales. L'appareil est conçu à Marignane et Donauwörth (Allemagne). La livraison des premiers appareils a débuté en été 2021 et 16 appareils ont été construits (dont 3 prototypes). Le H160M a été sélectionné dans le cadre du programme Hélicoptère Interarmées Léger (HIL) qui vise à remplacer cinq flottes d'hélicoptères en service dans les trois armées Françaises. Il sera capable d'assurer toutes les missions de surveillance et d'interventions aux côtés des hélicoptères spécialisés comme le NH90 et le Tigre.



*Figure 5 : Gamme civile, militaire et des démonstrateurs d'Airbus Helicopters*

Airbus Helicopters est le seul industriel du secteur à proposer une gamme d'appareil aussi large. La question de flexibilité sur les lignes d'assemblage leur est donc propre alors que dans la concurrence, aucune solution n'a encore été mise en place. C'est dans le cadre d'un plan de transformation que notre sujet de thèse vise à proposer une solution pour répondre à ce besoin de flexibilité.

### Le 'Transformation Plan' d'Airbus Helicopters :

Depuis 2014, le plan de transformation mis en place par l'ancien président Guillaume FAURY, aujourd'hui président d'Airbus Group, vise à déployer des nouvelles méthodes de travail plus agiles. L'objectif fixé est d'industrialiser l'entreprise en passant par l'intégration des nouvelles procédures de travail, le renforcement du travail en sécurité, la mise en place du LEAN management ou encore en modifiant ses moyens de fabrication.

L'hélicoptère H160 est le premier appareil d'une nouvelle génération développé avec le plan de transformation. Il intègre plusieurs avancées technologiques qui le placent en tête de la gamme des hélicoptères médium. Airbus Helicopters considère que la véritable réussite concerne l'industrialisation du H160 : il a été co-développé pour assurer non seulement des performances en opération mais également une facilité de production et de maintenance. Le concept de modularité a été intégré dans sa conception, permettant au système de production d'être plus efficace et performant. À

titre d'exemple, le temps d'assemblage d'un hélicoptère a été divisé par deux, passant de 90 jours à 40 jours. Dans ce nouveau système de production, les différents modules sont produits sur différents sites d'Airbus. Cela a également modifié les politiques d'approvisionnement.

## DDMS – Digital Design, Manufacturing and Services

Le programme conception, fabrication et services numériques (Digital Design, Manufacturing and Services - DDMS) est le programme de digitalisation de l'entreprise qui vise à fournir une nouvelle architecture d'entreprise avec des processus revisités. C'est un programme qui concerne toutes les divisions (Commercial Aircraft, Helicopters et Defense & Space) afin de transformer le développement des futurs produits d'Airbus. Les solutions proposées par DDMS concernent les nouveaux process, outils, modèles, compétences et transformations. Ces solutions visent à changer la perspective centrée sur la performance unique du produit à un co-développement de produits, de systèmes industriels et aux supports et services associés. Aujourd'hui DDMS délivre déjà des solutions sur certains projets existants d'Airbus comme Meca 4.0 pour Airbus Helicopters, l'A321XLR ou l'A350. L'ambition et les trajectoires de DDMS se résument en cinq valeurs clés ; le Time-to-Market, la flexibilité, l'optimisation des coûts, les services et le développement durable.

- Time-to-Market : à l'instar de l'industrie automobile il vise à réduire le temps de développement pour pouvoir faire évoluer la gamme d'appareil plus fréquemment et ainsi suivre les évolutions demandées par le marché.
- Flexibilité : consiste à rendre les systèmes industriels flexibles pour répondre à la demande évolutive de produits.
- Support et Services : étend la présence de l'entreprise dans les opérations quotidiennes des clients tout en offrant des opportunités de croissance.
- Développement durable : est à la base de toutes les activités quotidiennes à chaque étape du cycle de vie du produit.

Le projet DDMS devient ainsi une réalité à l'échelle de l'entreprise pour toutes les divisions et lignes de produits d'Airbus. Il ouvre la voie à des percées dans la conception de nouveaux produits, les performances opérationnelles, le support et la maintenance, la satisfaction des clients et les nouveaux modèles commerciaux, car elle représente un passage de processus de développement séquentiels à des processus parallèles. Au lieu de se concentrer d'abord sur les performances du produit, Airbus sera en mesure de co-concevoir et de développer la prochaine génération d'aéronefs avec les installations de fabrication qui les produiront, réduisant ainsi les coûts et les délais de commercialisation. Les 4 piliers qui fourniront cette capacité sont identifiés sur la Figure 6 :



Figure 6 : Les 4 piliers liés au déploiement de DDMS

Dans le cadre d'un protocole d'accord signé en 2019, Airbus déploiera le projet DDMS à travers la plate-forme 3DEXPERIENCE® de Dassault Systèmes®. Elle assure la continuité numérique, de la conception aux opérations, dans un modèle de données unique pour une expérience utilisateur unifiée, faisant du projet DDMS une réalité à l'échelle de l'entreprise pour toutes les divisions et lignes de produits d'Airbus.

Nos travaux de thèse visent à fournir une solution de règles et recommandations au projet DDMS pour réduire la variabilité et augmenter la flexibilité d'un système de production grâce à la modularisation et à la standardisation. Ils s'intègrent donc dans le pilier 'Product Line' (Figure 6).

### 1.2.2. Problématique industrielle

L'industrie aéronautique conçoit des produits complexes et nécessite des systèmes de production performants pour les fabriquer. La production aéronautique intègre généralement des modes de production par lots ou par flux (Grigoriev et al., 2013 ; G. F. Barbosa et al., 2014). Ces deux modes sont performants pour la production de produits peu diversifiés avec des volumes de production élevés (Zanettin, 2018). Or, l'industrie aéronautique a de plus en plus besoin de flexibilité sur ses lignes de production pour être capable d'absorber les fortes fluctuations commerciales multi-modèles tout en conservant un volume de production important sur les lignes pour rester performant. Une partie importante de la conception consiste à analyser les combinaisons potentielles de chaque solution d'ingénierie et de proposer la meilleure alternative (Shamsuzzoha & Helo, 2017).

Pour répondre au besoin de flexibilité, la conception modulaire semble être une réponse adaptée. En effet, les recherches existantes montrent que la conception modulaire favorise une augmentation de la compétitivité car elle a un impact sur la capacité de production, réduit les coûts,

améliore la qualité des produits et améliore le service à la clientèle : la flexibilité et les délais de livraison (L. M. Barbosa et al., 2017). La conception modulaire permet de définir les interfaces des modules d'un même produit afin d'assurer le bon assemblage de celui-ci (Takeishi & Fujimoto, 2005). Afin d'être efficace, le développement de produits modulaires doit suivre des règles et recommandations spécifiques. Cependant, nous n'avons pas trouvé dans la littérature de règles multi-produits sur ces interfaces permettant d'assurer un assemblage sur les mêmes systèmes productifs adaptées à l'industrie hélicoptériste.

Les hélicoptères sont devenus parfois indispensables pour une grande variété de missions. Ils possèdent des atouts parmi lesquels la possibilité de décoller et atterrir verticalement et donc d'avoir accès à des infrastructures modestes voire inexistantes ; le vol stationnaire à basse vitesse et basse altitude ou une adaptabilité à remplir plusieurs missions pour un même appareil. Ces atouts sont au détriment de certaines caractéristiques pénalisantes en exploitation telles que le bruit interne et externe, la sensibilité aux conditions météorologiques et un coût d'exploitation élevé. Aussi, le rayon d'action est limité, la capacité d'emport plus faible et la puissance nécessaire au vol plus élevée avec des gammes de vitesses de croisières faibles comparée aux performances équivalentes des voilures fixes. Enfin, le réseau d'utilisateurs est hétérogène, les opérateurs des secteurs comme l'off-shore, le parapublic ou l'armée possèdent de grandes flottes d'appareils et de petits opérateurs, très nombreux, possèdent parfois une seule machine (Cassier et al., 2018).

L'industrie aéronautique hélicoptériste fait aujourd'hui face à deux défis : l'évolution du marché, ainsi que les spécificités clients de leurs appareils. Contrairement à celui de l'automobile, le marché hélicoptériste n'est pas un marché à très forte concurrence. Effectivement sur certains segments comme le marché Oil & Gas (O&G - transports de personnels aux stations off-shore) il n'existe que deux industriels, Airbus avec le H225 et Sikorsky avec le S-92, qui à eux deux représentent une grosse partie de la flotte mondiale O&G. Ce n'est pas le seul secteur dans lequel uniquement deux industriels peuvent se placer, il est trivial d'expliquer que les vols long-courriers dans l'aviation commerciale sont assurés principalement par les constructeurs Airbus et Boeing. La différence avec l'industrie aéronautique commerciale est qu'un avion ne peut être utilisé que pour deux missions : le transport de fret et le transport de passager. Dans le cas hélicoptériste, un appareil peut effectuer plusieurs missions possibles, parmi lesquelles on retrouve l'O&G, le transport de personnalités (very important persons – VIP), Recherche et Sauvetage (Search And Rescue – SAR), service médical d'urgence (Emergency Medical Service – EMS) ou le travail aérien (maintenance de parc éolien ou de ligne hautes-tension). Pour chaque segment du marché, on retrouve deux ou trois machines civiles capables de remplir de telles missions.

Jusqu'en 2008, la force d'Airbus était de produire des hélicoptères dédiés aux clients, chaque hélicoptère sortant d'une ligne d'assemblage était conçu sur mesure et dédié à un client. Il intégrait une forte partie de personnalisation. Dans ce contexte il était difficile de standardiser. La notion temps de service n'était pas aussi importante qu'aujourd'hui, le client était prêt à attendre son hélicoptère.

Depuis la crise financière et pétrolière de 2008 l'évolution du marché a induit un changement dans les contraintes du client. Désormais il faut un hélicoptère moins cher et plus rapidement. On constate une baisse significative de commandes et livraisons d'appareils dans le monde entier depuis cette période. En effet on a vu que la chute du prix du baril de pétrole ralentissant les activités pétrolières et gazières a rendu non rentable l'exploitation pétrolière sur les plateformes offshore éloignées. De plus, la crise financière de 2015 a aussi réduit l'utilisation opérationnelle de la flotte mondiale d'hélicoptères. Aujourd'hui le prix du baril a repris et l'activité des hélicoptères en mission offshore également, pour soutenir les activités pétrolières. Le marché hélicoptériste est donc étroitement lié aux événements et connaît des fluctuations en dents de scie. En outre, avec l'arrivée massive des sociétés de leasing<sup>2</sup> sur le marché hélicoptériste, les clients ne connaissent pas toujours initialement les missions des appareils commandés. Aussi il est nécessaire d'être en mesure de laisser le client spécifier la mission de l'appareil au plus tard et donc permettre cette flexibilité par le processus d'assemblage.

Une autre dimension pour l'industrie hélicoptériste est l'exigence du client. En effet pour celui-ci l'identité visuelle d'un appareil peut être perçue de différentes manières. Certains industriels possèdent une gamme d'hélicoptères dont la silhouette est très proche, d'autres non. Un propriétaire privé choisira peut-être un hélicoptère unique où l'aspect extérieur est plus important que les performances de la machine alors qu'une flotte entreprise ou un bailleur trouvera plus intéressant d'avoir une flotte de plusieurs modèles différents mais avec le même aspect, comme la famille des hélicoptères Leonardo (Figure 7). Un client qui possède une flotte d'hélicoptères aimerait aussi que la maintenance, l'opérabilité ou le pilotage de ces appareils soient des caractéristiques communes. Aussi un opérateur achetant un hélicoptère pour ses innovations technologiques préfère que son appareil soit différent du modèle précédent ou des autres appareils plus vieux de l'hélicoptériste. Le développement par rupture amène généralement un changement radical de l'apparence d'un hélicoptère. La Figure 7 présente deux gammes d'hélicoptères dont une d'Airbus Helicopters.



Figure 7 : Une gamme des hélicoptères Leonardo à gauche (de gauche à droite, AW169, AW139 et AW189) et la gamme civile Airbus Helicopters à droite

---

<sup>2</sup> Sociétés achetant les appareils pour les louer aux opérateurs.

L'industrie hélicoptériste a aujourd'hui passé plusieurs phases de maturité pour devenir un marché mature, c'est-à-dire un marché où les entreprises se partagent les parts et tentent de le contrôler. Avant de devenir mature le marché était en croissance, le potentiel de croissance fut important et l'intégration d'une technologie évolutive permettait de gagner des parts du marché (Lehmann-Ortega et al., 2013). En 30 ans, le marché de l'hélicoptère est passé de 'en croissance' à 'mature'. Lorsque le marché était en expansion, le fabricant contrôlait le marché en positionnant un appareil grâce à de nouvelles technologies. Aujourd'hui, les avancées technologiques sont plutôt des extrapolations de technologies existantes et asymptotiques et ne représentent pas de ruptures (Cassier et al., 2018). Ainsi le marché, mature est désormais contrôlé par le client. Un hélicoptère est désormais développé en fonction de nouvelles exigences du marché et notamment la versatilité de l'appareil, le délai de livraison et un prix concurrentiel. Concernant le développement des hélicoptères, bien qu'évoluant dans un marché mature, les équipes de design développent les appareils selon une approche radicale, par rupture. Cette approche permet aux entreprises de positionner sur le marché des produits performants alors qu'une approche incrémentale permet à une entreprise de défendre ses parts du marché.

Aussi, jusqu'en 2008 les industriels ne remettaient pas en question la façon de concevoir un hélicoptère. Aujourd'hui le marché baisse et la concurrence se resserre. Pour un appel d'offre il y a désormais plus de constructeurs à même de se positionner. Enfin, la tendance où la performance primait sur le prix d'un appareil s'inverse, il faut désormais être plus agile et flexible dans sa manière de concevoir et de produire.

Il faut environ huit ans pour développer et positionner sur le marché un nouvel hélicoptère. Dans ce contexte très mouvant, Airbus aimerait réduire son temps de développement. En effet le temps de développer une machine, le marché peut avoir changé. Reprenons l'exemple du segment de l'O&G : un hélicoptère est en développement alors que la demande est importante. En 2015 alors que le développement est en cours le prix du baril a chuté et les constructeurs ont dû abandonner leur projet spécifique à ce segment. Nous pouvons prendre l'exemple du Bell 525 qui fut développé spécifiquement pour ce marché pour concurrencer le Sikorsky S92. Deux prototypes furent assemblés mais le programme n'a jamais trouvé de clients de lancement. Chez Airbus Helicopters, il s'agit du programme X6 qui fit l'objet d'un abandon après la chute du prix du baril. Avec une telle évolution du marché et de ses différents secteurs, le développement et la production doivent être plus agiles et doivent s'adapter aux variations du marché. Il y a un besoin de repenser la façon de concevoir un nouvel appareil, pour être plus rapide, plus agile et flexible.

Pour répondre à ce besoin de flexibilité, nos travaux de recherche visent à établir une connexion entre les modèles de données de produits obtenus depuis les systèmes de production existants et des outils de processus de conception amont. Obéissant ainsi aux objectifs d'optimisations de la conception en vue d'un assemblage en système de production flexible, les équipes de développement doivent avoir à disposition les spécificités du système de production lors des phases

amont du processus de conception. L'optimisation de cette interface entre dans le cadre du projet DDMS. Ce cadre vise à assurer la continuité digitale entre les différents process depuis les phases amont de conception, de l'industrialisation, la production et le support d'un nouveau produit. Une fois cette connexion établie, DDMS pourra assurer l'intégration de ces données et assurer la continuité digitale lors du développement de nouveaux produits.

La problématique industrielle issue de ce contexte est donc :

***Comment assister les équipes de développement à concevoir de manière optimisée des nouveaux appareils compatibles avec une ligne d'assemblage finale multi-modèles ?***

Dans la section suivante nous répondrons à cette problématique industrielle grâce à une analyse de l'état de l'art en étudiant les différents aspects du système de production et des processus de conception amont pouvant répondre à ce besoin de flexibilité. Ensuite, nous analyserons la gestion des connaissances pour optimiser les interfaces entre ces processus et systèmes de productions.

### 1.3. État de l'art

Dans cet état de l'art, nous analyserons les connaissances scientifiques disponibles en lien avec notre question de recherche : **Comment assister les équipes de développement à concevoir de manière optimisée des nouveaux appareils compatibles avec une ligne d'assemblage finale multi-modèles ?**

Une réponse hypothétique à cette question sera formulée à partir de l'état de l'art qui s'articule selon quatre parties (Figure 8) :

- La partie 1.3.1 revient sur les problématiques liées aux systèmes de production pour répondre au besoin de flexibilité dans les industries de fabrication. Nous verrons que la mise en place de systèmes d'assemblage multi-modèles est nécessaire dans de telles industries pour y répondre mais que sa mise en place nécessite des pratiques de conception avec des objectifs d'optimisation.

- Parallèlement, les processus de conception amont permettent aussi de gérer la flexibilité sur des produits ou une famille de produit. La partie 1.3.2 présente ainsi les différents processus permettant de combler ce besoin de flexibilité, ces approches entrent également dans le cadre d'un objectif d'optimisation. Nous verrons que la gestion des connaissances autour de la réutilisation de conception n'est pas formalisée dans l'industrie manufacturière.

- Dans la partie 1.3.3 la gestion des interfaces d'assemblage est étudiée pour assurer l'intégration des composants réutilisés en MMFAL. Nous étudierons les approches existantes pour définir et identifier les interfaces d'assemblage. Nous verrons que certaines approches comprenant un objectif d'optimisation peuvent contenir des méthodes de standardisation et d'identification d'interfaces mais que celles-ci sont difficilement adaptables à l'ensemble des industries manufacturières.

- Les constats des parties précédentes nous amènent à étudier comment mettre à disposition des objectifs d'optimisation à destination des équipes de développement. Dans la partie 1.3.4, nous nous pencherons sur une description théorique des règles de conception.

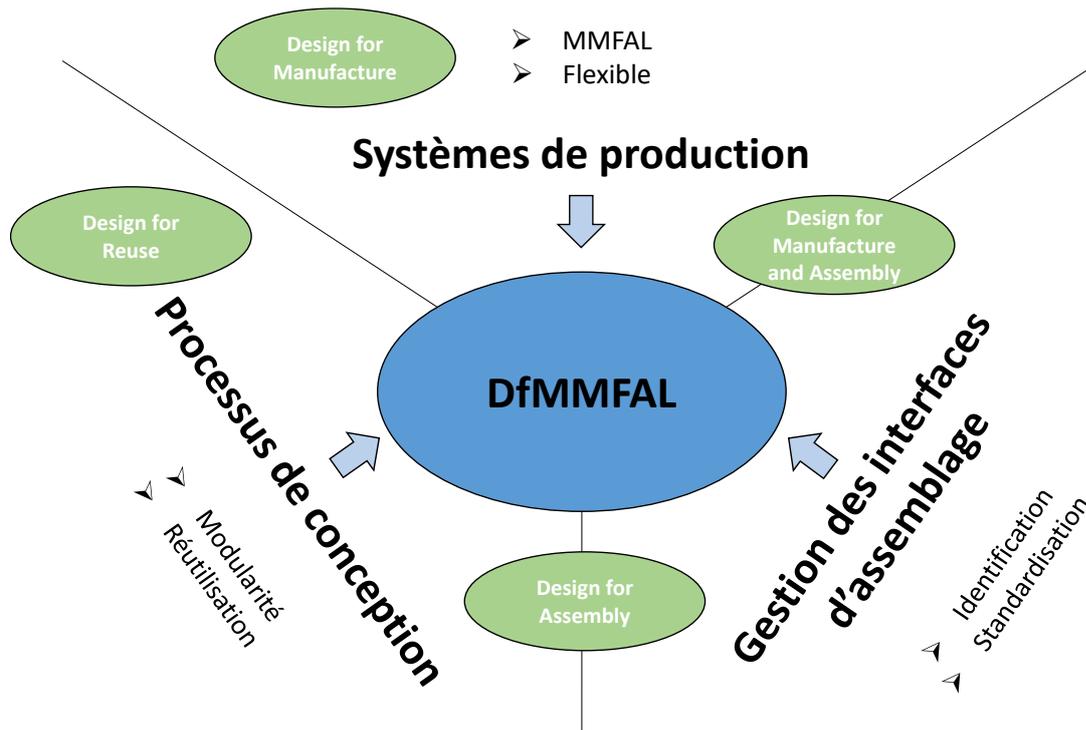


Figure 8 : Construction de l'état de l'art

### 1.3.1. Systèmes de production

Dans de nombreuses applications industrielles pratiques, un système de fabrication ou de production est généralement un ensemble de processus utilisant plusieurs postes ou sous-systèmes fonctionnels spécifiques qui conduisent à la création d'un nouveau bien (ou service) (Lin & Chang, 2013). Les lignes de production d'un processus de fabrication sont conçues pour exécuter le processus de production en utilisant une séquence spécifique de stations ou de sous-systèmes. Pour plus d'efficacité et de flexibilité, un processus de fabrication peut choisir d'utiliser plusieurs lignes de production (Chen & Lan, 2001).

Quatre types d'organisation des flux physiques existent dans l'industrie (Zanettin, 2018). L'organisation par projet est utilisée pour les chantiers navals ou le BTP ou encore la fabrication d'un prototype. Les ressources se déplacent autour d'un produit unique. Elle est conçue pour les très petites séries ou pour la production à l'unité et possède une grande flexibilité. La ligne d'assemblage en flux (ou Flowshop) est le flux physique conçu pour les grandes séries (production de masse) où la chaîne d'assemblage est dédiée à un produit avec un haut niveau d'automatisation et une productivité élevée. Cependant, la chaîne d'assemblage d'un produit est moins flexible et moins sensible aux défaillances. Le type de production par Process (ou Job-shop) est conçu pour les moyennes et petites séries et est organisé avec une grande flexibilité, un stock important pour la production par lots. L'équipement peut être automatisé mais pas le matériel de transfert. La gestion des flux est complexe et avec des problématiques d'ordonnancement. Enfin, la production en cellule est une production mixte en bloc et produisant à l'unité pour des séries de tailles moyennes. Polyvalente et flexible, le stock restant est

relativement faible et l'automatisation est possible mais complexe. La gestion des flux est plus facile s'il n'y a pas de transfert inter-cellules. (Figure 9) (Grabot, 2009; Lopez & Roubelat, 2001; Penn & Raviv, 2009).

Système de production	Représentation	Légendes	Exemples
Ligne d'assemblage en flux (Type Masse) Synchrones		$\Delta t = t_1 = t_2 = t_3 = t_4$	<ul style="list-style-type: none"> <li>Airbus - A380 / H160</li> <li>Industrie automobile</li> <li>Textile</li> <li>Electroménager</li> <li>Fast food</li> </ul>
Type Masse Asynchrone		$t_1 \neq t_2 \neq t_3 \neq t_4$	<ul style="list-style-type: none"> <li>Industrie informatique (smartphone / ordinateur)</li> </ul>
Type Process Job Shop		<ul style="list-style-type: none"> <li>Produit 1</li> <li>Produit 2</li> <li>Produit 3</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Semi-conducteurs</li> <li>Chimie</li> <li>Sidérurgie</li> <li>Pétrole</li> <li>Ciment</li> </ul>
Type Projet docks			<ul style="list-style-type: none"> <li>Prototypes</li> <li>BTP</li> <li>Usine</li> <li>Chantier naval</li> </ul>
Type Ateliers Cellules		<ul style="list-style-type: none"> <li>Atelier 1</li> <li>Atelier 2</li> <li>Produit 1</li> <li>Produit 2</li> <li>Produit 3</li> <li>Produit 3</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aéronautique</li> <li>Construction mécanique</li> <li>Machines-outils</li> </ul>

Figure 9 : Différentes méthodes de lignes d'assemblage

Différentes industries utilisent différents moyens d'organisation de production (White & Prybutok, 2001). La Figure 10 met en évidence le positionnement des différentes industries dans un schéma présentant les quatre types de systèmes de production. Elle nous montre que **le système de production de masse** (ligne d'assemblage en flux) est un modèle commun sur les chaînes d'assemblage finale notamment. Il s'agit du système de production qui consiste à fournir directement ou indirectement la masse aux consommateurs. Ainsi les industries types automobiles ou alimentaires y utilisent des procédés de fabrication automatisés en grandes séries. L'utilisation de composants standards, de méthodes de production formalisées et de cadences très élevées sont des solutions pour réduire les coûts d'achats et améliorer leur performance.

**Le système de production en process** consiste à produire, souvent des matières premières, grâce à des procédés de fabrications non modifiables. Ces systèmes dépendent donc des besoins du clients. Le procédé est souvent complètement automatisé, surveillé et actif en continu.

**Le système de production en projet** (ou dock) se retrouve lorsque les industries ont des besoins spécifiques et uniques, le procédé est non reproductible et l'atelier est polyvalent et évolutif. Il exige un niveau élevé de compétence et nécessite une grande adaptabilité dans l'usage de process de fabrication simple et standard.

**Le système de production en ateliers** (ou cellules) est dédié à la production en séries limitées et spécifiques. Le système est découpé en plusieurs ateliers spécialisés et homogènes. La fabrication peut être divisée en 2 temps :

- 1) Production des lots par procédés communs et stockage des encours.
- 2) Production par procédés personnalisés des encours.

Le choix de l'organisation du système de production est donc fonction du besoin du client, du volume et de la variabilité du produit à fabriquer.

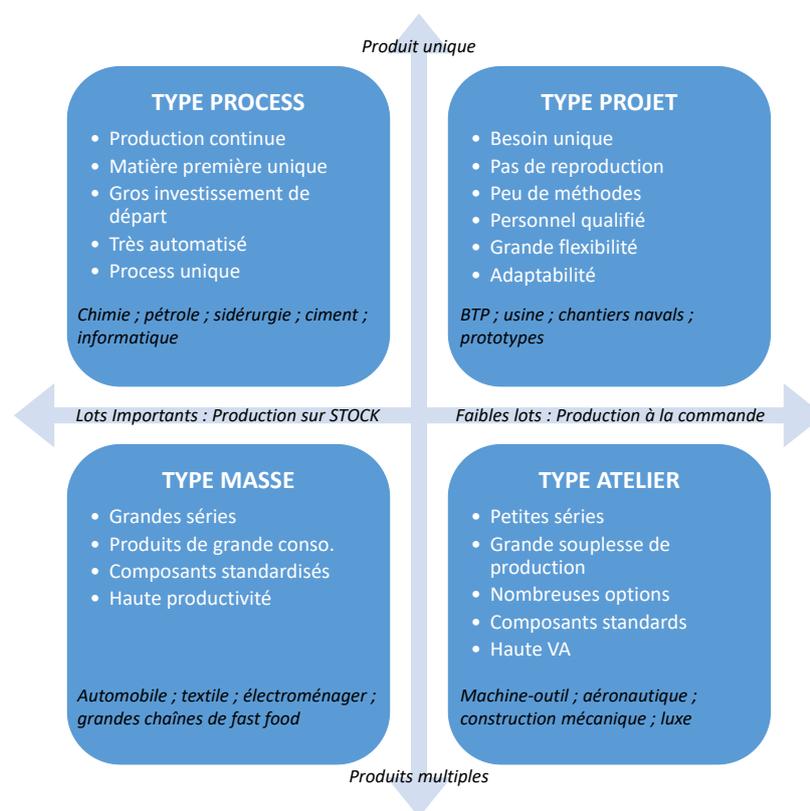


Figure 10 : Positionnement des industries selon l'organisation de production

L'assemblage final varie d'une entreprise à une autre ou, dans le cas de l'industrie aéronautique, d'un aéronef à un autre. Cela est principalement dû aux différentes stratégies de

marketing, capacités de fabrication et aux différentes technologies impliquées dans les produits et aéronefs. Il est par exemple possible de trouver des exemples de projets civils ou militaires modernes où des assemblages de sections majeures arrivent en lignes d'assemblage finales (FAL) avec certains systèmes installés par des fournisseurs (Menéndez et al., 2012). Plus généralement, les activités d'assemblage finale peuvent se résumer en assemblage des principales sections de la structure, en installation des systèmes qui ne sont pas adaptés à l'étape précédente et aux tests de l'aéronef en développement et complet (Airbus, 2014; Mas et al., 2013). La conception d'une FAL consiste à concevoir et attribuer les tâches d'assemblage du produit à différentes stations d'assemblage. Les deux principales FAL que l'on peut trouver dans l'industrie aéronautique sont l'assemblage par bloc et la flow-line (Baudin, 2002). La Figure 11 présente ces deux types d'assemblage.

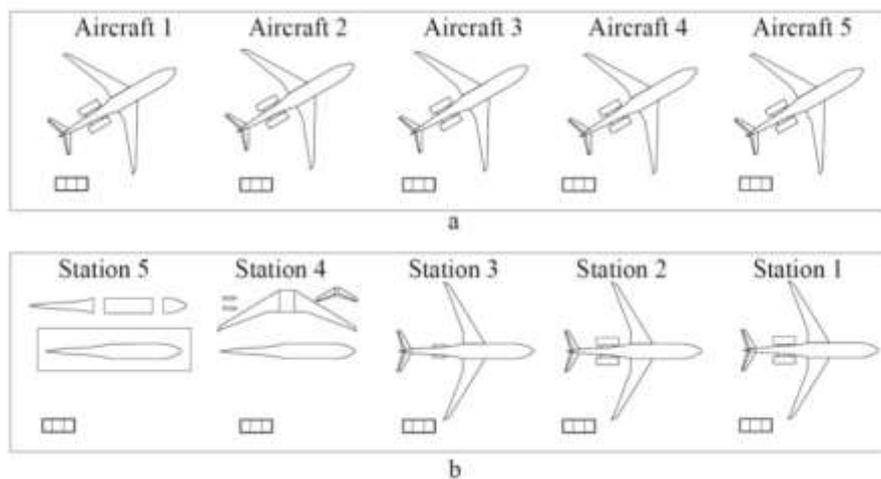


Figure 11 : Assemblage en ilots (a) Assemblage en Flow Line (b) (T. Li & Lockett, 2017)

Dans notre travail de recherche, nous supposons que la plupart des composants du système pouvant être accessibles après l'assemblage de la structure sont intégrés en FAL. La Flow-Line consiste en une chaîne pulsée, mobile et continue, elle favorise la réduction des en-cours et est largement utilisée dans les FAL aujourd'hui. La Figure 11(b) est une flow-line pulsée typique des FAL organisée par station. Chaque station possède le même temps de cycle appelé '*Takt-time*'. Une flow-line continue peut être considérée comme une chaîne pulsée avec de nombreuses stations à *takt* court.

Dans le processus de conception d'une FAL, la disposition et les tâches d'assemblage sont conçues au début dès les phases amont de conception du produit qui y sera assemblé. Dans l'aéronautique, l'aéronef est considéré lui-même comme un produit complexe de haut niveau et sa structure est, elle, considérée comme un sous-système à partir duquel d'autres sous-systèmes viennent s'intégrer ultérieurement. Dès lors, les principales activités d'allocation des tâches en FAL consistent à décider de l'interface entre le travail d'intégration des différentes stations. Une compréhension approfondie des fonctions et des systèmes de l'aéronef est importante pour la conception d'une FAL. Cependant, cela dépend fortement de la gestion des connaissances et de l'expérience des équipes de

développement. Il est nécessaire de comprendre pleinement les complexités du système. Ainsi, combiner les fonctions et les interactions des systèmes avec la structure de l'aéronef et les processus d'assemblage permet de déterminer la meilleure séquence d'intégration des composants des systèmes dans la structure.

### *Mixed Model Final Assembly Line (MMFAL)*

Les lignes d'assemblage où plus d'un produit ou modèle est fabriqué sont appelées lignes d'assemblage à modèles mixtes (MMFAL). Les modèles produits sur des lignes d'assemblage à modèles mixtes peuvent différer les uns des autres en ce qui concerne la taille, la couleur, le matériel ou l'équipement utilisé, de sorte que leur production exige des tâches, des durées de tâches et/ou des relations de préséance différentes. Dans une MMFAL, le temps de préparation est nul entre les modèles différents, et les unités successives qui descendent la ligne peuvent être destinées à des produits ou des modèles différents (Baudin, 2004). Cela permettrait aux entreprises manufacturières de produire une variété de produits différents dans un processus continu (Rekiek et al., 2000).

Sur le marché actuel, les clients exigent une grande variété de produits et des délais de livraison courts. La personnalisation de masse a aujourd'hui été reconnue comme un nouveau paradigme de fabrication de produits individualisés à un coût de production de masse (Zhu et al., 2006). En conséquence de ce changement, les systèmes d'assemblage doivent être conçus pour répondre aux besoins des clients tout en assurant la qualité et la productivité de la production de masse.

L'objectif est d'absorber les fluctuations commerciales multi-modèles tout en maintenant un volume de production suffisant sur les lignes pour rester efficace. L'industrie aéronautique produit déjà différents modèles d'un même produit pour avoir une plus grande variété. Ces différents modèles nécessitent des temps de traitement différents lors du processus d'assemblage. Les différentes lignes d'assemblage devraient assembler des modèles nécessitant un temps de traitement différent. Cependant, le fait de disposer de plusieurs chaînes de montage dédiées à un seul produit peut ne pas se justifier économiquement pour les industriels. Le modèle mixte représente généralement un environnement de fabrication avec un degré élevé de variation et l'assemblage de plusieurs types de produits sur la même chaîne. « *L'assemblage en modèle mixte est la capacité d'assembler une famille de produits qui partagent des processus similaires, un contenu de travail similaire et des composants similaires, sur la même ligne de production, avec une productivité élevée, une qualité élevée et une grande flexibilité* » (R. Rahn, 2016). Au fur et à mesure que la variété augmente, les opérations d'assemblage peuvent devenir plus complexes (S. J. Hu et al., 2008) et, en raison de la complexité des MMFALs, le plein potentiel de ces systèmes de production ne semble pas être pleinement réalisé ou étudié. La conception des systèmes de production tels que les FAL est désormais entreprises en même temps que la conception du produit, c'est le Concurrent Engineering (Co-Engineering - CE). Le

principe DfMA (Design for Manufacturing Assembly) suggère que la planification de l'assemblage doit être prise en compte dans les phases les plus en amont du processus de conception (Boothroyd et al., 2010). Au début de la phase de conception de la FAL, l'un des enjeux est de savoir comment accéder aux informations de conception déjà disponibles pour générer les solutions et la planification de l'assemblage du produit. Ainsi, formaliser les connaissances et informations provenant d'aéronefs historiquement partageant la même FAL, Mixed-Model FAL ou MMFAL) permettrait de mettre à disposition un ensemble de principes réutilisables lors des phases amont de conception pour produire de nouveaux aéronefs compatibles avec une MMFAL. C'est le principe du DfMMFAL.

### *Défis abordés autour de la MMFAL*

Les principaux défis liés aux MMFALS, tels que reflétés dans la recherche, se concentrent principalement sur les problèmes d'équilibrage et de séquençage pour la conception et le développement de ces lignes (Dolgui & Kovalev, 2012; Noorul Haq et al., 2006; Vilarinho & Simaria, 2002). La majorité de la recherche est basée sur la suggestion d'algorithmes mathématiques pour des cas particuliers et ne se concentre pas sur les applications pratiques dans l'industrie (Y. Li et al., 2022; Meng et al., 2022; Schlüter & Ostermeier, 2022). Malgré d'importants efforts universitaires dans le domaine de l'équilibrage et du séquençage des chaînes de montage, les algorithmes mathématiques n'ont pas été utilisés que par un faible pourcentage d'entreprise dans les années 1970 et 1980, et cet écart s'est même creusé dans les années 2000 (Boysen et al., 2007).

Dans la pratique la complexité des MMFALS ne tournent pas seulement autour de la conception et du développement de ces systèmes de production, mais concernent également la conception de produits assemblés en MMFALS en tant qu'aspect important de leur mise en place. Les systèmes de production, en particulier les lignes d'assemblage, représentent des investissements importants dans les machines-outils, les unités de manutention et les contrôleurs ; il est donc souhaitable d'avoir des conceptions de produits qui utilisent au mieux les capacités des systèmes de fabrication (ElMaraghy & Abbas, 2015). Étant donné que plus de 70% des coûts du produit final sont déterminés pendant la conception, les informations et les exigences relatifs aux opérations d'assemblage sont nécessaires pour déterminer les exigences de gestion du cycle de vie du produit et devraient être prises en compte dès les phases amonts de conception à l'aide du CE (Demoly et al., 2012; Yang et al., 2000).

### *Design for X (DfX)*

Le fait de ne pas consacrer suffisamment de temps à l'ingénierie d'un nouveau produit peut facilement entraîner une augmentation de la complexité lors des dernières étapes du projet. Il est plus efficace, en termes de temps et d'argent, de prendre le temps de considérer les différents aspects d'un projet avant qu'il ne quitte la salle de dessin. C'est là qu'intervient la conception pour l'excellence

(aussi appelée « conception pour X » ou « Design for X » [DfX]). L'expression « conception pour X » a fait son apparition à la conférence Keys en 1990 et dans le journal *AT&T Technological* (Gatenby & Foo, 1990). L'idéologie du DfX permet de construire des produits sans qu'il soit nécessaire d'y apporter des modifications à des stades ultérieurs car ses différents domaines prennent en compte bon nombre des aspects les plus cruciaux dès la phase amont de conception.

Le DfX est une pratique dans laquelle X représente **un objectif d'optimisation** pour garantir qu'une caractéristique, une fonction ou un critère de qualité particulier se reflète dans la conception finale. Le terme « X » peut faire référence à des caractéristiques de performance telles que la fonctionnalité, la fabricabilité, la facilité d'entretien, la maintenance, l'impact environnemental et la facilité d'utilisation (Tranquillo et al., 2023).

Lorsqu'une conception est facile à fabriquer, le résultat est un meilleur produit qui coûte moins cher. Les concepteurs expérimentés comprennent et utilisent la connaissance des processus pour améliorer la conception des pièces, des assemblages et des produits entiers. La famille des techniques de DfX a été développée pour capturer les connaissances des experts, donnant aux concepteurs des directives pour l'analyse et la reconception. La conception pour l'assemblage (Design for Assembly - DfA) et la conception pour la fabrication (Design for Manufacturing - DfM ; parfois appelée Design for Manufacture and Assembly - DfMA) sont les deux plus populaires (Figure 12).

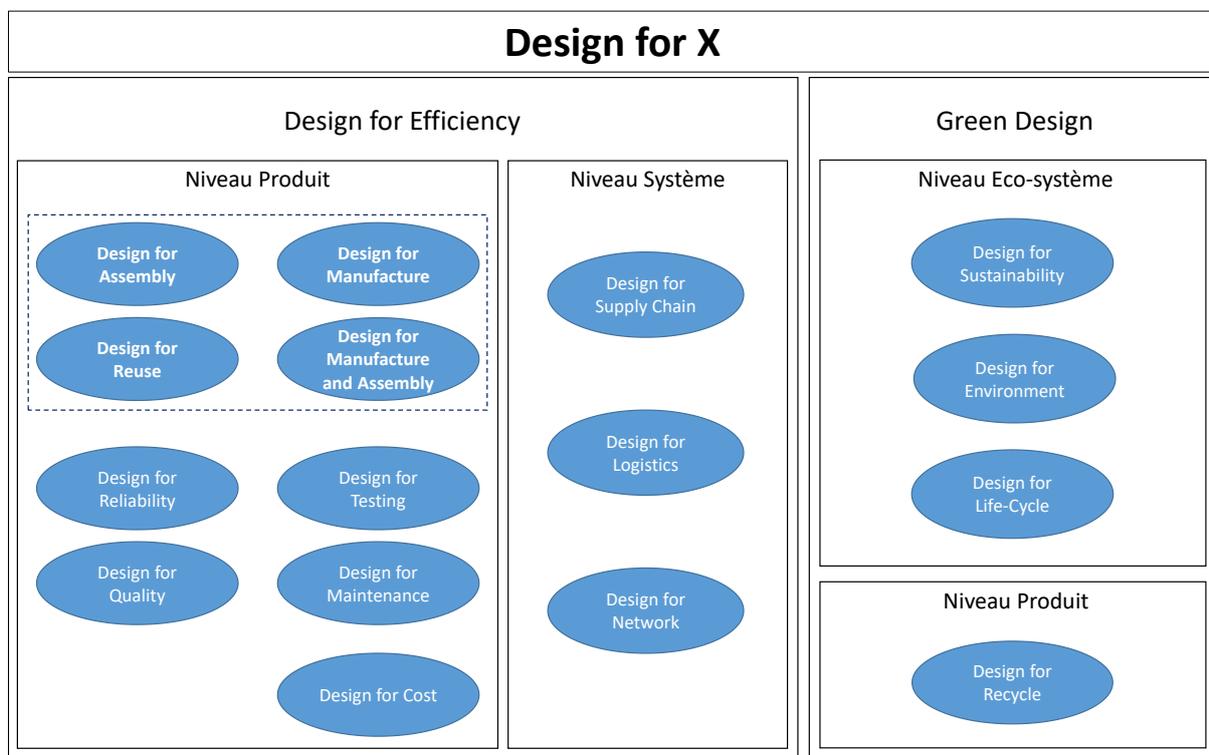


Figure 12 : Structure du Design for « X » (Chiu et al., 2023)

Le DfX fournit des bonnes pratiques et des lignes directrices en matière de conception afin de garantir que les méthodes de conception et de fabrication sont correctes dès la première fois. Tout cela est fait avant même que le produit n'atteigne l'atelier. Les concepteurs de produits qui utilisent les méthodes de DfX ajouteront du temps au processus de conception, mais réduiront le temps consacré à la conception de la fabrication et aux problèmes de production (Jack, 2013).

### *Design for Assembly (DfA)*

La conception pour l'assemblage (**Design for Assembly**, ou **DfA**), qui fait partie de la famille DfX, consiste à optimiser le produit et le processus d'assemblage. Le DfA simplifie la structure du produit en réduisant le nombre de composants et en minimisant le nombre d'opérations d'assemblage nécessaires. L'objectif est de rendre le processus de fabrication plus facile, plus rapide et plus cohérent, donc plus productif (Kent, 2016; Swift & Booker, 2003).

Bien que diverses méthodologies techniques de DfA aient été largement discutées au cours des dernières décennies, elles ne répondent pas directement aux défis récents de l'alignement de la conception du produit avec les exigences d'une MMFAL. Dans les techniques DfA les plus couramment utilisées, la facilité d'assemblage, le coût et le temps d'assemblage sont au centre des préoccupations (Boothroyd et al., 2010). Cependant, comme la plupart des techniques DfA ont été développées pour un seul produit (Emmatty & Sarmah, 2012), les exigences des systèmes d'assemblage pour créer une variété de produits et les complexités qui y sont liées, comme dans une MMFAL, ne sont pas pris en compte dans les techniques de DfA. En pratique, **en l'absence d'approches appropriées de conception de produits orientées vers l'assemblage**, l'augmentation de la similarité entre les opérations d'assemblage pour une gamme de produits différents et issus de familles de produits distinctes et, par conséquent, la présentation précoce des exigences d'une MMFAL pour la conception de produits **devient une tâche difficile**. Un besoin de modèle de description basé sur l'architecture des produits pour aborder la complexité des MMFALs dans les entreprises de fabrication existe (Asadi et al., 2017). De plus, afin de développer des produits respectant les critères d'assemblage requis par l'industrie, il est nécessaire d'utiliser des directives ou techniques de conception spécifiques (Swift & Booker, 2013).

### *Design for Manufacture (DfM)*

La conception pour la fabrication (**Design for Manufacturing**, ou **DfM**) se concentre sur la sélection des matériaux et les processus de fabrication. Le DfM est une technique de conception de produits qui vise à créer une meilleure conception à moindre coût en optimisant la sélection des matériaux et des processus de fabrication. En suivant ces directives, le produit final devrait être plus facile à fabriquer et la production devrait prendre moins de temps par rapport à la conception initiale (Bayoumi, 2000; Ogrodnik, 2020).

### *Design for Manufacture and Assembly (DfMA)*

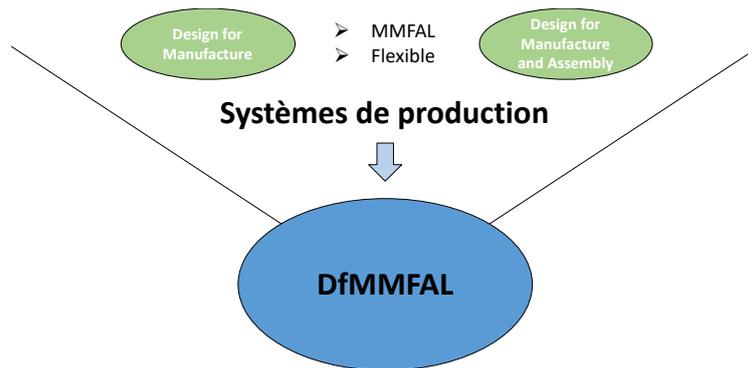
La conception pour la fabrication et l'assemblage (**DfMA**) représente une combinaison harmonieuse de la DfM et de la DfA. Il s'agit d'une méthodologie d'ingénierie qui se concentre sur l'optimisation des aspects de fabrication et d'assemblage d'un produit. Ces deux aspects ont un impact important sur la qualité et le coût du produit final (Huang et al., 1999).

Le DfMA prend en compte les problèmes de fabrication dès le début de la conception d'un produit afin de raccourcir son temps de développement et d'assurer une transition en douceur vers la fabrication, ce qui accélère la mise sur le marché. Aussi, cette technique permet de réduire les coûts puisque les produits peuvent être assemblés rapidement à partir d'un nombre réduit de pièces standard. Les pièces sont conçues pour être faciles à fabriquer et avoir des points communs avec d'autres modèles. Cela signifie qu'il est possible de créer une gamme de produits plus large en assemblant des modules de base communs dans de nouveaux produits (Bayoumi, 2000).

La littérature présente plusieurs types de systèmes de production utilisés dans les industries manufacturières. Parmi ces systèmes, les **MMFAL** sont les plus **adaptées** pour répondre aux besoins de **flexibilité** et aux exigences du client.

Pour mieux adresser ces contraintes, certaines pratiques **du DfX** adressent des **objectifs d'optimisation de la conception** en vue de processus d'**assemblage** prédéfinis. Ces principes visent à prévoir dès les **phases amont de conception** d'un nouveau produit la planification de son assemblage sur **le système de production**.

Les **besoins de flexibilité** et de **maintien d'un volume de production** donné pour rester compétitif dans un marché concurrentiel tournent les industries vers un **système de production à modèles mixte (MMFAL)**. Cependant aucune pratique de conception (DfMMFAL) ne semble, à notre connaissance, formaliser des objectifs de design en vue d'une MMFAL (voir Figure 13).



*Figure 13 : Résumé de l'étude de l'état de l'art autour de la flexibilité d'un système de production*

La deuxième partie de notre état de l'art explore comment les processus de conception amont, à travers l'architecture produit tente de répondre au besoin de modèle spécifiques pour répondre à la complexité de l'assemblage en MMFAL.

### 1.3.2. Processus de conception amont

L'architecture du produit, la modularité du produit et la similarité font partie des différentes approches permettant de gérer efficacement la variété de produits sur un système de production (ElMaraghy et al., 2013). L'architecture de produit est l'affectation des éléments fonctionnels d'un produit aux blocs de construction physiques du produit (K. T. Ulrich & Eppinger, 2012). L'objectif de l'architecture produit est de définir les blocs de constructions physiques de base du produit en termes de fonctions et de spécifier leurs interfaces avec le reste du produit (Fixson, 2007; K. T. Ulrich & Eppinger, 2012).

Trois aspects décrivent l'architecture de produit (Bruun & Mortensen, 2012) :

- **la décomposition** : une architecture est la décomposition d'un produit en sous-systèmes (modules) ;
- **l'agencement** : une architecture décrite l'agencement relatif de ces sous-systèmes (modules) ;
- **les interfaces** : une architecture décrit les relations (interfaces) entre ces sous-systèmes (modules) et avec son milieu environnant.

Les effets par lesquels les caractéristiques de l'architecture du produit, telles que la modularité et la communalité, peuvent réduire les coûts sont généralement la réduction de la complexité du processus, l'augmentation des économies d'échelle et la mise en commun des risques (Fixson, 2007). Selon Fixson, ces effets peuvent varier entre et au sein de différentes activités telles que la conception, la fabrication, la Supply Chain et l'utilisation (Fixson, 2007). Le développement de modèles d'architecture de produit affecte également la communication inter-organisationnelle. L'approche consistant à développer des produits complexes ou des familles entières de produits peut être soutenue par l'utilisation de modèles d'architecture de produit dans lesquels les descriptions de haut niveau améliorent la communication et la coopération multidisciplinaire (Bruun & Mortensen, 2012).

Diverses approches sont utilisées pour modéliser l'architecture des produits. Parmi ces approches bien connues figurent la Design Structure Matrix (DSM), le Plan Directeur de la Famille de Produit (PFMP), la nomenclature (Bill of Material – BoM), les structures fonctionnelles, l'arbre de décisions et le déploiement fonctionnel modulaire (MFD). Toutefois, ces approches présentent certaines lacunes dans la présentation de l'architecture du produit (Asadi et al., 2017). Par exemple, la PFMP et la BoM n'ont pas de lien direct avec la fabrication et la chaîne d'approvisionnement, le DSM ne peut pas être utilisé comme un outil entièrement visuel, et les arbres de décision sont considérés davantage comme des méthodes de configuration de produits que comme des véritables descriptions d'architecture. Cette complexité nécessite la gestion de plusieurs variantes de produits dans la même architecture de produit (Brière-Côté et al., 2010), mais aussi la décomposition de cette architecture de

produit en un ensemble d'éléments élémentaires pour gérer facilement la configuration des solutions de demande.

Dans le processus de conception amont, afin de gérer la complexité, les systèmes ou les produits sont souvent décomposés en sous-systèmes ou parties. L'architecture de produit est l'une des décisions amont de conception qui a le plus d'impact sur la capacité d'une entreprise à fournir efficacement une grande variété de produits (K. T. Ulrich & Eppinger, 2012). Étant donné que l'architecture du produit contraint de cette manière les décisions ultérieures de conception détaillées, l'équipe de développement doit tenir compte des implications de l'architecture du produit sur le système de production (K. T. Ulrich & Eppinger, 2012). Le développement d'une architecture de produit a des impacts sur différents aspects au sein d'une entreprise. Le concept de modularité semble proposer des avantages pertinents pour faire face à cette problématique.

La section suivante traite des avantages du concept de modularité pour soutenir la propagation des exigences d'un système de production mixte tout au long du processus de conception jusqu'à l'étape d'assemblage avec le concept de modularité.

### *Concept de Modularité*

La conception modulaire semble être appropriée pour répondre au problème de gestion de la variabilité des produits dans les systèmes de production. Dans la théorie de la conception modulaire (Hubka & Eder, 1988), le concept de module est utilisé pour représenter un regroupement physique ou conceptuel de composants de produits pour former une unité cohérente qui peut être facilement identifiée et remplacée.

Introduit dans les années 1990, un produit de conception modulaire est décomposé en différentes parties, sous-ensembles ou modules (K. Ulrich, 1995). La modularité est le concept de décomposition d'un système en parties indépendantes (modules) qui peuvent être traitées comme des unités logiques (Belkadi et al., 2016; Hubka & Eder, 1988). Sur cette base, le processus de conception modulaire vise à connecter les éléments de construction en groupes appropriés à partir desquels de nombreuses variantes de produits peuvent être assemblés. Il a également été dit que les produits modulaires permettent de mieux répondre aux changements du marché (Erixon, 1998; Harlou, 2006) et d'adapter les produits aux besoins du client (Juuti, 2008).

En tant que résultat de ce processus de conception, une Architecture de Produit Générique (GPA) peut permettre de réduire les coûts et d'introduire plus rapidement de multiples variantes de produits, grâce au concept de famille de produit (Erens & Verhulst, 1997). Pahl et Beitz (1996) ont proposé de connecter le concept de modules comme une implémentation physique d'une fonction du produit, qui répond à la façon dont le produit répondra à un ensemble de besoins du client. La connexion des modules aux fonctions évite toute erreur sur l'identification des frontières des modules

dans une architecture de produit. Elle permet également de classer les modules en fonction des types de fonctions (de base, auxiliaire, spéciale et adaptative). Plus tard, des critères supplémentaires sont développées pour la définition des modules, tels que l'importance, la complexité, la combinaison, l'application, etc.

La littérature offre diverses approches et définitions. Cependant, trois caractéristiques principales de la modularité apparaissent (Schuh et al., 2014) :

- un module est **séparable** du reste du produit ;
- un module est **isolable** ;
- un module est **recombinable** avec d'autres composants.

L'architecture du produit décrit la manière dont les fonctions du produit sont organisées en unités physiques et la manière dont ces unités interagissent pour mettre en œuvre ces fonctions (K. T. Ulrich & Eppinger, 2006). Dans l'industrie des hélicoptères, les produits sont désormais conçus selon une approche modulaire (Buergin et al., 2018). L'appareil est divisé en quatre modules appelés Major Component Assembly (MCA), comme le montre la Figure 14. Cela représente le premier niveau de granularité. Chacun d'eux comprend plusieurs Constituent Assembly (CA) comme deuxième niveau. Le troisième niveau est l'Assembly Level (A), et le suivant est Elements (E).

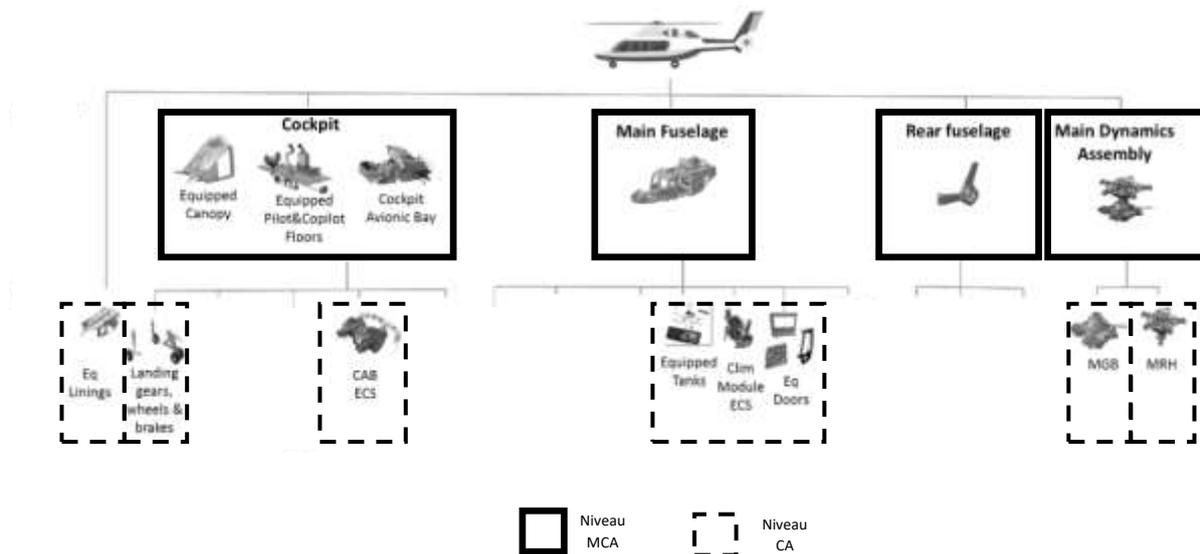


Figure 14 : Découpage modulaire d'un hélicoptère, le premier niveau de granularité est détaillé

Le GPA peut être utilisé en utilisant plusieurs méthodes (Bruun, 2015; Du et al., 2003; Sosa et al., 2004). Cependant, les idées fondamentales sont communes : décomposer les systèmes en modules discrets ; assurer l'interchangeabilité des modules avec d'autres ; et fournir des interfaces bien définies

entre les modules dans la GPA ciblée. Ainsi, la modularisation consiste à décider des caractéristiques utilisées pour regrouper des composants distincts dans un module commun.

Suivant l'approche modulaire, toute architecture de produit est composée d'un ensemble de modules de base qui ne sont pas modifiés (invariables) et de modules flexibles (variables) qui peuvent être remplacés par d'autres modules assurant la même fonction. Le degré de modularité d'un produit se réfère à la proportion de modules ayant un niveau élevé d'interchangeabilité pour la même fonction (Miller & Elgård, 1988), permettant la possibilité de dériver plusieurs alternatives d'architectures à partir d'un cadre de produit commun.

En effet, les recherches montrent que la conception modulaire augmente la compétitivité de l'entreprise en ayant un impact sur la capacité de production, la réduction des coûts, la qualité et également l'amélioration du support, la flexibilité et le délai de livraison (G. F. Barbosa et al., 2014) (Favi & Germani, 2012). Le niveau de modularité des produits pour soutenir la flexibilité des lignes d'assemblage a été identifié comme un défi fondamental qui doit être résolu (Asadi et al., 2019). La prise en compte de la modularité dans les produits ne se limite pas aux produits personnalisables en masse. Les avantages de la modularité sont également intéressants pour les entreprises dont les produits avec beaucoup de complexité. Dans ce cas, le défi consiste à trouver une combinaison appropriée pour accroître la communalité sans perdre la flexibilité du système d'assemblage lorsqu'elle apporte une valeur significative au client (Pakkanen et al., 2022).

### *Design for Reuse (DfR)*

Dans certaines industries avec un haut niveau de complexité, des produits personnalisés et de faibles volumes de production, il y a une volonté d'étudier la conception pour la réutilisation (Design for Reuse - DfR) à des couches de granularité élevées (Thomas et al., 2015 ; Moir & Seabridge, 2011). Le DfR consiste à rendre un module, un composant ou toute partie de la conception d'un produit réutilisable et disponible en stockant les parties réutilisées dans une bibliothèque appropriée pour les retrouver (Baxter et al., 2007).

Deux catégories principales sont étudiées dans la littérature :

- **la conception pour la réutilisation (DfR) :** la conception pour la réutilisation permet la conception de connaissances réutilisables possibles, comme le montre la Figure 15. Elle fournit une bibliothèque de réutilisation pour stocker les connaissances réutilisables. Aussi, elle nécessite l'identification, la rationalisation, l'extraction et le stockage de fragments réutilisables de domaines de conception spécifiques basés sur des connaissances concernant des conceptions ou des artefacts antérieurs (Duffy & Ferns, 1998).

- **la conception par la réutilisation (Design by Reuse) :** la conception par réutilisation signifie l'utilisation de parties de produits existants dans de nouvelles situations de conception, comme le montre la Figure 15.

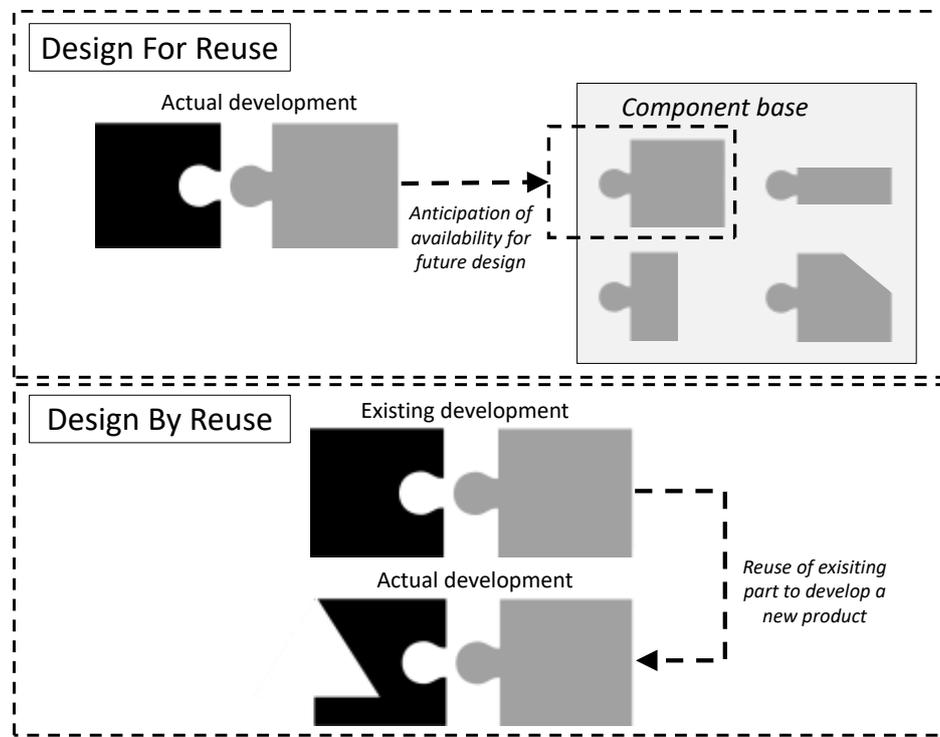


Figure 15 : Définition du Design For Reuse et Design By Reuse

Dans un contexte de modularisation, la réutilisation de la conception est une solution pour améliorer la productivité et la flexibilité (Pulkkinen, 2007). Elle permet également aux clients d'avoir accès à des variantes de produits spécifiques (Pakkanen et al., 2015). Pakkanen (2016) montrent qu'un type d'industrie similaire à l'industrie navale, qui fabrique des produits spécifiques aux clients pour des marchés mondiaux aux besoins différents et changeants, voit des avantages avec la réutilisation de la conception dans l'ingénierie et la sous-traitance. Dans cette étude, les auteurs expliquent que la réutilisation des modules peut avoir un impact sur les économies de coûts d'environ 15 à 30%, et le temps nécessaire à l'ingénierie mécanique peut diminuer de 75% dans certaines zones du produit.

### *Gestion des connaissances et Design Reuse*

Le Design Reuse est un processus qui consiste à réutiliser des solutions, concepts, composants, modules et interfaces existants dans lors de la conception de nouveaux produits. La prise de décision au cours du processus de conception est complexe et les résultats qui en découlent affectent de manière significative la solution de design et l'activité globale (Hansen & Andreasen, 2004). Le Design Reuse permet de familiariser les équipes de production avec la conception de produit et ainsi

assurer la remontée d'information sur l'état actuel des composants d'un produit vers les équipes de conception (Busby, 1999; Siddique & Repphun, 2001).

En termes de conception, la gestion des connaissances est un aspect également important quand il s'agit de flexibilité et de Design Reuse. La plupart des connaissances sur les produits existent dans l'expérience des concepteurs et n'est jamais formalisée. La clé de l'innovation en termes de gestion des connaissances réside dans la manière d'obtenir les connaissances requises précisément dans une base de données. L'acquisition, la représentation, l'analyse et la décision ou utilisation des connaissances peuvent être considérées comme faisant partie du processus de conception. À ce sujet, la littérature offre une exploration des principes de conception à travers la gestion des connaissances. Des générations d'outils Design Rational Editor (Dred) permettent de capturer et de communiquer de manière formelle les questions à poser pour décider de la réutilisation d'un composant ou d'un autre, et, toutes options envisagées présentent les arguments pour ou contre (R. Bracewell et al., 2009 ; R. H. Bracewell & Wallace, 2003). Il devient alors possible d'utiliser ces graphiques lors des tâches de conception. Les ontologies, qui structurent les éléments de connaissance spécifiques, ont également été abordées comme moyens de représenter l'information pour la décision de réutilisation de composants (Moon et al., 2010). Plus récemment, la littérature s'est portée sur l'acquisition, la sélection et la formalisation des connaissances grâce à un modèle de gestion des connaissances orienté vers les exigences du consommateur (Zhong et al., 2022).

La littérature présente aussi l'ontologie comme un moyen d'analyser les connaissances. C'est une étape importante dans les systèmes de management de la connaissance et plusieurs outils ont été développés en centrant leur système sur l'analyse de la connaissance de conception (Jelokhani-Niaraki, 2018). L'indexation de la connaissance traite aussi de cette analyse (Ahmed, 2005).

Enfin, dans le domaine de la conception industrielle l'ontologie propose également des approches pour aider le concepteur à concevoir une variété de produit à partir d'une famille de produit (Moon et al., 2010). Les cartes de connaissance se présentent également comme une approche facilitant la prise de décision (Zhong et al., 2022).

Tableau 3 : Revue de littérature sur la gestion de connaissance de conception

	<b>Auteurs</b>	<b>Approches/Application</b>	<b>Avantages/Désavantages</b>
Acquisition des connaissances	Bracewell et Wallace, 2013	Graphique facile d'utilisation représentant les problèmes, arguments et décisions rencontrés lors du design d'un composant	Facile d'utilisation mais utiliser lors de la conception en vue d'un futur développement
	Zhong et al., 2022	Carte de connaissance et Ingénierie Kansei	Prise en compte des exigences du consommateur dans la formalisation des connaissances.
Représentation de la connaissance	Moon et al., 2010	Basée sur l'ontologie pour synthétiser une plateforme de modules communs	Peut aider le concepteur à concevoir une variété de produits à partir d'une famille de produit N'est pas étendu à la conception de produits
	Bracewell et Wallace, 2013	Graphique facile d'utilisation représentant les problèmes, arguments et décisions rencontrés lors du design d'un composant	Facile d'utilisation mais utilisée lors de la conception en vue d'un futur développement
Analyse de la connaissance	Ahmed, 2005	Indexation des connaissances en conception	Développement d'une méthode d'indexation pour encourager la réutilisation de l'information
	Jelokhani-Niaraki, 2018	Basée sur l'ontologie pour analyser les connaissances	Méthode d'évaluation des quantitative plus compliquée que la méthode qualitative
Décisions à partir de la connaissance	Moon et al., 2010	Basée sur l'ontologie pour décider à partir des connaissance	Peut aider le concepteur à concevoir une variété de produits à partir d'une famille de produit N'est pas étendu à la conception de produits
	Zhong et al., 2022	Carte de connaissance et Ingénierie Kansei	Les exigences du consommateur orientent la formalisation des connaissances.

Le Tableau 3 présente un résumé des approches de la littérature à propos de la gestion de la connaissance. Le principal travail de la gestion des connaissances est d'extraire les connaissances disponibles pour une entreprise et les organiser pour réaliser une prise de décision. Il consiste également en une utilisation complète de ces connaissances dans le but de réaliser les objectifs d'optimisation et la valeur ajoutée de l'entreprise. La formalisation de la connaissance issue de conceptions déjà existantes est une étape clé pour détecter les solutions mises en œuvre et les bonnes pratiques existantes. De sorte, la mise à disposition de cette formalisation sous forme de règles aux équipes de développement permettrait de répondre à un objectif d'optimisation du design.

Pourtant, il n’y a pas de consensus sur la meilleure approche pour soutenir les activités des équipes de développement dans le processus de conception en vue de remplir des contraintes centrées sur les systèmes de production à assemblage multi-modèle.

### *Synthèse de l’état de l’art sur les processus de conception amont*

Les outils développés doivent s’adapter naturellement aux méthodes de travail des concepteurs et tenir compte des spécificités des projets complexes des industries en question. Aussi, la réutilisation exige une compréhension de ces spécificités de l’industrie et du produit (Baxter et al., 2007).

Cela représente un **défi supplémentaire** dans le choix de **la réutilisation de composants** lors de **la conception des systèmes modulaires**. La **compréhension** et la **connaissance** jouent alors un **rôle clé** dans le choix de la réutilisation de composants et les outils ne peuvent être adressés sans l’apport d’une telle compréhension des spécificités de l’industrie et de la connaissance des **développements passés**.

Enfin cette connaissance, nécessite d’être formalisée sous forme d’objectif d’optimisation. Les pratiques issues de cette formalisation ne permettent pas aujourd’hui de formaliser des connaissances à destination des équipes de développement pour une conception en vue d’un assemblage en MMFAL (voir Figure 16).

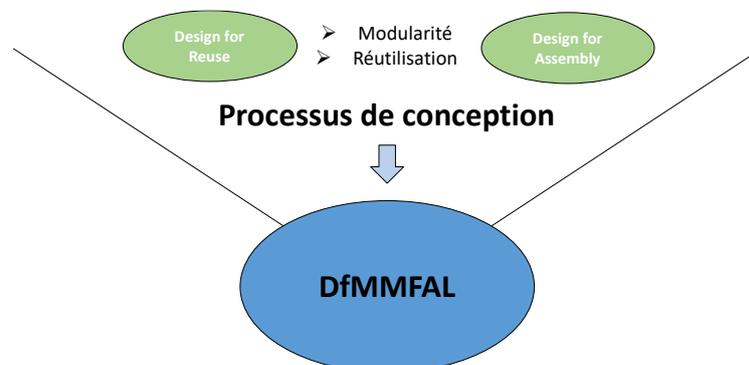


Figure 16 : Résumé des processus de conception amont

Dans la section 1.3.3 de notre état de l’art, nous étudions la gestion des interfaces à travers notamment leur standardisation et leur identification.

### 1.3.3. Gestion des Interfaces d'assemblage

Pour parvenir à une conception optimale utilisant la réutilisation dans une conception modulaire, de nombreuses études se sont concentrées sur la détermination de la meilleure façon d'allouer et de partager des composants réutilisés entre différents produits (Lima & Kubota, 2022; Rötzer et al., 2021; Zhang et al., 2022). Lorsqu'il s'agit de déterminer la conception optimale avec une conception de réutilisation, la notion d'interfaces d'assemblage est souvent considérée pour intégrer ces composants réutilisés. L'interface qui relie les composants à un sous-ensemble ou à la structure du produit est l'un des cinq concepts clés de l'ingénierie à prendre en compte pour concevoir une famille de produits modulaires (Pakkanen et al., 2016). Les interfaces standardisées réduisent la quantité d'échanges d'informations nécessaires pour répondre aux exigences et à la conception du produit (Baldwin & Clark, 2000; Karhu et al., 2018).

Dans certaines industries, les produits d'un marché donné sont développés une fois toutes les quelques décennies. Le concept de réutilisation de conceptions d'un produit existant pour un produit plus récent est difficile à appliquer en raison par exemple de l'évolution de la technologie, des différences dans l'architecture des produits et d'autres contraintes de développement. Le problème des interfaces d'assemblage sur une famille de produits modulaires est donc un critère important pour assurer l'assemblage de deux produits différents (Asadi et al., 2019). Si la réponse au problème de gestion des interfaces est principalement fournie par les outils de conception actuels, les connaissances ne sont pas nécessairement disponibles pour les interfaces d'assemblage des produits existants. Cela tend à amener les concepteurs à développer une interface unique chaque fois que le composant est réutilisé, ce qui augmente la complexité de l'assemblage de deux produits sur une famille de produits modulaires (Pakkanen et al., 2016).

Théoriquement, pour identifier une interface d'assemblage qui permet l'intégration d'un composant réutilisé, il existe deux approches principales. La première consiste à définir le composant comme une interface lors du processus de conception d'un produit modulaire. La seconde consiste à rechercher dans le modèle CAO (Conception Assistée par Ordinateur) 3D d'un produit existant tout composant pouvant servir d'interface. Lorsqu'il s'agit d'identifier des interfaces dans des produits déjà développés, ces deux approches ne sont pas toujours applicables si les modèles CAO 3D ne sont pas complets. Dans ce scénario, une solution alternative doit être recherchée. D'un point de vue de la fabrication, la Planification de Processus d'Assemblage (Assembly Process Plan - APP) est une source de connaissance qui inclut des composants et des interfaces d'assemblage correspondantes, car elle contient les opérations séquentielles avec leurs composants correspondants nécessaires pour assembler le produit. Cependant, à notre connaissance, aucune recherche n'a été effectuée sur l'analyse de cette source de données pour identifier les interfaces d'assemblage responsables de cette réutilisation.

La littérature offre diverses approches pour assurer l'interopérabilité entre les modules ou les composants réutilisés et pour identifier des fonctionnalités telles que les interfaces d'assemblage. Cette

section introduit d'abord la définition de l'interface d'assemblage. Ensuite, les pratiques et les méthodes sont explorées pour définir les interfaces d'assemblage et les techniques pour les identifier également. Enfin, l'APP est introduite en tant que données d'entrée pour identifier les interfaces.

### *Définition d'une interface d'assemblage*

Pour intégrer un module réutilisé lors de la conception d'un produit, les concepteurs doivent prêter attention aux interfaces d'assemblage standardisées (Bonvoisin et al., 2016). Un marché en constante évolution implique des produits avec différentes variantes et capacités de mission ; la conception modulaire et de réutilisation semblent être une réponse appropriée qui pourrait répondre aux besoins des clients en incluant une architecture modulaire avec des définitions de modules et d'interfaces (Pakkanen et al., 2019).

L'interface d'assemblage d'un composant est une caractéristique sur la surface permettant de connecter des composants adjacents ou un composant à la structure (Figure 17). Elle définit la connexion limite entre différents éléments pour assurer la mise et le maintien en position.

On peut distinguer deux types d'interfaces d'assemblage (Fan et al., 2020 ; C.-S. Wang, 2009) :

- un premier type est **une pièce** qui assure l'assemblage de deux composants distincts.
- ensuite, **les connexions** intègrent une interface qui relie un élément à la structure du produit lui-même.

La Figure 17 résume comment une interface d'assemblage peut être utilisée dans le processus d'assemblage d'un produit.

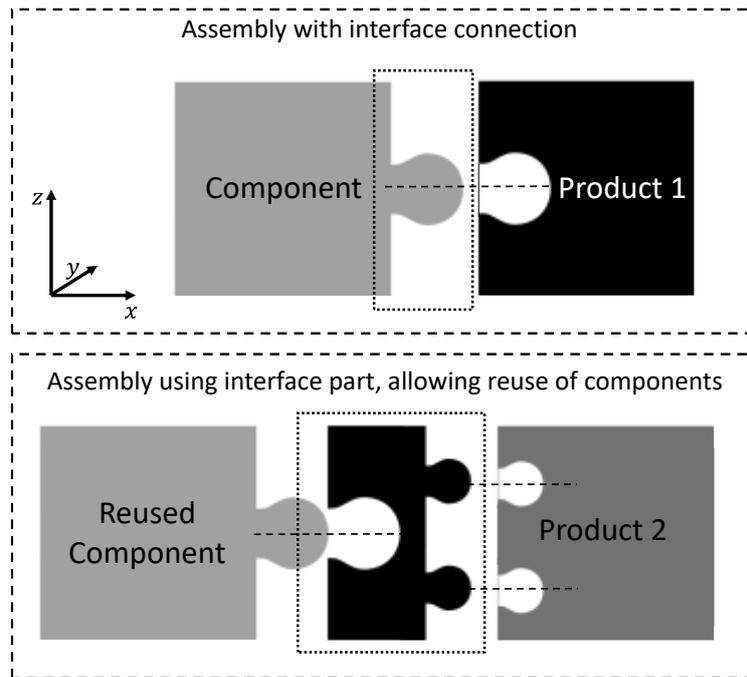


Figure 17 : Rôle de l'interface dans un assemblage de composants

Cependant, une limite demeure pour les industries qui produisent des produits de haute complexité à partir de nombreuses interfaces et de fonctions partagées qui définissent les connexions de sous-assemblage. Cette complexité diminue grâce aux spécifications des interfaces d'assemblage standardisées.

Pour concevoir des interfaces standardisées, plusieurs étapes peuvent être distinguées, telles que la définition des interfaces d'assemblage et leur identification. Cette section de l'état de l'art est principalement basée sur les pièces d'interface responsables de la réutilisation des composants et leur identification à travers la conception existante. La section suivante est axée sur la façon d'identifier les interfaces d'assemblage, y compris le type de données utilisé pour les détecter.

### *Méthodes qui définissent les interfaces*

La littérature présente des méthodes et des pratiques qui définissent l'interface d'un assemblage au cours des phases de conception, telles que la DfMA ou la DfA. Pour permettre la réutilisation de la conception lors du développement d'un nouveau produit, les concepteurs doivent accéder aux connaissances sur les pièces, composants ou assemblages réutilisables. Ces éléments doivent être fournis et faciles à trouver. Pour les activités menant à la réutilisation des conceptions existantes, il existe des technologies de reconnaissance des fonctionnalités qui peuvent être utilisées par les concepteurs.

## System Engineering (SE)

En pratique, la littérature montre que le fait d'envisager l'ingénierie des systèmes basée sur les modèles (Model Based System Engineering - MBSE) est une réponse à la définition des interfaces d'assemblage et est couverte par la recherche. L'ingénierie des systèmes (System Engineering - SE) est « *une approche et des moyens interdisciplinaires pour permettre la réalisation de systèmes réussis. Elle se concentre sur la définition des besoins du client et des fonctionnalités requises au début du cycle de développement, sur la documentation des exigences, puis sur la synthèse de la conception et la validation du système tout en considérant le problème dans son ensemble* » (INCOSE 2011c). Le MBSE est l'évolution de la SE. Elle pourrait être définie comme « *tout dans un projet SE doit être modélisé* » (INCOSE 2011b). Elle met l'accent sur les principes de modélisation dans l'évolution des exigences du système, la conception, l'analyse, la vérification et les activités de validation, en commençant par la phase de conception et en poursuivant jusqu'à la fin de vie du produit (Wymore, 1993). La conception à base de modèles (Model Based Design - MBD) dans l'industrie aéronautique vise à équilibrer l'extrême complexité d'une conception réussie (L. Li et al., 2019). Une approche basée sur le MBSE suggère d'utiliser une spécification des biens réutilisables pour définir les interfaces, les caractéristiques et les éléments de soutien des composants réutilisés (Hummell & Hause, 2015). Le MBSE fournit également des outils pour aider les interactions du système à être spécifiées dans la conception du produit et transmises au FAL. Ces interactions système incluent généralement la définition des interfaces d'assemblage pour assurer l'interopérabilité entre les modules (Li & Lockett, 2017). Il est alors possible à partir de cette remontée d'information de capitaliser la solution d'intégration et de l'adresser aux concepteurs souhaitant assembler un nouveau produit sur la même ligne d'assemblage finale. Cependant, même si les recherches sur le MBSE ont débuté dans les années 1990, l'industrie de la conception aéronautique a dû attendre les années 2010 pour investir dans de telles méthodologies ou logiciels (Tschirner et al., 2015; Polacsek et al., 2017). Dans certaines industries le cycle de vie long des produits est tel qu'ils n'ont pu bénéficier de ces méthodologies.

## Les DfA et DfMA pour définir les interfaces d'assemblage

DfA est une pratique qui définit les interfaces d'assemblage. Elle est utilisée dans l'industrie aérospatiale pour évaluer la faisabilité d'assemblage des modules et des interfaces dans la phase de conception précoce d'un produit aérospatial en utilisant des outils commerciaux de CAO 3D (Bouissiere et al., 2019; El-Nounu et al., 2018; Formentini et al., 2022). DfMA consiste à concevoir des produits en ayant à l'esprit l'assemblage et la fabrication afin de répondre au niveau souhaité de délai de livraison, de coûts de fabrication et de qualité (Bayoumi, 2000; Huang et al., 1999). Les avantages de DfMA permettent également une plus grande standardisation des pièces telles que les interfaces d'assemblage (Jack, 2013). La littérature présente un corpus important de travaux sur DfMA

et pourtant des préoccupations persistent. Le niveau de détail nécessaire pour aborder les informations qui guident les principes de DfMA est disponible dans les phases avancées de conception (Bouissiere et al., 2019; El-Nounu et al., 2018; Pokojski et al., 2019). Cependant, les activités de conception utilisant des composants réutilisés nécessitent une prise en compte précoce des exigences d'intégration spécifiques lors de la conception du nouveau produit. Ces approches présentent une compréhension essentielle de la conception et des aspects d'assemblage/intégration d'un avion. La phase de conception amont est la phase la plus critique pour considérer l'intégration des composants dans un produit pendant son assemblage. Le fait de ne pas le faire empêchera l'identification des interfaces d'assemblage sans travail préalable.

Cependant, même s'il existe des méthodes pour définir les interfaces d'assemblage d'un produit, celles-ci sont utilisées pendant les phases de développement du produit et ne sont pas abordées sur les produits déjà existants dont les équipes de développement souhaiteraient récupérer la connaissance. La section suivante explore les outils existants qui identifient les interfaces d'assemblage dans les systèmes de CAO.

### *Identification des interfaces d'assemblage sur les conceptions existantes*

Les logiciels commerciaux de CAO actuels proposent des fonctionnalités de reconnaissance de composants mécaniques, qui sont des sujets de recherche largement abordés dans la littérature (K.-M. Hu et al., 2013; Jayanti et al., 2009; Liu et al., 2013; Lupinetti et al., 2019). Basés sur une méthode de travail organisée et méthodique, ces logiciels incluent des fonctionnalités telles que la gestion des connaissances qui permettent de filtrer les composants à travers une multitude de solutions existantes (Bodein et al., 2009). Ainsi, l'identification des interfaces d'assemblage devrait être possible si les concepteurs disposent des fonctionnalités nécessaires pour la rechercher.

Les approches existantes proposent d'inférer automatiquement des informations fonctionnelles et mécaniques à partir de données géométriques et de la formalisation des connaissances en ingénierie (Foucault & Leon, 2010). Elles utilisent des représentations simplifiées conventionnelles et des interfaces entre les pièces couramment utilisées par les concepteurs pour caractériser les liaisons filetées et les vis, puis exploitent ces propriétés comme critères pour identifier les caractéristiques d'assemblage et les composants standard dans des modèles CAO géométriques bruts. Une approche basée sur des règles a également été adoptée pour identifier un objet en fonction de son appartenance à une certaine catégorie (Bonino et al., 2023). L'algorithme de reconnaissance développé se compose de plusieurs étapes : une analyse basée sur la forme et une analyse basée sur le contexte. Les deux analyses reposent sur une analyse géométrique et topologique du modèle CAO. L'algorithme permet la reconnaissance de composants dans des modèles CAO 3D et est également capable de rejeter les faux positifs, ainsi que de choisir le composant correct en cas de résultats multiples.

La reconnaissance des caractéristiques est également possible en utilisant une vue éclatée d'un assemblage 3D. Comme la réutilisation de composants entre différents produits peut entraîner des problèmes d'interférence lors de l'assemblage, en particulier en ce qui concerne l'intégration de ces composants réutilisés (ou sous-ensembles), des méthodes existent pour générer des vues éclatées à partir d'une conception 3D et pour détecter ces collisions. Ensuite, la fonction de détection de collision pourrait être redirigée pour reconnaître les interfaces d'assemblage. L'utilisation de matrices d'interférence étendues (EIM) pour générer des vues éclatées d'un assemblage est une méthode pour anticiper les interférences lors de l'intégration lorsqu'un composant est réutilisé. L'objectif est de développer un outil pour générer automatiquement une planification de séquençage d'assemblage (ASP) de produits complexes sous forme de vue éclatée (Yu et al., 2014). Cette génération est effectuée sur la base des EIM (Kumar et al., 2022). D'autres études se concentrent sur la détection de collision pour l'assemblage et le désassemblage entre les composants pour créer des vues éclatées du modèle d'assemblage 3D CAO (Prasad et al., 2022). La présence de fixations physiques et le type de liaisons d'assemblage décident de la prise en compte de ces critères d'assemblage (Bahubalendruni et al., 2015). L'utilisation de matrices EIM pour générer des vues éclatées permet de vérifier l'assemblage entre les composants ou sous-ensembles en détectant les interférences entre les connexions. Par conséquent, il est possible de l'utiliser pour identifier les composants qui permettent de les positionner et de les maintenir en place, ce qui pourrait être considéré comme des interfaces.

Cependant, ces méthodes nécessitent également une conception de modèle CAO complète. Parfois, la conception 3D n'est pas assez détaillée ou simplement n'existe pas pour les produits complexes et la détection de ces composants à partir des dessins d'assemblage devient problématique. Ces études sont principalement basées sur des produits déjà conçus. La littérature présente également des approches dans les premières étapes de conception adaptées pour faciliter la détection des caractéristiques. Si ces approches conviennent au développement de nouveaux produits en identifiant les interfaces d'assemblage critiques dès les premières étapes, elles ne sont pas basées sur des informations provenant de produits déjà existants. Par conséquent, les processus de conception de produits ne conviennent pas pleinement aux industries où les nouveaux développements sont principalement basés sur des produits existants conçus il y a des décennies. De plus, ces produits n'ont pas bénéficié des dernières techniques DfMA, DfA, ni de la dernière génération de logiciels de conception CAO commerciaux. Cela a conduit notre recherche vers un outil précédemment utilisé dans la conception et encore utilisé aujourd'hui pour le développement de nouveaux produits.

### *Assembly Process Plan (APP)*

Une autre source de connaissances est alors nécessaire. L'APP peut être une source de connaissances utilisable lorsqu'un ingénieur doit concevoir un nouveau produit.

L'APP fait le lien entre la conception et la fabrication, en intégrant l'installation et les équipements liés à la gestion des opérations (L. Li et al., 2019) ; c'est la conception d'un processus d'assemblage (Marian, 2003). L'APP est un fichier (une liste ou un diagramme) contenant les composants et les pièces nécessaires pour produire une unité d'un produit fini (L. Wang et al., 2008). Dans cette industrie, un APP peut atteindre des dizaines de milliers de pièces, y compris les composants réutilisés et leurs interfaces d'assemblage liées. La prise en compte de l'analyse APP des anciens produits pour détecter les interfaces d'assemblage responsables de la réutilisation des composants peut aider les concepteurs à accéder aux connaissances et à établir une liste d'interfaces à normaliser.

D'autre part, la collecte de données à partir de l'APP offre des informations essentielles concernant la réutilisation des composants par rapport à la planification du processus d'assemblage d'un autre produit. Elle permet d'avoir une vue d'ensemble du nombre de pièces d'un produit qui proviennent d'un autre produit. Un outil d'analyse basé sur APP offre certaines potentialités concernant la criticité des matériaux ou l'impact des différents composants sur la production et la disponibilité des produits finis. Cependant, ces études sont principalement liées à l'analyse d'un seul APP à la fois et ne se concentrent pas sur la façon dont les interfaces sont utilisées pour intégrer des composants réutilisés dans différents produits.

## Synthèse de l'état de l'art sur les interfaces d'assemblage

La gestion des interfaces d'assemblage semble être, d'après l'étude de l'état de l'art, un sujet recherché quand il s'agit de définition lors de la conception de nouveaux produits. Les interfaces d'assemblage assurent l'interopérabilité des composants réutilisés ainsi que leur intégration sur les lignes d'assemblage. L'identification de ces interfaces est donc nécessaire dans le cadre de leur standardisation.

**Cependant**, dans une industrie où le développement de nouveaux produits repose principalement sur **une famille de produits plus ancienne à longue durée de vie**, il est difficile d'aider les concepteurs à identifier les interfaces d'assemblage existantes responsables de l'intégration des composants réutilisés. **Toutes les méthodes présentées échouent** à fournir un outil pour **reconnaître ces interfaces d'assemblage**. La raison en est que les produits étudiés eux-mêmes sont des produits à longue durée de vie. Il n'y a pas de prise en compte de l'obsolescence de la technologie ou des processus dans l'analyse.

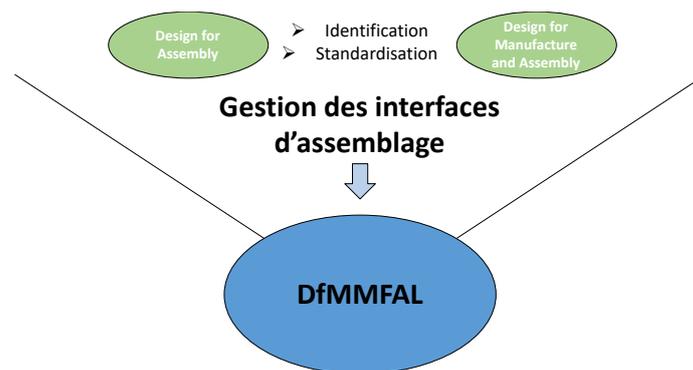


Figure 18 : Résumé de la gestion des interfaces d'assemblage

L'APP d'un produit déjà conçu ou celui d'un en cours de fabrication **semble présenter les caractéristiques idéales** pour identifier les interfaces d'assemblage responsable de la réutilisation d'un composant. Utiliser les **principes de DfX** et formaliser les informations provenant de l'APP pour les adresser lors des phases amont de la conception d'un nouvel appareil **faciliterait la conception d'un produit compatible avec une MMFAL** (Figure 18).

La dernière section nous amène à étudier comment mettre à disposition des objectifs d'optimisation à destination des équipes de développement. Dans la partie 1.3.4, nous nous pencherons sur une description théorique des règles de conception.

### 1.3.4. Règles de conception

Aujourd'hui les contraintes de chaque industrie manufacturière sont telles que les connaissances nécessitent d'être formalisées afin d'être correctement adressées aux équipes de conception. En formalisant les connaissances en matière de fabrication et de spécificités industrielles, les règles de conception rendent plus claires et exploitables les processus pour les concepteurs et les fabricants. La littérature présente des règles de conception centrées sur le concepteur et ses interactions. Notamment le fait que les règles sont un moyen de simplifier l'interaction entre le concepteur et les connaissances des experts du milieu industriel concerné. Améliorer cette interaction permet également d'optimiser les performances du concepteur (Fischer & Nadeau, 2011).

#### *Origine*

Quatre types de règles de conception peuvent être considérées (Calkins & Scholz, 2000) :

- **heuristique** : règles faisant partie de bonnes pratiques ou des habitudes de conception liées aux industries et entreprises. Elles ne sont pas justifiées par des exigences techniques mais peuvent être imposées par l'entreprise pour des raisons organisationnelles, pour faciliter la vérification des pièces ou leur modification par exemple ;
- **empiriques** : règles basées sur des données expérimentales comme des études d'usure des matériaux ;
- **contraintes légales** : règles prescrites par différentes normes en vigueur. Ces normes peuvent être à l'origine directement ou indirectement de certaines règles. Par exemple les essieux du bogie d'un train dont l'écartement est de 1,435m en France ;
- **physique** : règles s'assurant que le produit conçu pourra être fabriqué et ne cassera pas lors de son utilisation. Les calculs de dimensionnement instancient ces règles physiques.

Les règles de conception peuvent avoir des origines très variées. Cependant elles ne peuvent, en l'état s'adresser de manière générale à tous les secteurs de l'industrie manufacturière. Elles doivent prendre en compte les spécificités de l'industrie considérée. Pour adresser des règles permettant de mettre au point un design compatible avec une MMFAL, les spécificités de l'entreprise et les connaissances des experts doivent être comprises avant le concevoir le produit. Ce qui permet aux équipes de développement d'adresser des règles de Design for MMFAL dès les phases amont de conception du produit.

Une des approches du DfX, la méthodologie du DfM, comprend les connaissances liées aux spécificités de la fabrication durant la phase de conception du produit (Boothroyd et al., 2010). Appliquées sur des étapes ultérieures du développement d'un produit, les règles de conception issues

des principes de DfM sont suivies pour concevoir un produit ou un composant fabricable selon les spécificités de l'industrie. Les règles de conception se trouvent souvent dans un format heuristique ou conservatoire dans la littérature, de plus elles sont souvent établies par des experts dans le domaine de fabrication et adaptées à leur propres processus industriels. Cette démarche est notamment utilisée dans le cadre d'approches comme le Design for Additive Manufacturing (DfAM) (Blösch-Paidosh & Shea, 2017; Grandvallet et al., 2017).

Des méthodes pour formaliser les connaissances ont été suggérées dans la littérature (Tableau 4) traitant de moulage de métal, d'injection, de formage de tôles ou de développement en général mais s'adresse plus au développement intrinsèque du composant plutôt qu'à son assemblage en ligne d'assemblage (Favi et al., 2021; Klein et al., 2015; Salaets et al., 2022). Proposer un cadre de règles de conception permet d'adresser une règle adaptée au concepteur. Ce cadre s'appuie sur l'établissement de diverses propriétés qui permettent aux ingénieurs d'obtenir les connaissances nécessaires pour faciliter l'exploitation des règles de conception (Debord et al., 2018).

Tableau 4 : Résumé des différentes approches existantes concernant les règles de conception

	<b>Auteurs</b>	<b>Approches/Applications</b>	<b>Avantages/Désavantages</b>
DfX	Blösch-Paidosh & Shea, 2017	DfAM – Méthode heuristique pour transférer la connaissance nécessaire aux concepteurs	Méthode développée autour de la Fabrication Additive
	Grandvallet et al., 2017	Méthode pour la structuration des connaissances	Méthode développée autour de la Fabrication Additive
Cadre générique de formalisation	Salaets et al., 2022	Proposition d'un cadre générique de formalisation de règles de conception	Catégorie de règles : formage (thermoformage, hydroformage) ou moulage (injection, rotomoulage)
	Favi et al., 2021	Développement d'un outil pour classifier la connaissance et reconnaissance de caractéristique	Nécessite mise à jour quotidienne pendant la conception du produit
	Debord et al., 2018	Cadre de règles de conception pour faciliter la saisie, récupération et suggestion de règles de conception	Utilisation des propriétés de règles pour adresser une règle pertinente en fonction du contexte
	Klein et al., 2015	Formalise les connaissances de conception et adresse les objectifs pour concevoir la solution	Codifie les connaissances de conception liées au SE

### *Niveaux d'impératif des règles de conception*

La littérature présente plusieurs origines pour formaliser des règles de conception. Les niveaux d'impératifs, c'est-à-dire le niveau de nécessité absolu qu'impose la règle, varient également. En effet, elle ne peut être qu'un conseil, une recommandation ou bien une contrainte non négociable. Le niveau d'impératif n'est pas toujours clair lorsque les règles sont adressées. Dans la pratique cette différence de niveau est présente et peut aussi varier d'une entreprise à une autre alors qu'elles appliquent la

même règle. Des études proposent une classification des règles de conception selon leur niveau d'impératif (Mourtzis et al., 2016).

### *Synthèse de l'état de l'art sur les règles de conception pour la MMFAL*

De plus en plus de règles sont adressées lors de la conception d'un nouveau produit, si bien que cela représente aujourd'hui un vrai défi pour les équipes de conception d'appliquer la règle appropriée au bon moment. Il existe dans la littérature des méthodes de formalisation de connaissance pour adresser des règles de DfX.

**Cependant**, notre étude de l'état de l'art montre qu'à notre connaissance, aucune règles ne sont élaborées avec comme objectif d'optimisation la prise en compte **d'une conception pour un assemblage en MMFAL**.

## Synthèse du premier chapitre

La littérature montre que la prise en compte précoce de règles de conception permet de faciliter l'atteinte des objectifs d'optimisation. Cet ensemble de règles forme une **approche de DfX** où X représente cet objectif. Pour répondre au besoin de **flexibilité**, la littérature montre que d'une part les systèmes de production peuvent se tourner vers des **MMFAL** et d'autre part, les processus de conception amont vers des **approches modulaires** basées sur la **réutilisation des composants** et la **gestion des interfaces d'assemblage**.

La littérature montre **un avantage** à suivre le concept de **modularisation** pour répondre au **problème de flexibilité**. Elle démontre également que l'utilisation d'une approche de **réutilisation de la conception** favorise la **modularisation**, en particulier dans une industrie où la complexité et la personnalisation sont importantes. Aussi, un ensemble d'**interfaces** standardisées doit être **déployé pour assurer l'intégration des modules ou composants réutilisés**.

Cependant, la littérature **ne présente pas**, à notre connaissance de formalisation des objectifs d'optimisation centrés sur un assemblage en MMFAL qu'on pourrait appeler **DfMMFAL**. La Figure 19 résume le cheminement des trois axes étudiés dans l'état de l'art menant à la mise en évidence du manque de pratiques de DfMMFAL dans la littérature.

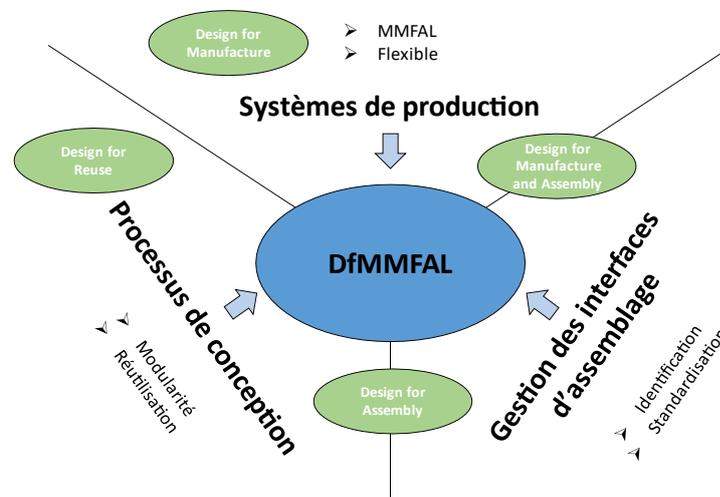


Figure 19 : Résumé de l'état de l'art lié au manque de règles de DfMMFAL présent dans la littérature

Aussi, les outils de **formalisation de règles** de conception sont principalement basés sur les produits développés **à partir d'outils modernes**. Dans le cas d'une industrie où le développement de nouveaux produits est principalement basé sur une **ancienne famille de produits** à longue durée de vie, **il n'existe pas de méthode** de formalisation de règles.

En synthèse, la réalisation de ce contexte industriel et de cet état de l'art nous a permis d'énoncer les deux constats suivants :

- 1. il n'existe pas, à notre connaissance, de méthodes et outils adaptés et formalisés permettant d'adresser des règles de conception conduisant les équipes de développement à concevoir deux produits compatibles avec une MMFAL ;**
- 2. du fait du contexte industriel spécifique, c'est-à-dire avec un temps de développement long et un marché concurrentiel mature, la majorité des outils existants ne peuvent pas être directement utilisés et appliqués pour établir ces règles à destination des équipes de développement.**





## Chapitre 2

### Problématique et hypothèses

## Chapitre 2 : Problématique et hypothèses

### Introduction du deuxième chapitre

Le deuxième chapitre se décompose en trois sections présentées dans la Figure 20. Dans un premier temps, la Section 2.1. reprend la construction de la problématique de recherche construite à partir de la synthèse des constats issus de l'analyse de l'état de l'art. La Section 2.2 présente la construction d'une pratique, la méthode DfMMFAL, qui se propose de répondre à la problématique de recherche. Cette pratique sera évaluée grâce aux hypothèses énoncées dans la Section 2.3.

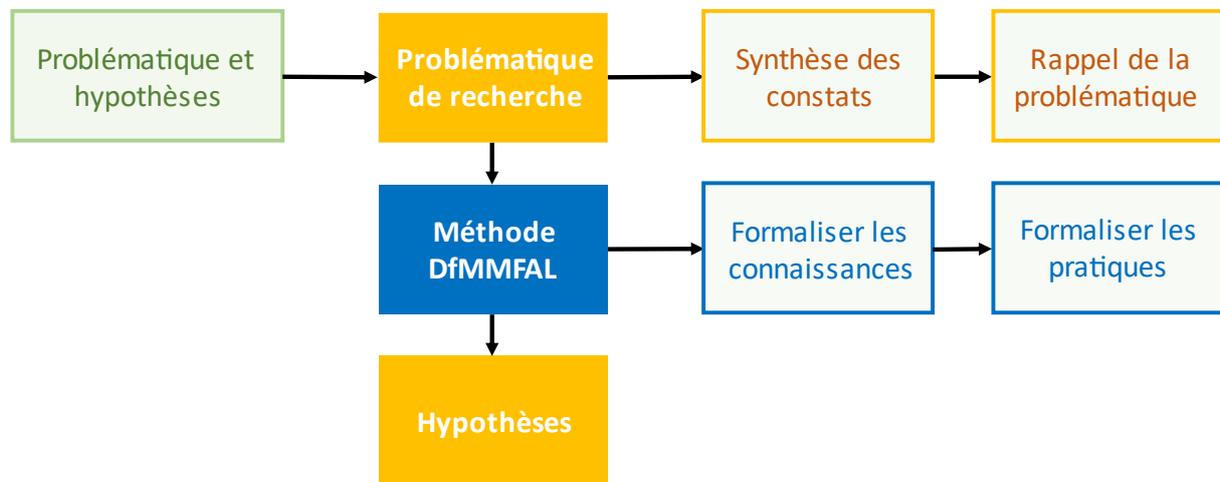


Figure 20 : Structure du deuxième chapitre

Nous commencerons donc par une synthèse des constats issus de l'étude de l'état de l'art du chapitre précédent. Ces constats nous permettent d'identifier l'importance de disposer de pratiques afin d'optimiser à la fois les processus de conception amont mais aussi les systèmes de production pour gagner en flexibilité. Ils nous permettent aussi de souligner le manque de pratiques adéquates pour y parvenir, notamment en ce qui concerne l'utilisation des recherches les plus récentes dans le cadre de notre contexte. Il convient alors de se poser la problématique de recherche qui nous permet de parvenir à concevoir un produit compatible avec une MMFAL.

Pour y répondre, nous présenterons la construction d'une nouvelle pratique inspirée par celles existantes de la littérature concernant le « **Design for X** » que nous appellerons **DfMMFAL**. Cette pratique nous permettra d'énoncer nos hypothèses de recherche que nous évaluerons au cours de ces travaux de thèse. Pour pallier ces manques identifiés dans la littérature, la méthode DfMMFAL présente 2 axes distincts : la formalisation des connaissances et la formalisation des pratiques.

## 2.1. Problématique

### *Synthèse des constats*

L'état de l'art nous a permis de définir et d'étudier plusieurs notions importantes à prendre en compte dans ces travaux de recherche. La synthèse de cet état de l'art met en évidence le manque de méthodes et outils adaptés et formalisés permettant d'adresser des règles de conception. De plus la majorité des outils existants ne peuvent être utilisés et appliqués directement du au temps de développement long et à leur non-adaptabilité avec les données provenant de conceptions existantes. Enfin lorsqu'une solution de MMFAL a déjà été mise en place dans le passé, il n'existe pas de méthode de gestion de connaissance et favorisant la formalisation des bonnes pratiques l'y ayant conduit.

### *Rappel de la problématique*

Tout d'abord, l'état de l'art réalisé dans le chapitre précédent et les constats qui en découlent montrent l'importance d'optimiser les processus de conception amont et les systèmes de production pour favoriser une MMFAL. Cependant il y aurait, à notre connaissance, un manque dans la littérature de méthodes et outils permettant d'aider les concepteurs à concevoir un produit compatible avec une MMFAL. En effet, la littérature présente des méthodes et outils à disposition des équipes de développement mais uniquement dans le but d'optimiser les processus de conception. Nous apprenons de plus que la plupart des outils développés pour répondre aux problèmes de MMFAL traitent des sujets d'équilibrage ou d'ordonnancement de la production et non des processus de conception amont.

Au vu de toutes ces informations, nous pouvons donc confirmer la nécessité de travaux de recherches pour répondre à notre problématique que nous rappelons ci-dessous

### **Comment assister les équipes de développement à concevoir de manière optimisée des nouveaux produits compatibles avec une ligne d'assemblage finale multi-modèles ?**

Afin de répondre à cette question nous nous proposons donc dans ce travail de recherche d'établir une méthodologie d'élaboration de règles basée sur l'analyse de l'historique. Le tout mis à disposition des équipes de développement d'un nouveau produit organisant le travail entre les bureaux de conception et d'industrialisation : la méthode DfMMFAL. Cette proposition nous permettra ensuite d'énoncer notre hypothèse de recherche.

## 2.2. Formalisation de la méthode DfMMFAL

Notre méthode a été développée en prenant en compte à la fois l'état de l'art industriel et l'état de l'étude de la littérature. Nous avons étudié les pratiques industrielles actuelles ainsi que les recherches les plus récentes dans le domaine afin de concevoir une méthode qui prend en compte les défis actuels de l'industrie tout en tirant parti des connaissances et des techniques les plus avancées de la littérature scientifique.

L'objectif de notre méthodologie est d'offrir aux équipes de conception les outils leur permettant de maîtriser et piloter la modularisation et la réutilisation des composants lors des phases de conception amont d'un nouveau produit, pour dans un second temps permettre à ce nouveau produit d'être assemblé en MMFAL. Afin d'octroyer une dimension généralisable à notre méthodologie, nous considérons le processus générique –formalisation des connaissances et formalisation des pratiques– autour duquel organiser les activités de conception. Pour répondre à notre question de recherche dans un contexte industriel, nous structurons notre méthodologie en deux temps (Figure 21) :

- un premier temps qui consiste à formaliser les connaissances issues des entretiens qualitatifs à travers une liste de recommandations répondants aux contraintes liées à l'industrie identifiée ;
- un deuxième temps qui consiste à concevoir et adapter des étapes de traitement issues des résultats d'une étape de base consistant à identifier les composants communs entre deux produits. Ces étapes ont pour objectif de fournir aux équipes de développement une suite recommandations techniques (règles, métriques ou recueil d'information) facilitant la conception d'un appareil pour son assemblage en MMFAL.

Notre méthodologie est destinée à accompagner les entreprises désireuses d'optimiser la conception de leur produit dans une perspective de réduction de variabilité et d'augmentation de la flexibilité de leur système de production. Elle s'adresse essentiellement aux managers des équipes de conception, coté bureau d'étude et industrialisation. De ce fait, elle doit tenir compte des contraintes et des spécificités des entreprises.

À ce titre, la première étape consiste à réaliser une série d'entretiens qualitatifs et semi-directifs pour comprendre les objectifs de l'entreprise et d'identifier quelles sont les contraintes liées au développement d'un nouveau produit. Cette analyse cherche aussi à caractériser le fonctionnement des activités de développement d'un produit lors des phases amont de conception à l'instant T0 pour le comparer aux meilleures pratiques du secteur industriel concerné et ainsi, montrer l'existence (ou l'inexistence) d'un potentiel d'optimisation de la conception d'un produit en vue de son assemblage en MMFAL.

L'étape suivante utilise les résultats obtenus précédemment pour formaliser les pratiques existantes à destination des équipes de conception de nouveaux produits. Cette étape permet

notamment de répondre au besoin de réduction de variabilité et d'augmentation de la flexibilité des systèmes de production à travers l'optimisation de la conception amont d'un nouveau produit.

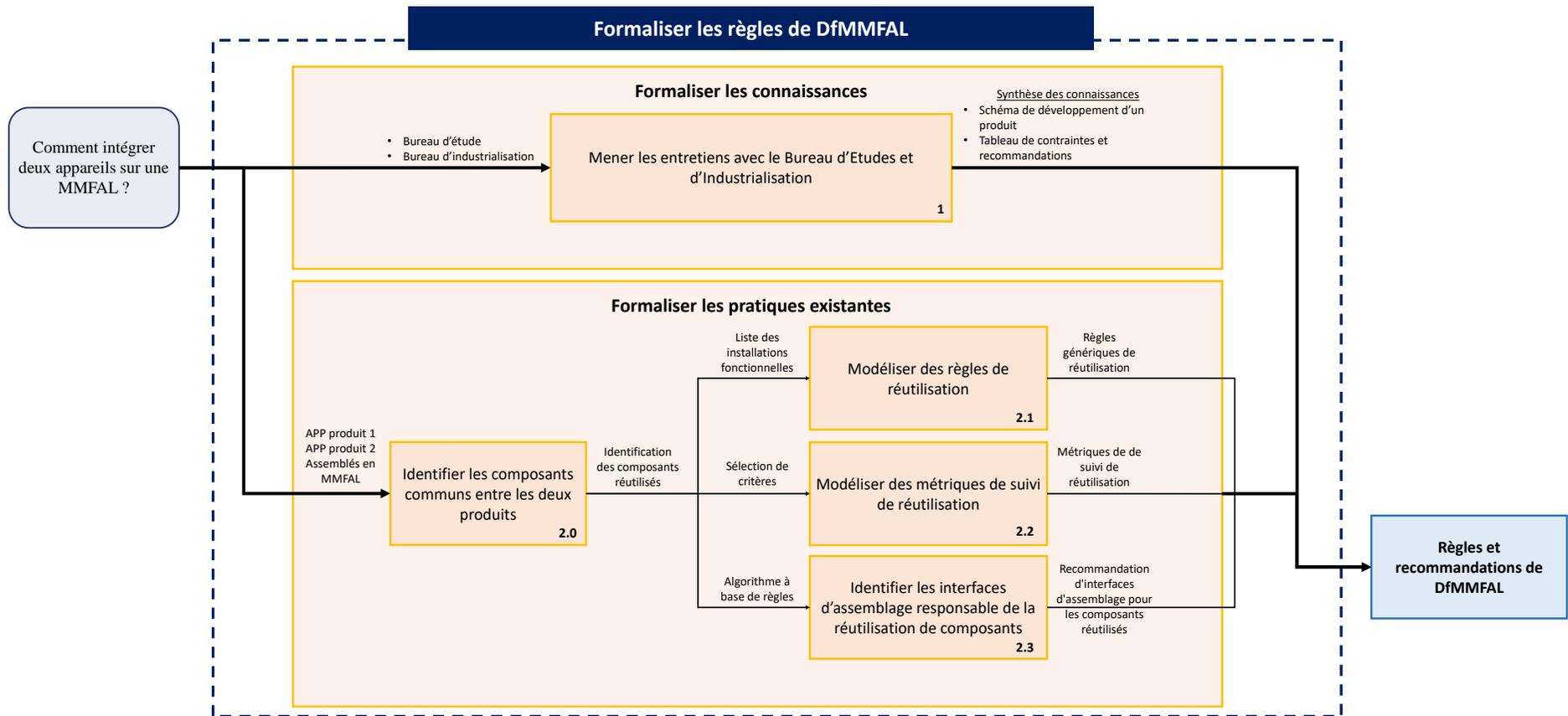


Figure 21 : Méthode DfMMFAL

## 2.2.1. Formaliser les connaissances

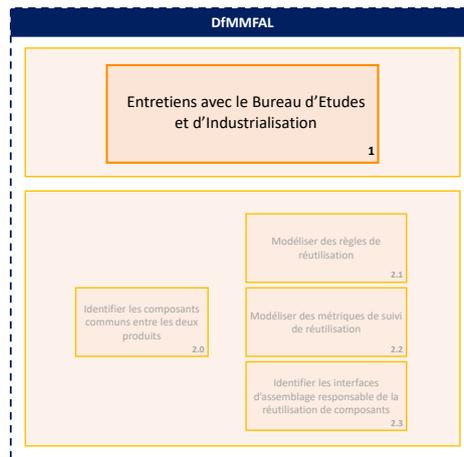


Figure 22 : Schéma de suivi – étape 1

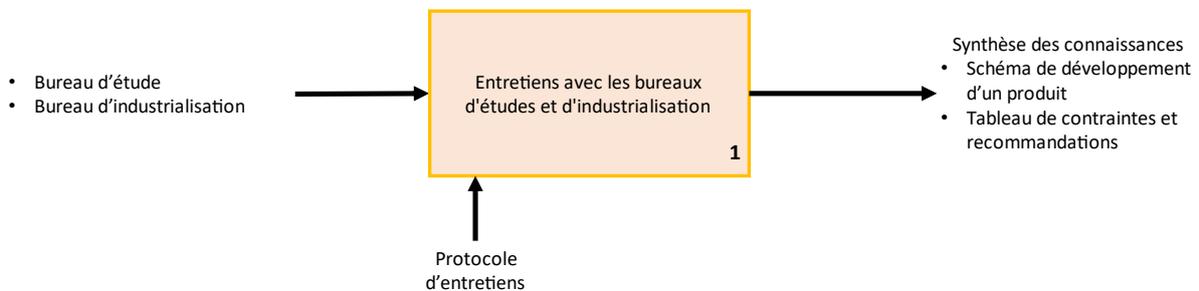


Figure 23 : Résumé de l'étape 1

### Objectifs

La première partie de notre méthodologie consiste donc à conduire les entretiens qualitatifs et semi-directifs pour à la fois comprendre les spécificités du terrain mais aussi de dresser un état des lieux du développement global d'un nouveau produit dans l'entreprise, identifier les domaines problématiques ainsi que valider les bonnes pratiques identifiées comme étant les plus performantes dans l'industrie aujourd'hui (Figure 23).

Ces entretiens s'articulent autour de trois thèmes à destination des managers et responsables des équipes chargées de la conception et du développement d'un nouveau produit. Cela concerne à la fois les bureaux d'étude et d'industrialisation. Les thèmes abordés concernent donc les axes sur lesquels les outils développés apporteront les règles et recommandations pour optimiser la conception amont d'un produit en vue d'un assemblage en MMFAL. Les meilleures pratiques utilisées pour permettre l'assemblage en MMFAL nous permettent d'identifier ces 3 thèmes :

- architecture produit ;
- architecture industrielle ;
- réutilisation de composants (*Reuse*).

À l'issu des deux séries d'entretiens, la compréhension des spécificités du terrain nous permet de formaliser les connaissances et de dresser un schéma récapitulatif des différentes phases de développement d'un appareil. En outre, un schéma décrivant les différents état du découpage modulaire d'un produit pourra être établi à l'aide des différentes réponses autour de l'assemblage en MMFAL. Enfin, un tableau contraintes/recommandations est également envisagé pour formaliser les connaissances recueillies auprès de ces entretiens. Après l'application de notre méthode mise en place au cours de ces travaux, une nouvelle méthodologie sera formulée en montrant l'interaction des outils mis en place au sein du schéma.

#### Démarche d'utilisation

Pour mener à bien la compréhension des spécificités du terrain, une démarche a été mise en place (Figure 24) pour guider l'utilisateur. Les trois parties – identification des métiers, identifications des rôles et synthèse – nous permettent dans un premier temps de découvrir quels métiers interagissent dans le développement d'un nouveau produit dans le secteur de l'industrie concernée. Une fois que les métiers sont identifiés il convient de chercher quels sont leur rôle au sein du développement de nouveaux produits. Enfin, une fois que tous les métiers ont été questionnés, la dernière partie consiste à synthétiser les informations.

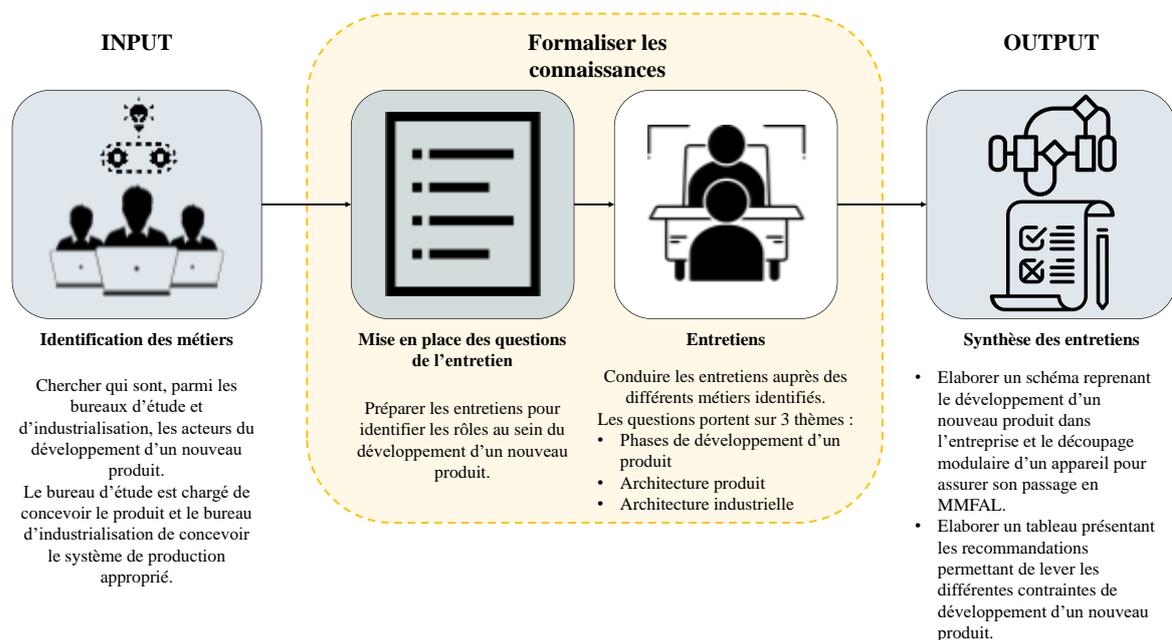


Figure 24 : Démarche de la conduite des entretiens qualitatifs

#### Entretiens avec le bureau de conception

Dans la première série d'entretiens, il est nécessaire de rassembler les informations autour des spécificités du terrain provenant des métiers du bureau d'étude. Deux thématiques sont abordées ici :

les phases de développement et l'architecture produit. Premièrement le questionnaire vise à faire l'état de l'art industriel du développement d'un nouveau produit dans l'entreprise, quels sont les acteurs principaux concernés, leur rôle et leurs interactions avec les différents métiers. C'est donc une phase de compréhension qui vise à mieux cerner la méthodologie de conception actuelle d'un produit. Une fois comprise, il est nécessaire de passer à la seconde partie du questionnaire qui consiste à récolter des informations sur les contraintes lors du développement qui empêchent l'élaboration d'un design compatible sur une MMFAL. Des questions sur les raisons de différences d'architectures produits sont posées. Aussi, des questions sur le principe de réutilisation de composants entre deux produits visent à répondre à la problématique de son utilisation lors du développement d'un nouveau produit.

#### *Entretiens avec le bureau industriel*

Dans la seconde série d'entretiens, c'est le domaine d'expertise de l'architecture industrielle qui nous intéresse. Les séries de questions sont pratiquement les mêmes mais adaptées au périmètre de développement des équipes d'industrialisation. C'est donc une phase de compréhension qui vise à mieux cerner la méthodologie d'industrialisation d'un nouveau produit. Les questions sont centrées sur les différentes contraintes rendant difficile la compatibilité d'un produit sur une MMFAL d'un point de vue industriel. Les questions portent donc sur les différences d'architectures industrielles entre deux produits et l'impact sur une FAL. Nous posons, à l'instar des entretiens précédents, des questions sur le principe de réutilisation de composants entre les produits et son apport lors du développement d'un nouveau produit.

**La formalisation des connaissances** consiste à permettre, à travers la compréhension des spécificités du terrain, de comprendre **comment est développé un produit** dans l'industrie spécifiée. Cette méthode permet de rassembler les **contraintes autour de la réutilisation de composant et d'un assemblage en MMFAL** ainsi que des **recommandations** pour les lever.

Une fois que les entretiens sont conduits, il est recommandé de **dresser un schéma récapitulatif des phases de développement** d'un produit avec les **interactions des différents métiers des BE et BI**. Un **schéma** décrivant les **différents état du découpage modulaire** d'un produit pourra être établi à l'aide des réponses autour de **l'assemblage en MMFAL**. Un **tableau** listant les **contraintes** de développement d'un nouveau produit avec les **recommandations associées** sera également mis en place.

Dans les entreprises où les utilisateurs de la méthode DfMMFAL ont déjà formalisés les connaissances et recueillies spécificités du terrain, contraintes et recommandations en vue d'un assemblage en MMAL, il n'est pas nécessaire de conduire cette série d'entretien.

Une fois que les connaissances ont été formalisées, il est désormais possible de **procéder à la formalisation des pratiques** lorsque les entreprises présentent au moins deux modèles ayant déjà été assemblés sur une MMFAL. Les résultats de cette analyse feront ensuite l'objet de **3 étapes successives de traitement**.

## 2.2.2. Formaliser les pratiques existantes

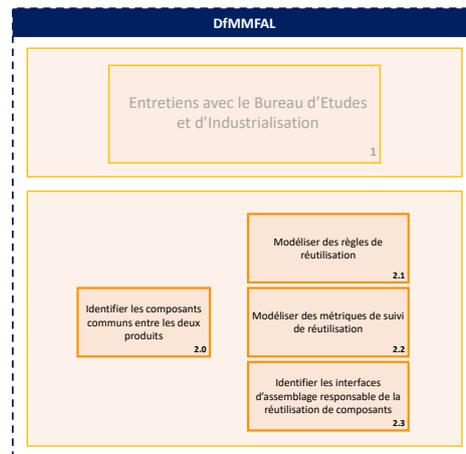


Figure 25 : Schéma de suivi – étape 2

Cette étape nous permet d'analyser précisément des cas pratiques de produits assemblés en MMFAL dans l'entreprise. Le but est de modéliser des étapes successives de traitement capables d'analyser et de formaliser les décisions qui ont permis aux équipes de développement de parvenir à assembler des produits en MMFAL alors qu'il n'existait pas de méthodologie jusqu'à maintenant. Ces étapes de traitement ont pour socle commun une comparaison des produits en question. Dans notre méthodologie nous appelons l'identification des composants communs entre les deux produits, **l'Analyse Reuse (AR)** car elle compare les listes de composants de chaque appareil assemblé en MMFAL pour y distinguer les composants réutilisés. Puis, à partir des résultats de cette analyse, il est possible de construire les 3 étapes successives de traitement :

1. modélisation des règles de réutilisation ;
2. modélisation des métriques de suivi de réutilisation ;
3. identification des interfaces d'assemblage.

### 2.2.2.1. Identifier les composants communs entre les deux produits : Analyse Reuse

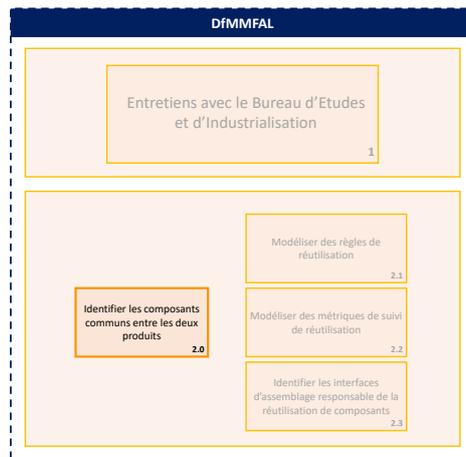


Figure 26 : Schéma de suivi – étape 2.0

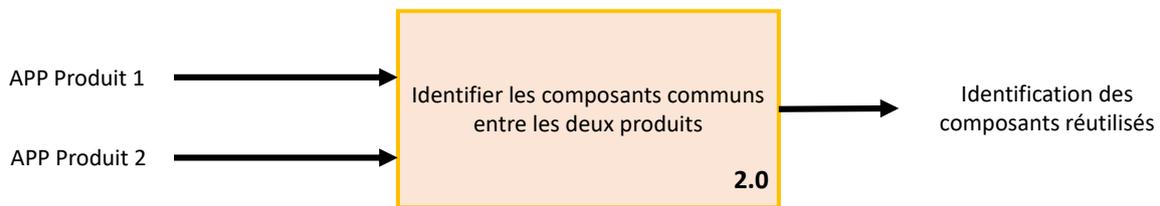


Figure 27 : Résumé de l'étape 2.0

#### Objectif

Il s'agit du socle commun aux trois étapes de traitement que propose la méthode DfMMFAL. Cette approche consiste à comparer les listes de composants d'un couple de produits déjà assemblés en MMFAL à travers leurs APP. L'objectif de l'AR est donc de fusionner les données de deux APP en un seul en précisant pour chaque composant s'il est commun aux deux produits analysés. Cette étape est nécessaire car le bureau d'étude ne dispose pas d'une méthode pour recueillir les informations sur la réutilisation à l'échelle de l'appareil. Cette étape permet donc de combler cette lacune en mettant en place une démarche pour recueillir les informations relatives à la réutilisation à l'échelle de l'appareil.

#### Démarche d'utilisation de l'Analyse Reuse

Pour lancer l'AR et ainsi identifier les composants réutilisés entre différents produits assemblés sur une MMFAL, il est nécessaire de présenter la démarche d'utilisation de l'outil (Figure 28).

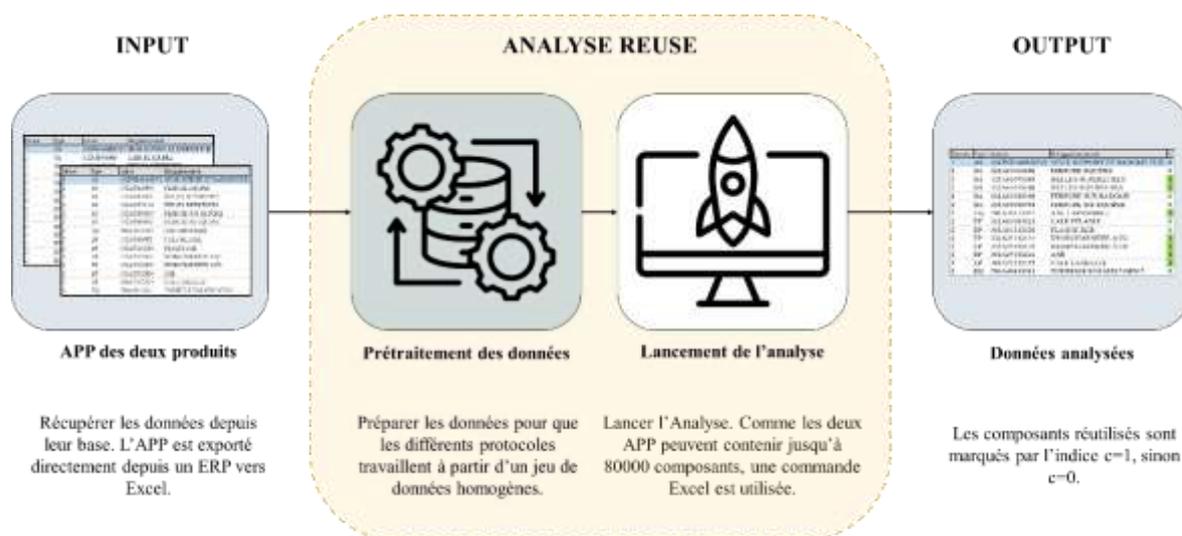


Figure 28 : Démarche d'utilisation de l'AR

### Assembly Process Planning

Pour lancer l'Analyse, il est nécessaire de récupérer les APP des deux produits à comparer. L'APP est obtenu à partir de la nomenclature d'un produit, il explique comment assembler les composants de la nomenclature lors des activités en chaîne d'assemblage finale. Il permet aussi de gérer l'équilibrage de la ligne entre les différentes opérations d'assemblage dans la mesure où certaines opérations ne peuvent être entamées si des opérations précédentes ne sont pas terminées. L'APP est généralement organisé sous forme de tableau, où une ligne représente un élément (c'est-à-dire une solution d'assemblage, une pièce élémentaire, un équipement ou un sous-ensemble), et une colonne représente une caractéristique (attribut) liée à l'élément. Il présente tous les composants nécessaires à l'assemblage d'un produit. L'APP est conçu en suivant une structure hiérarchique, et la disposition générale des informations est basée sur des niveaux de granularité (couches), en commençant par la gamme de fabrication (niveau 0) qui découpe l'appareil, le niveau des opérations d'assemblage qui composent chacune des gammes (niveau 1) et ensuite les niveaux des composants au sein de chaque opération (niveau 2+). Le Tableau 5 énumère les différents éléments que l'on peut trouver dans une structure APP.

Tableau 5 : Différents éléments présents dans un Assembly Process Plan.

Niveau de granularité	Désignation du niveau	Types de références par niveau
0	Découpage industriel du produit	Gamme de fabrication
1	Opération d'assemblage	Solution d'assemblage (AS)
2	Composants utilisés dans l'AS	Sous-ensemble (SA), Pièce élémentaire (EP), Équipements (EQ), Articles Standards (ST)
3 +	Composants sous-jacents au niveau 2 et inférieurs	Sous-ensemble (SA), Pièce élémentaire (EP), Équipements (EQ), Articles Standards (ST)

Le type et la qualité des données utilisées pour l'AR sont des critères essentiels pour la pertinence de nos expérimentations. Si, nécessaire, l'APP d'un produit présente des données qui, lors de leur extraction peuvent caractériser les composants. Parmi ces caractéristiques nous pouvons trouver la division (le site industriel où l'opération est exploitée), le code de station de l'opération, la quantité, le prix, ou parfois le fournisseur. Un APP présente aussi plusieurs couches appelées niveaux de granularité. Le niveau 1 correspond à la couche des opérations de fabrication qui utilisent les composants sous-jacents lors des différentes tâches dans la chaîne d'assemblage. La référence d'une solution d'assemblage (AS) est liée à une fiche technique qui présente comment procéder aux étapes d'assemblage des composants du niveau sous-jacent de l'AS. Le niveau 2 de granularité est le premier niveau de composants. Les composants peuvent être des sous-ensembles (SA), des pièces élémentaires (EP), des équipements (EQ) et des articles standard (ST). Les sous-ensembles sont de petits modules fonctionnels dont les éléments sous-jacents peuvent être d'autres SA, EP, EQ ou ST. Les pièces élémentaires sont des éléments qui composent le produit (par exemple, un panneau de porte avant ou un disque de frein). Un équipement est une pièce achetée ; de même, il n'y a pas d'élément sous-jacent dans un équipement EQ. Enfin, les ST sont les articles standards comme les vis, les rondelles, les boulons ou les écrous. La Figure 29 schématise les différents types d'éléments que nous trouvons dans un APP.

## Types de références

### Sous ensemble (SA)

*paroi anti-feu*



### Pièce élémentaire (EP)

*Stabilisateur horizontal*



### Equipement (EQ)

*Crochet d'élingue*



### Article Standard (ST)

*Quincaillerie*



Figure 29 : Différents types d'éléments d'un APP

Une fois les données analysées et les composants identifiés, il est possible de procéder à la phase suivante de notre méthode DfMMFAL. Trois étapes successives de traitement sont donc mises en place dans les sections suivantes.

## 2.2.2.2. Modéliser des règles de réutilisation de composants

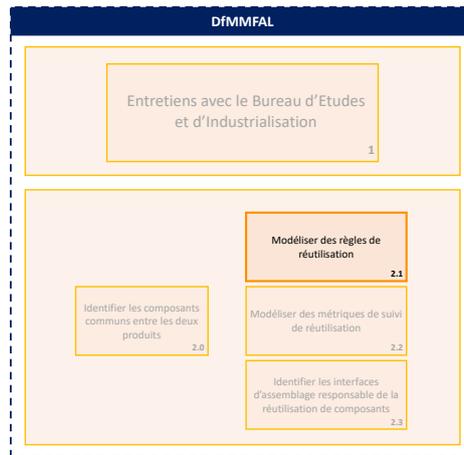


Figure 30 : Schéma de suivi – étape 2.1

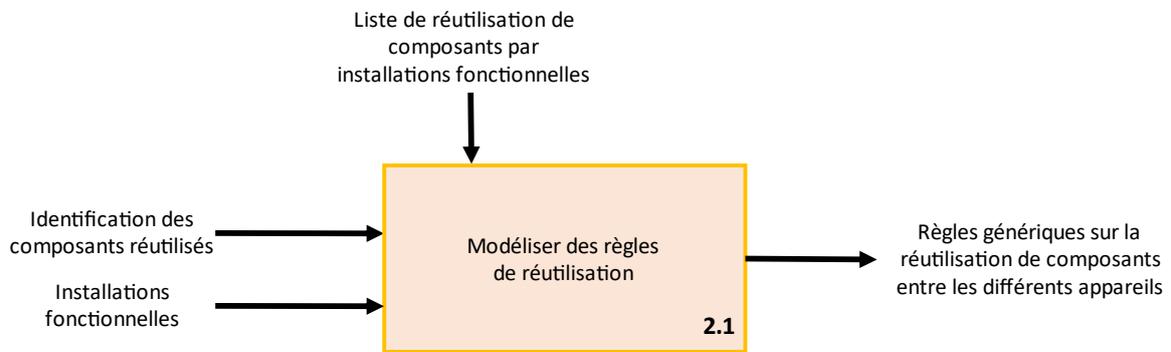


Figure 31 : Résumé de l'étape 2.1

### Objectif

La première étape mise à disposition au sein de notre méthode DfMMFAL est la modélisation des règles de réutilisation de composants. Le principe de réutilisation lors de la conception de produits en vue d'un assemblage en MMFAL est dominant. Il est nécessaire de savoir réutiliser des systèmes fonctionnels et des installations sous forme de modules d'un produit à un autre répondant à différents segments de marché. Il n'existe pas de moyen pour savoir comment les installations sont réutilisées d'un appareil à l'autre. L'objectif est donc de trouver les solutions de design qui ont permis l'intégration de composants réutilisés au sein de chaque installation fonctionnelle commune. L'opération d'assemblage nous permet d'accéder à l'instruction de travail qui y est liée. C'est à partir de l'analyse de ces fiches qu'il est possible de reconnaître les solutions de design qui ont permis aux concepteurs de l'époque de réutiliser ces composants.

## Démarche d'utilisation de la modélisation des règles de réutilisation de composants

Pour modéliser les différentes règles permettant de réutiliser les composants entre installations fonctionnelles de deux produits différents, il est nécessaire de présenter la marche à suivre, présenté sur la Figure 32.

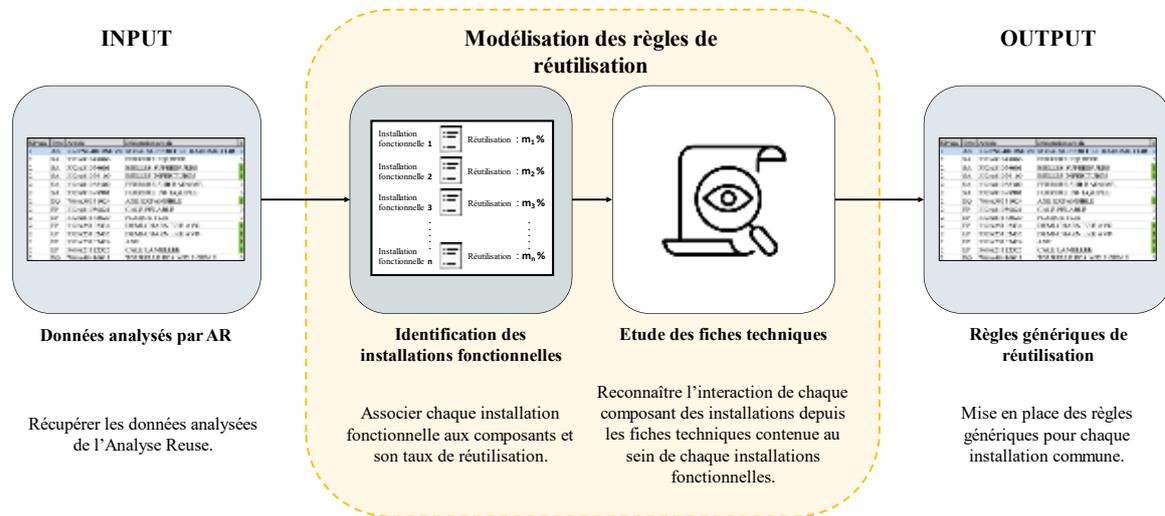


Figure 32 : Démarche de l'utilisation de la modélisation des règles de réutilisation de composants

Une fois la modélisation des règles de réutilisation terminée, les équipes de développement dispose d'un recueil de règles génériques. Ces règles permettent de généraliser les solutions d'intégration en fonction des différents scenarios de réutilisation des installations.

### 2.2.2.3. Modélisation des métriques de suivi et de réutilisation de composants

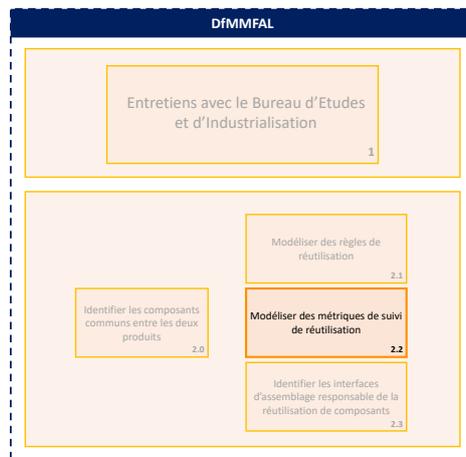


Figure 33 : Schéma de suivi – étape 2.2

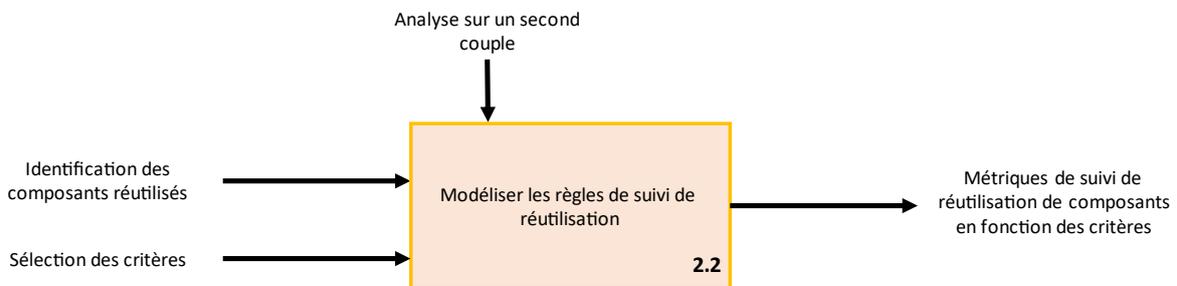


Figure 34 : Résumé de l'étape 2.2

#### Objectif

La seconde étape mise à disposition au sein de notre méthodologie outillée est la modélisation des métriques de suivi et de réutilisation de composants. Durant la première phase des expérimentations nous avons élaboré une série de règles et recommandations à transmettre aux équipes de développement d'un nouvel appareil afin de s'assurer de la bonne réutilisation des composants lorsque des systèmes sont identiques entre plusieurs appareils. Ceci afin de faciliter son assemblage sur la MMFAL. Bien que les entretiens qualitatifs aient relevé l'importance de l'analyse et de ses règles qui en découlent, des contraintes fortes de conception peuvent parfois freiner la réutilisation de certains composants. C'est pourquoi cette étape se consacre à la modélisation de métriques de suivi de réutilisation. Leur élaboration cherche d'une part à orienter la répartition des composants réutilisés en fonction des différents critères mis en place. D'autre part, ces métriques cherchent à établir un suivi de la réutilisation tout au long des phases de développement du nouveau produit.

Pour ce faire, il est nécessaire de répartir chacun des composants en fonction de critères. La définition de ces critères est déduite des entretiens qualitatifs et sont adressées sur la réutilisation des

composants en fonction de critères définis tels que la modularité, la granularité, la zone de montage ou par les ensembles fonctionnels.

### Démarche d'utilisation de la modélisation des métriques de suivi et de réutilisation

Pour modéliser les différentes métriques remontant l'information de la réutilisation des composants aux équipes de conception, il est nécessaire de présenter la marche à suivre, présentée sur la Figure 35.

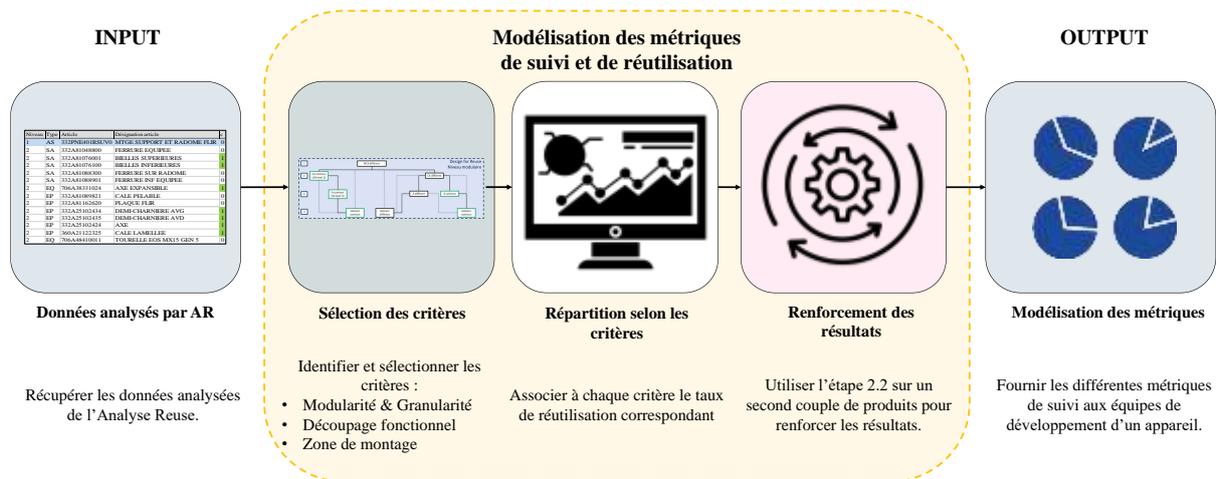


Figure 35 : Démarche de l'utilisation de la modélisation des métriques de suivi et de réutilisation de composants

La première étape consiste d'une part à récupérer les résultats de l'AR et d'autre part de sélectionner les critères de répartition. Les premiers critères sont les niveaux de granularité et de modularité. Il s'agit respectivement du nombre de couche composant un produit, les ensembles et sous-ensembles et du type de pièces.

Le découpage fonctionnel consiste à associer à chaque fonction ou sous-fonctions caractérisant un appareil son indice de réutilisation.

La zone de montage découpe l'appareil en plusieurs zones géographique qui définit l'emplacement ou les composants sont assemblés dans le produit.

La répartition du *reuse* entre les deux appareils comprend plusieurs critères. Ces critères visent à établir une cartographie sur la répartition de la réutilisation de composants lors du développement d'un nouveau produit et permettent de s'assurer que l'appareil en développement respecte les critères de réutilisation comme étant des valeurs cibles pour assurer son assemblage en MMFAL. Ce sont ces métriques qui seront suivies tout le long du développement d'un produit et distribuées aux acteurs concernés. Ainsi il convient de s'assurer que le produit respecte un taux de réutilisation suffisant et similaire à celui des couples dont les taux de réutilisation ont historiquement montré une compatibilité en MMFAL.

#### 2.2.2.4. Identification des interfaces d'assemblage (ICARRE)

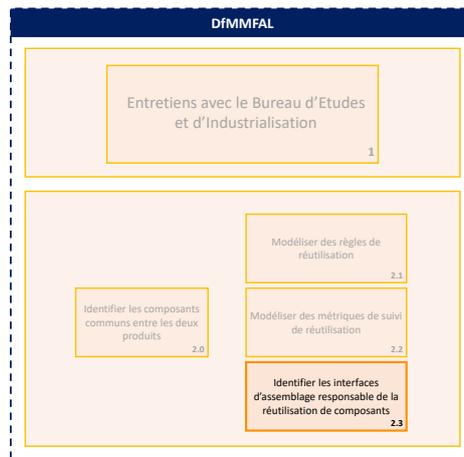


Figure 36 : Schéma de suivi – étape 2.3

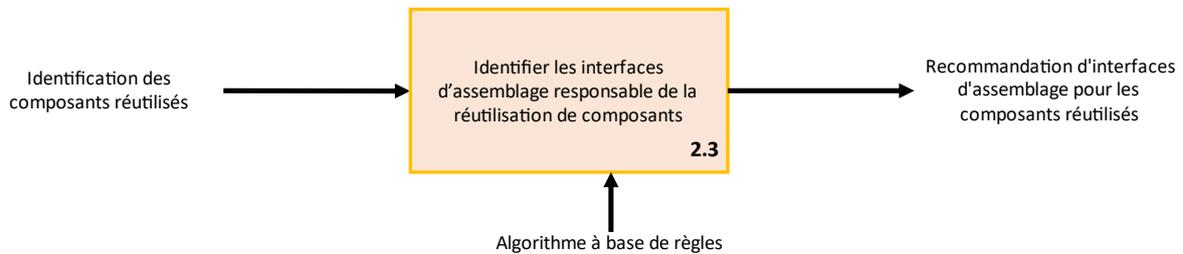


Figure 37 : Résumé de l'étape 2.3

#### Objectif

La dernière étape de notre méthodologie outillée consiste à identifier les interfaces d'assemblage responsables de la réutilisation de composants entre deux produits. Elle consiste en l'utilisation d'un algorithme qui nous permet, à partir des résultats de l'AR, d'identifier les interfaces d'assemblages responsables de l'intégration de composants réutilisés entre deux produits assemblés en MMFAL. La modélisation de règles de réutilisation d'installations fonctionnelles et de modélisation de métriques de suivi nous permet d'optimiser la réutilisation de composants. Cette troisième étape a pour but de proposer une solution d'intégration grâce à l'identification des interfaces d'assemblage. Nous avons donc développé un algorithme à base de règles, nommé Identification des Interfaces ( $I^2$  – ICARRE), pour identifier si un composant présent correspond à une interface ou non.

#### Démarche d'utilisation

Pour identifier les interfaces d'assemblage responsables de la réutilisation de composants entre deux appareils assemblés en MMFAL, il est nécessaire de présenter la marche à suivre, présentée sur la Figure 38.

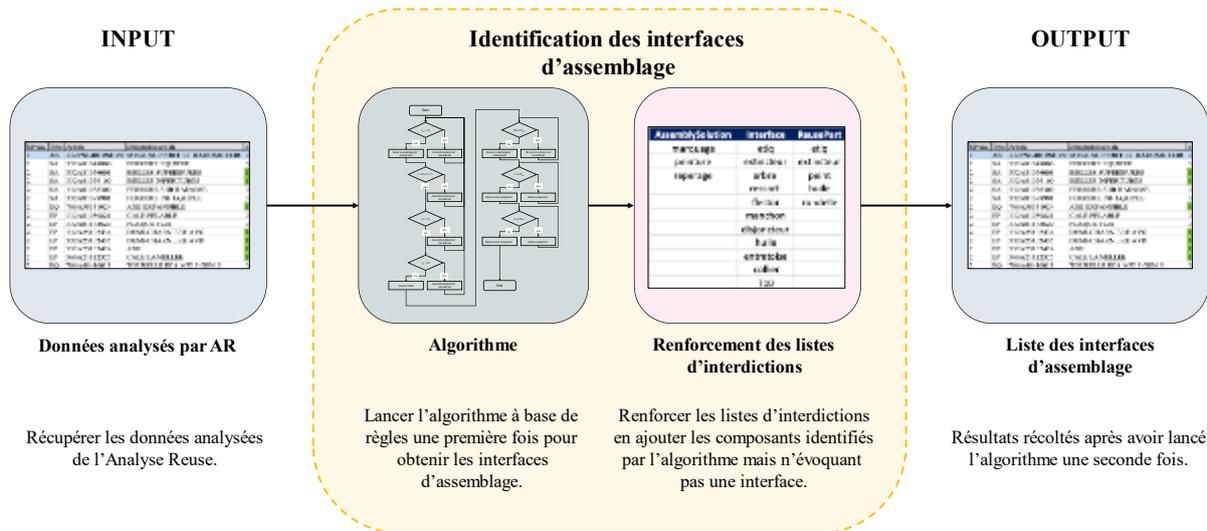


Figure 38 : Démarche d'utilisation de l'outil ICARRE

### Algorithme à base de règles

L'algorithme est décomposé en deux tests. Le premier consiste à identifier les solutions d'assemblage qui peuvent contenir des interfaces d'assemblage responsables de l'intégration d'éléments réutilisés. Ce test comprend quatre règles de décision qui sélectionnent les solutions d'assemblage et leurs composants sous-jacents. Si le test est validé, le programme ouvre un tableau et y colle toutes les solutions d'assemblage identifiées et leurs composants sous-jacents identifiés comme interfaces. Le deuxième test consiste à communiquer avec une liste d'interdictions pour s'assurer que toutes les interfaces spécifiées sont pertinentes. Elle contient les trois dernières règles de décision. Enfin, le résultat est une liste comprenant à la fois le ou les composants réutilisés et leurs interfaces d'assemblage correspondantes. Pour des raisons de lisibilité, la ligne de l'AS correspondant est également visible dans cette liste.

Nous avons dessiné l'algorithme présenté en Figure 39 pour traduire la manière d'identifier les interfaces d'assemblage depuis un APP par un processus automatique. Ensuite, toutes les décisions qui nous ont permis d'identifier une interface sont généralisées, ce qui donne lieu à un modèle à base de règles. Le tri de chaque composant est essentiel car un APP peut contenir de nombreuses références, parfois jusqu'à des dizaines de milliers. Un programme qui suit une séquence de tri évite aux équipes de développement de le faire manuellement.

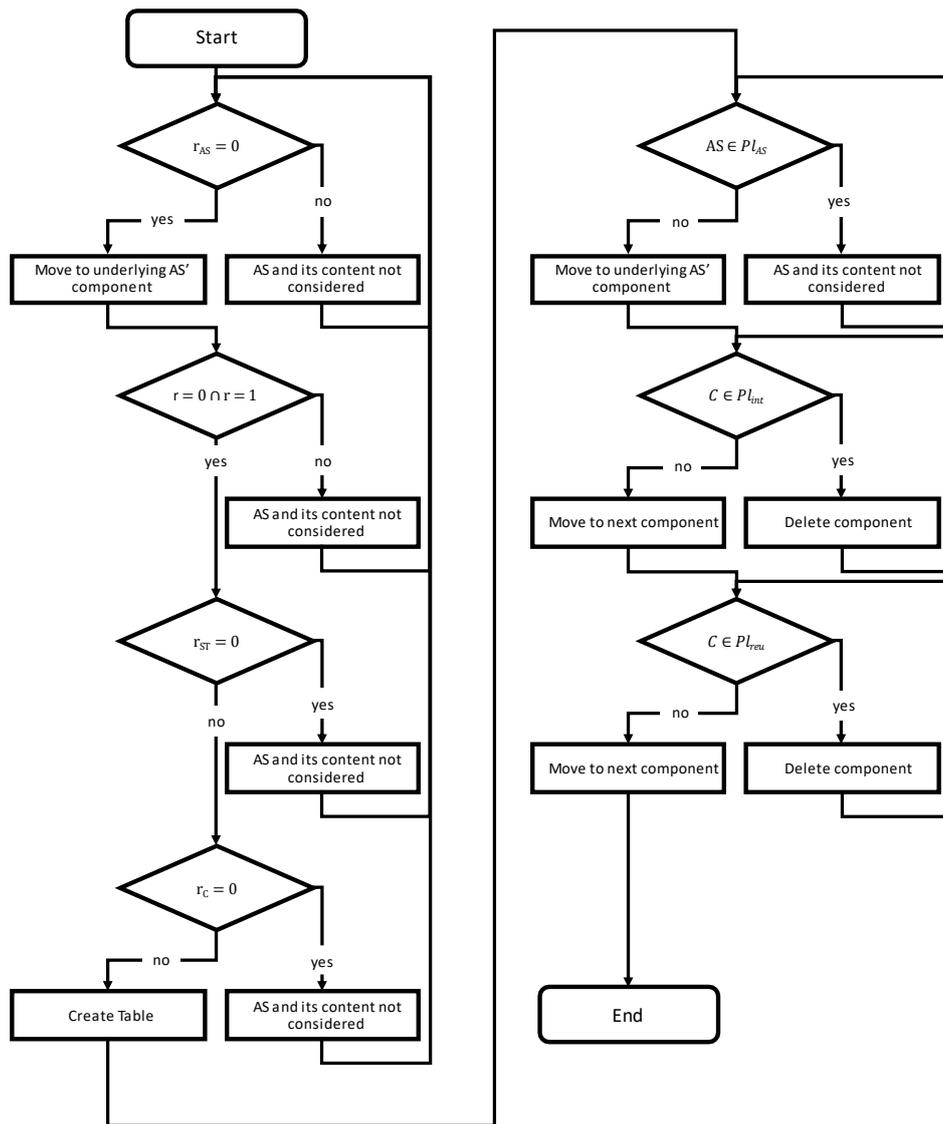


Figure 39 : Algorithme de l’algorithme ICARRE

Règles de décision du Test 1

Test 1.1 : la règle du premier niveau nous permet de supprimer toutes les AS si  $r = 1$  («  $r$  » est l’indice qui prend la valeur 1 si la référence est commune et 0 sinon). L’AS et son contenu sont entièrement réutilisés et l’AS ne contiendra pas d’interface. Alors elle n’est pas considérée et l’algorithme passe à l’AS suivante. Si  $r_{AS} = 0$ , alors l’AS peut contenir des interfaces et l’algorithme passe à la ligne suivante de l’APP, l’élément sous-jacent.

Test 1.2 : la règle du niveau 2 garantit que l’indice de communalité de tous les composants n’est pas uniquement  $r = 0$  ou  $r = 1$  mais un mélange des deux Si c’est le cas, l’AS ouvert n’est pas considérée et l’algorithme retourne au niveau 1. Sinon, il passe au niveau 3.

Test 1.3 : la règle du niveau 3 garantit que les ST (la quincaillerie) ne sont pas les seuls à avoir  $r = 1$ . Les articles standards ne sont pas pertinents dans notre cadre car ils correspondent à des articles

de matériel comme les vis, les écrous, les boulons ou les joints. Si seul  $r_{ST} = 1$ , alors l'AS n'est pas considéré, et l'algorithme retourne au niveau 1. Sinon, il passe au niveau 4.

Test 1.4 : règle du niveau 4 : s'assurer que l'AS présente au moins un  $r_{SA/EP/EQ} = 1$  et d'autres références avec  $r = 0$ . Si tous  $r_{SA/EP/EQ} = 0$ , l'AS n'est pas considérée, et l'algorithme retourne au niveau 1. Sinon, il passe au test 2.1.

Règles de décision du Test 2

Test 2.1 : la règle du niveau 2.1 compare la désignation de l'AS avec une liste d'interdiction de mots non pertinents qu'une AS peut contenir. Si sa désignation comprend un mot de cette liste, l'AS n'est pas considérée, et l'algorithme retourne au niveau 1. Sinon, il passe au niveau 2.2.

Test 2.2 : la règle de niveau 2.2 reprend le principe de la règle 2.1 quand  $r = 0$  avec la liste d'interdiction des interfaces.

Test 2.3 : la règle de niveau 2.3 reprend le principe de la règle 2.1 quand  $C = 1$  avec la liste d'interdictions des composants réutilisés.

L'identification des interfaces d'assemblage établit la liste des pièces d'interfaces qui ont permis la réutilisation de composants entre deux appareils assemblés en MMFAL. Cette étape complète ainsi les deux précédentes en présentant notamment les solutions d'assemblage qui ont précédemment permis à deux produits d'être assemblés en MMFAL. La remontée de ces solutions d'assemblage est ainsi prescrite aux équipes de développement comme règles et recommandations lorsque des composants doivent être réutilisés d'un produit à un autre en vue de leur assemblage en MMFAL.

#### *Renforcement des listes d'interdiction*

Cette étape consiste à corriger l'algorithme de notre outil après son premier lancement. L'algorithme ne pouvant fournir des résultats optimaux, une technique de renforcement doit être envisagée pour améliorer la pertinence des interfaces identifiées.

Une liste d'interdictions a ensuite été mise en place lors de l'élaboration des règles de décision. Trois listes ont été mises en place pour augmenter la pertinence des résultats autour des interfaces d'assemblage, des composants réutilisés et des AS. Parmi les interfaces d'assemblage identifiées en premier lieu, certaines s'avèrent être conformes à l'algorithme bien qu'elles ne soient pas des interfaces souhaitées. Il est possible de les reconnaître en utilisant la désignation de l'élément qui ne fait pas référence à une interface. Lorsque cette désignation ne correspond pas à une interface d'assemblage réelle, elle est inscrite dans la liste des interdictions. Le même processus est appliqué aux composants réutilisés non pertinents et aux AS non pertinents.

Dans la section 2.2.2 nous présentons l'axe '**Formalisation des pratiques**' de la méthode DfMMFAL. Celle-ci permet de concevoir des processus à partir de l'identification des composants réutilisés entre deux appareils historiquement assemblés en MMFAL et dont aucunes règles n'avaient été formalisées (Figure 40).

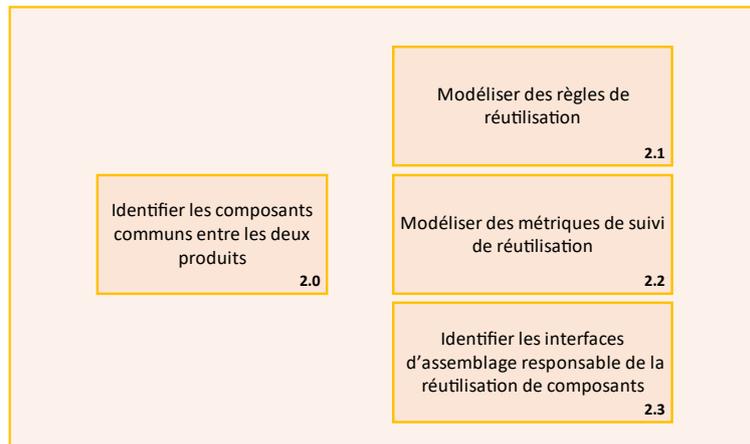


Figure 40 : Résumé de la section 2.2.2

L'utilisation de cette AR (**Étape 2.0**) a permis de mettre en place ces 3 étapes de traitement :

1. **2.1** : associe les **taux de réutilisation** issus de l'AR à chaque **installation fonctionnelle**. **Des règles** sont ensuite **formalisées** à partir de l'analyse de **fiches techniques**.
2. **2.2** : indique comment **orienter la réutilisation** des composants via la mise en place de **métriques de suivi de réutilisation**. La répartition est assurée par les **critères** suivant ; modularité, granularité, zone de montage et installations fonctionnelles.
3. **2.3** : **identifie les interfaces** d'assemblage responsables de la réutilisation des composants via un **algorithme à base de règles** communiquant avec une **liste d'interdiction**.

## 2.3. Hypothèses

La littérature sur la mise en place d'une méthodologie outillée pour la conception de produits compatibles avec une MMFAL étant rare, il est difficile de trouver des processus appropriés pour aider les équipes de développement à concevoir de tels produits. C'est pourquoi, nous avons remonté les contributions allant des systèmes de production jusqu'aux processus de conception amont. À la suite de cet état de l'art, nous avons développé une méthode de DfX que nous appellerons DfMMFAL. Nous émettons donc les deux hypothèses suivantes :

### Hypothèse 1 (H1)

**DfMMFAL permet de formaliser des recommandations techniques pour aider les équipes de développement à concevoir un produit compatible MMFAL.**

### Hypothèse 2 (H2)

**DfMMFAL améliore les échanges entre les processus de conception amont et les systèmes de production.**

Par conséquent, la méthode DfMMFAL doit permettre à des sociétés ayant déjà su assembler deux -ou plusieurs- produits sur une MMFAL de formaliser les solutions employées.

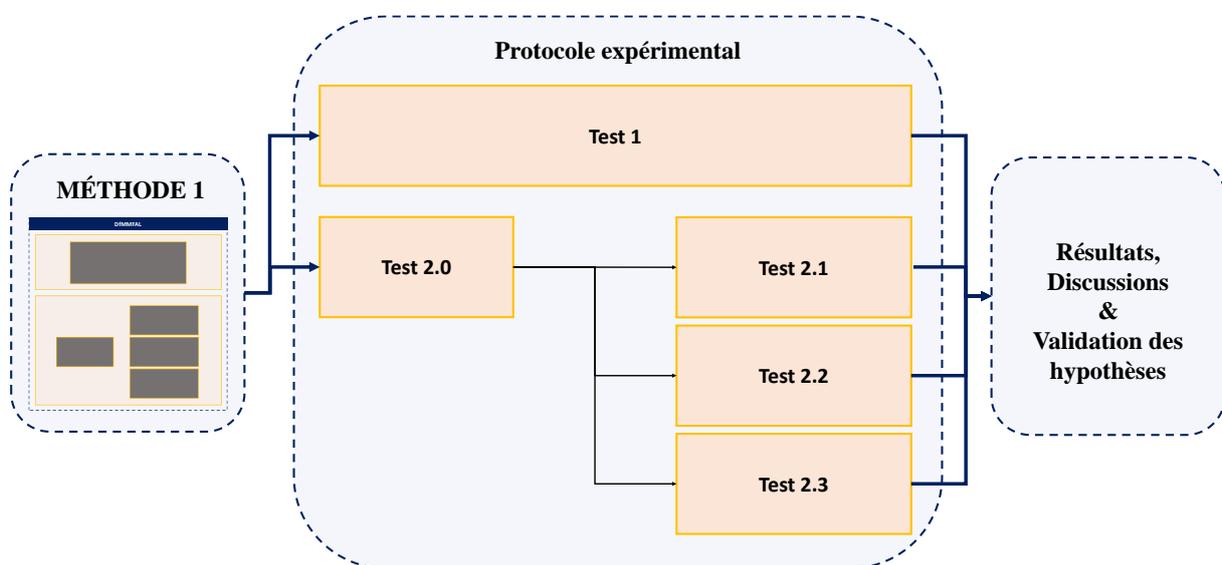


Figure 41 : Protocole de test

Pour le vérifier, nous avons pu tester les étapes de notre méthode DfMMFAL au sein de l'entreprise Airbus Helicopters. Les expérimentations portant sur l'analyse de couples d'appareils assemblés sur une MMFAL nous a permis d'utiliser la méthode afin de vérifier la validité de nos hypothèses. La Figure 41 présente le protocole expérimental avec en entrée la méthode développée et

en sortie une discussion sur les résultats apportés par les expérimentations ainsi que leur évaluation par rapport à nos hypothèses. Le Tableau 6 présente les résultats attendus de l'expérimentation de notre méthode DfMMFAL qui valideront, ou non, nos hypothèses de recherche.

Tableau 6 : Présentations des résultats attendus

	Expérimentations	Objectifs	Hypothèses
Formalisation des connaissances	<p><b>Test 1</b></p> <p>-</p> <p><b>Entretiens</b></p>	<p>Comprendre les spécificités du terrain relatives aux activités de conception, de réutilisation et d'assemblage en MMFAL et tracer un schéma reprenant les phases de développement d'un hélicoptère.</p>	<p><b>H1</b> : À l'issu de cette étape, nous attendons des recommandations techniques et conceptuelles pour combattre les contraintes relatives à l'assemblage en MMFAL et valider l'hypothèse.</p> <p><b>H2</b> : Générer le schéma des phases de développement d'un hélicoptère. Ainsi qu'un schéma représentant le découpage modulaire d'un appareil pour assurer son passage en MMFAL.</p>
Formalisation des pratiques existantes	<p><b>Test 2.0</b></p> <p>-</p> <p><b>Identification des composants communs</b></p>	<p>Identifier les composants communs entre deux produits à partir de leur APP. Remonter les données visibles de l'industrialisation au niveau bureau d'étude.</p>	<p><b>H2</b> : Nous attendons la mise en place d'une analyse pour le bureau d'étude pour identifier les composants réutilisés d'un appareil à l'autre.</p>
	<p><b>Test 2.1</b></p> <p>-</p> <p><b>Modélisation des règles de réutilisation</b></p>	<p>Modéliser des règles de réutilisation à partir des résultats de l'AR croisés avec les installations fonctionnelles.</p>	<p><b>H1</b> : Nous attendons une modélisation de règles génériques, considérées comme des recommandations techniques.</p> <p><b>H2</b> : Nous attendons une mise en évidence des solutions mises en place par le bureau industriel et à destination du Bureau d'étude pour réutiliser des ensembles.</p>
	<p><b>Test 2.2</b></p> <p>-</p> <p><b>Modélisation des métriques</b></p>	<p>Modéliser des métriques multicritères pour orienter la réutilisation dans le découpage d'un nouveau produit et assurer le suivi de la réutilisation lors de sa conception.</p>	<p><b>H1</b> : Nous attendons un ensemble de métriques de suivi.</p> <p><b>H2</b> : Nous attendons un schéma générique orientant le découpage modulaire entre le bureau d'étude et industriel.</p>
	<p><b>Test 2.3</b></p> <p>-</p> <p><b>Identification des interfaces</b></p>	<p>Identifier à l'aide d'un algorithme à base de règles et de listes d'interdiction les interfaces d'assemblage responsable de l'intégration des composants réutilisés.</p>	<p><b>H1</b> : Nous attendons une identification des interfaces d'assemblage par l'algorithme et un traitement efficace des faux positifs.</p> <p><b>H2</b> : Nous attendons une mise en évidence des solutions mises en place par le bureau industriel et à destination du Bureau d'étude pour réutiliser des composants et les intégrer.</p>

## Synthèse du deuxième chapitre

Dans ce deuxième chapitre, nous avons tout d'abord présenté la problématique de recherche issue des constats de l'état de l'art réalisé dans le chapitre précédent. Pour répondre à cette problématique, nous avons présenté une nouvelle méthode qui nous a permis ensuite d'énoncer nos hypothèses de recherche. Ces trois éléments sont résumés dans la Figure 42 présentée ci-dessous.

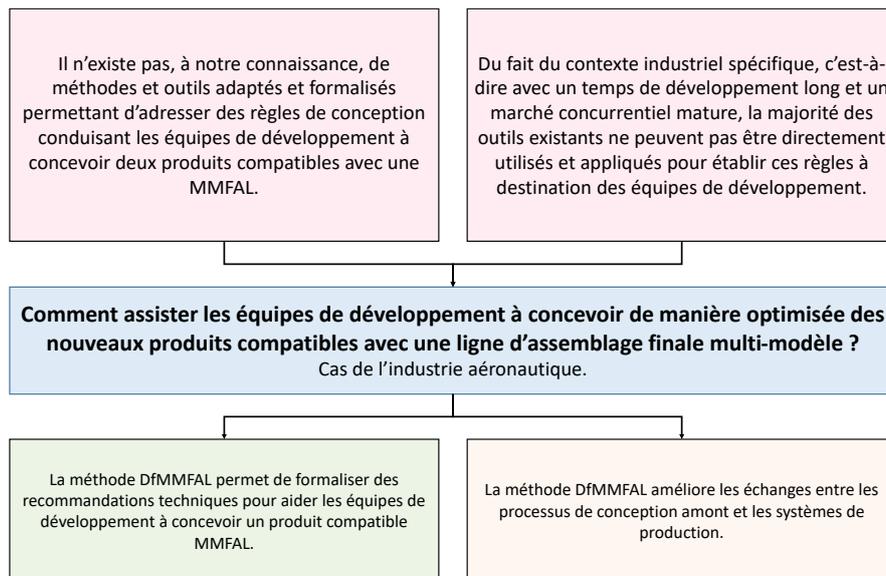
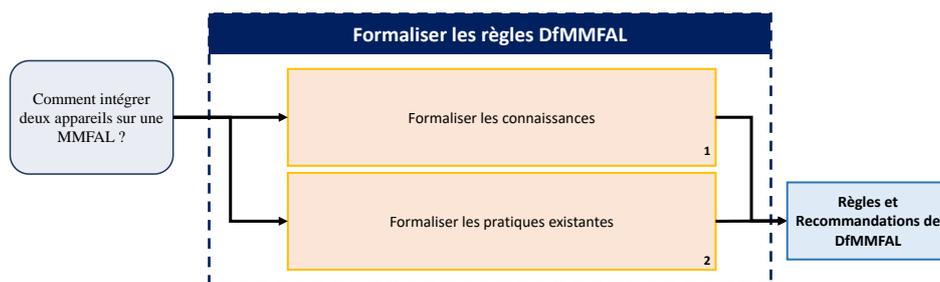


Figure 42 : Résumé des constats de l'état de l'art, la problématique et les hypothèses de recherche

La démarche de résolution utilisée pour répondre à cette problématique a été présentée en Figure 1 et a permis de développer et de tester une méthodologie de **formalisation de règles de DfMMFAL**. Cette formalisation se décompose en **2 axes** (Figure 43) : **formaliser les connaissances** notamment grâce à des **entretiens qualitatifs** qui permettent de comprendre les spécificités du terrain en s'adressant au **bureau d'étude et d'industrialisation** autour de l'architecture produits et industrielle et de la réutilisation de composants. Le second axe, **formaliser les pratiques existantes**, présente **3 étapes de traitement** à partir des résultats de l'AR et qui ont pour vocation la formalisation **des règles DfMMFAL**.





# Chapitre 3

## Expérimentations

## Chapitre 3 : Expérimentations

### Introduction du troisième chapitre

Dans ce troisième chapitre, nous allons décrire les expérimentations liées à la formalisation des règles DfMMFAL. Les entretiens qualitatifs et les cas d'études de nos expérimentations proviennent d'Airbus Helicopters. La Figure 44 ci-dessous décrit la structure de ce chapitre.

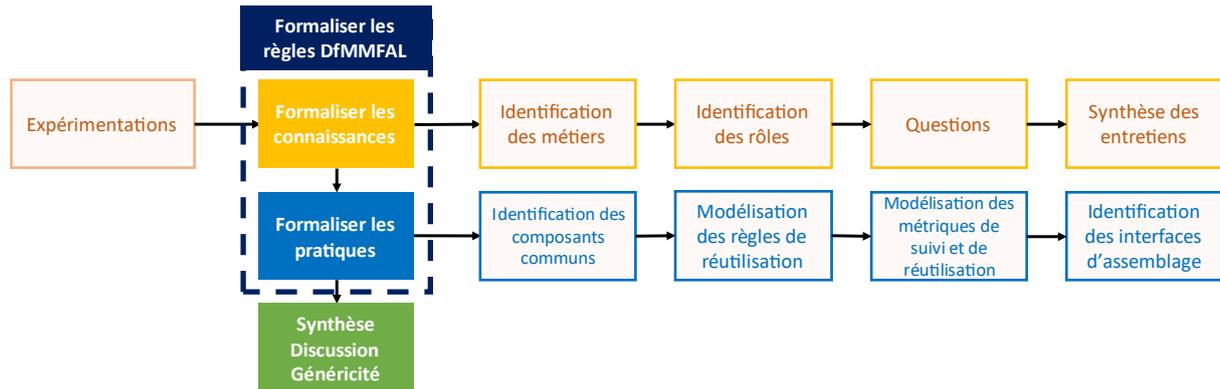


Figure 44 : Structure du troisième chapitre

Le contexte industriel d'Airbus Helicopters a constitué un terrain de cas d'étude adéquat pour tester nos hypothèses de recherche. C'est au sein de la direction de transformation Product Lifecycle Management (PLM) rattachée à la direction des opérations centrales d'Airbus Helicopters que nous avons pu développer et tester notre méthode en comprenant, d'une part, les spécificités du terrain et en expérimentant, d'autre part, les différentes étapes de notre méthode.

Pour la première section, nous avons cherché à formaliser les connaissances issues des recommandations des équipes de développement. Pour cela, une série d'entretiens qualitatifs a été menée. La seconde section vise à tester la formalisation des pratiques, à travers l'expérimentation des 4 étapes de notre méthode. Les cas d'étude qui ont permis ces instanciations sont l'analyse de deux couples d'hélicoptères assemblés en MMFAL.

Les expérimentations étant réalisées dans un contexte opérationnel au sein d'Airbus Helicopters, certaines données confidentielles ne pourront pas être présentées dans ce document. Cependant, nous ferons en sorte de fournir le plus de détails possibles afin de faciliter la compréhension du déroulement de chaque expérimentation.

### 3.1. Étape 1 : Formaliser les connaissances – Expérimentation

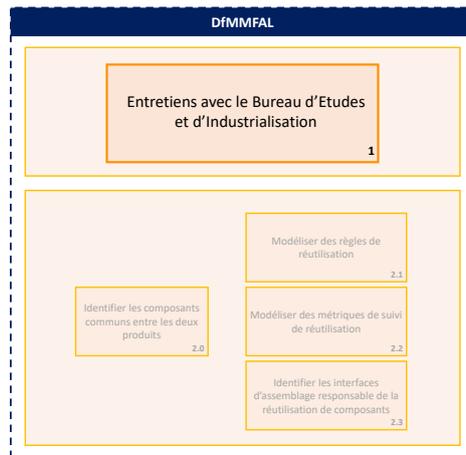


Figure 45 : Schéma de suivi – étape 1

Les entretiens qualitatifs ont deux objectifs. Dans un premier temps il convient de valider à travers l'avis d'experts dans le domaine de l'industrie hélicoptériste que le design modulaire, le design by reuse et l'introduction d'interfaces standardisées favorisent l'assemblage en MMFAL. Ensuite, il s'agit d'obtenir les différents éléments permettant de comprendre pourquoi aujourd'hui il est difficile d'assembler deux hélicoptères sur une MMFAL. C'est pourquoi nous nous sommes adressés à 12 personnes d'expertise différente pour récolter les informations autour de l'ensemble du développement d'un hélicoptère.

Tout d'abord, il convient de présenter l'historique et le principe de l'architecture industrielle et de l'architecture produit chez Airbus Helicopters. Ensuite, le protocole expérimental présenté en Figure 46 détaille le déroulement de la section 3.1.

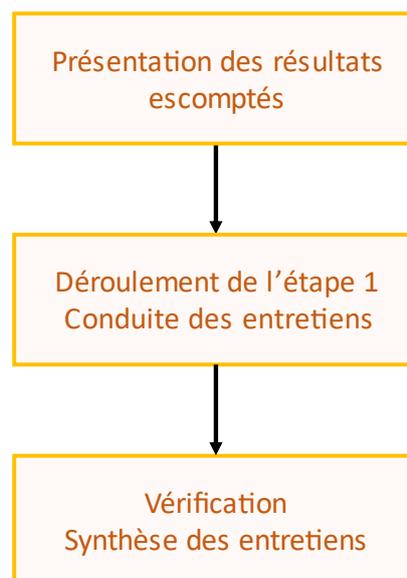


Figure 46 : Protocole expérimental de l'étape 1

## *Historique et principe : Architecture Industrielle*

Pour l'ensemble des architectes industriels, l'architecture industrielle d'un produit est définie par le Modèle Industriel Générique (Generic Industrial Model : GIM). Il a été développé au cours des dernières années et commence à être mis en place. Le H160, dernier né de la gamme Airbus, ne suit pas le GIM entièrement, son développement était déjà lancé lors de l'initiative industrielle. Il a cependant permis au modèle de s'améliorer à travers son expérience.

Avant l'élaboration de ce modèle, la capitalisation n'était que formelle au sein de l'industrie d'après l'Industrial Product Officier (IPO). Aucun référentiel opérationnel de bonnes pratiques voire d'industrialisation n'a été élaboré, il n'y a pas de système de gestion des connaissances. Les spécificités des productions se basaient essentiellement sur l'expérience des contributeurs venant des différents programmes (Tigre, NH90, Dauphin, Légers, Super Puma). Aujourd'hui la séquence d'assemblage générique représente le guide de bonnes pratiques pour assembler un hélicoptère bien que ses recommandations restent à l'échelle macroscopique et ne sont pas détaillées. Il définit un certain nombre d'éléments clés que le futur système de production est censé avoir. Il s'agit d'un modèle qui doit être spécifique à chaque hélicoptère dans la mesure où ils appartiennent tous à une classe de masse différente (légers, médiums et lourds) et dont la complexité est également dépendante de la masse.

Lorsqu'un nouvel appareil est développé, l'architecture industrielle théorique le découpe. Selon la stratégie industrielle, la structure sera positionnée sur le site allemand, la poutre de queue en Espagne et le reste en France, à Marignane. Une fois découpée, l'architecture industrielle peut exprimer son besoin en FAL du nombre de stations, de compagnons par stations (2 à 6 en fonction de la taille de la machine) et la répartition et séquençement des opérations d'assemblage à accomplir en FAL.

Le nouveau modèle industriel prévoit donc un certain nombre de règles à prendre en compte dès les phases amont de la conception d'un nouvel appareil. Ces règles exerceront une influence sur son design et agiront ainsi comme des contraintes pour le bureau d'étude (BE).

## *Historique et principe : Architecture Produit*

L'architecture produit possède plusieurs facettes, du point de vue de l'industrie, elle représente son découpage en MCA/CA, son découpage physique, d'après un ingénieur en chef. D'un point de vue de design, elle adresse d'autres éléments. L'architecture globale de la machine définit aussi la technologie de la structure qu'elle utilise, elle peut être en tôles raidies avec cadre, en sandwich métallique avec nid d'abeilles ou en composite. C'est à partir de cette structure que sont développées les différentes installations qu'elle portera. Elle définit également des éléments comme le nombre de pales (quatre ou cinq), la présence d'un fenestron (carénage autour du rotor anti-couple), la

technologie de la boîte de transmission utilisée, l'utilisation de patins ou de trains d'atterrissage, trains fixes ou rentrants. Ce sont les premières questions d'architecture produit que se pose un BE. Elle adresse également des éléments au niveau de différentes boucles d'architecture. Différentes solutions sont étudiées ; par exemple la manière dont les moteurs sont montés, en position centrale avant ou arrière, avec des commandes de vol électriques ou classiques. C'est la responsabilité du BE d'y répondre entre les phases d'exploration et de faisabilité. Plus tard au cours du développement de la machine, son architecture produit est détaillée et l'appareil est découpé en SA, MCA et CA.

Contraintes : Les différentes technologies utilisées jouent un rôle important dans la suite du développement de l'appareil. Si bien que cela représente une contrainte dans le cas où deux appareils n'utilisent pas la même.

Partager la même architecture produit est aussi important que l'architecture industrielle pour faciliter le passage de deux appareils sur la même FAL. Cependant des divergences demeurent entre les différents appareils de la gamme. Les contraintes responsables de ces divergences seront exposées dans cette partie.

### 3.1.1. Résultats escomptés

Ces entretiens semi-directifs, d'un temps moyen de 70 minutes, sont réalisés auprès d'ingénieurs de BE et du bureau industriel (BI) en abordant trois thématiques : l'architecture produit, l'architecture industrielle et la réutilisation. Cette synthèse vise à répondre à deux questions principales :

- *Pourquoi n'arrive-t-on pas à assembler 2 appareils sur la même chaîne d'assemblage finale ?*
- *Pourquoi n'arrive-t-on pas à faire du design by reuse aujourd'hui ?*

À travers leurs réponses, on essaye de comprendre la complexité de l'hélicoptère et de son industrie et pourquoi il est difficile d'assembler deux hélicoptères sur une MMFAL. Aussi, le principe de réutilisation d'éléments entre programmes, et d'un hélicoptère à l'autre, est un élément essentiel dans l'industrie pour assembler deux produits sur une même MMFAL. Il est intéressant de se questionner sur l'utilisation du *reuse* de modules, de sous-ensemble ou de pièces dans l'industrie hélicoptériste et pourquoi il est si difficile d'appliquer ce principe lors du développement d'un nouveau produit.

À l'issue des entretiens sont attendus 2 apports : un schéma reprenant les différentes phases de développement d'un hélicoptère ainsi qu'un tableau de synthèse des contraintes identifiées et les règles et recommandations correspondantes pour les lever.

### 3.1.2. Déroulement de l'étape 1

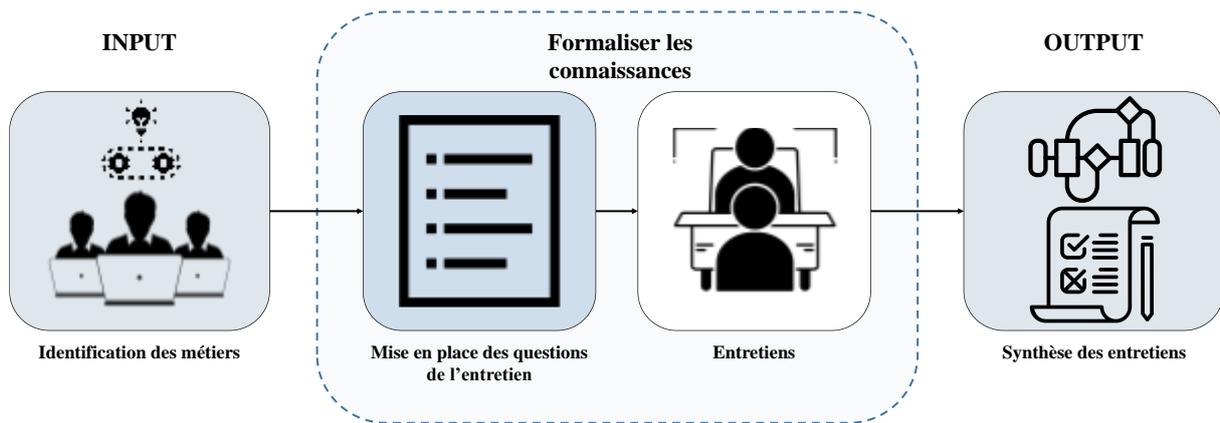


Figure 47 : Rappel de la démarche de l'étape 1

Les acteurs responsables du développement d'un appareil sont identifiés au sein de deux organisations. Le BE (Organisation de Conception) et l'industrie (Organisation de Production), voir Tableau 7.

Tableau 7 : Tableau des métiers interviewés

Bureau d'étude	Bureau d'industrialisation
Ingénieur en Chef (Chief Engineer – CE)	Architecte Stratégie Industrielle
Squad Leader	Chef de Produit Industriel (Industrial Product Officer – IPO)
Ingénieur Design de Structure (Structure Design Engineer)	Architecte Industriel de Test
	Architecte Industriel de Produit

En ce qui concerne le BE, nous avons commencé par l'ingénieur en chef qui est le responsable du développement d'un appareil. Il renvoie ensuite les entretiens au Squad leader, qui est chargé de converger les différents systèmes à intégrer dans l'appareil puis à l'ingénieur en charge de cette intégration (Structure Design Engineer - SDE). Au sein de l'industrie, on retrouve l'Architecte en Stratégie Industrielle qui développe le Modèle Industriel pour les appareils à venir. L'IPO, l'ingénieur en chef de l'industrialisation est responsable des activités opérationnelles du développement et son équipe d'architectes industriels applique le modèle industriel.

Trois thématiques sont distinguées dans la seconde partie : les phases de développement, l'architecture produit ainsi que l'architecture industrielle. Les différentes questions posées durant l'entretien sont réparties dans ces thématiques (voir Annexe 1). Premièrement le questionnaire vise à faire l'état de l'art industriel du développement d'un nouvel appareil dans l'entreprise, quels sont les acteurs principaux concernés, leur rôle et leurs interactions avec les différents métiers. C'est donc une phase de compréhension qui vise à mieux cerner la méthodologie de

conception actuelle d'un appareil. Une fois comprise, il est nécessaire de récolter des informations sur les irritants lors d'un développement qui empêchent l'élaboration d'un design compatible sur une ligne d'assemblage finale multi-modèle. Des questions sur les raisons des différences d'architecture industrielle ou produit sont alors posées. Aussi, des questions sur le *reuse*, principe de réutilisation de composants d'un programme à l'autre, visent à répondre à la problématique de son utilisation lors du développement d'un hélicoptère. Enfin, la dernière partie consiste à faire la synthèse de ces entretiens. Le Tableau 8 présente les postes occupés par les douze employés interviewés, leur expérience dans le domaine de la conception ou l'industrialisation ainsi que la durée de leur entretien.

Tableau 8 : Positions et expériences des employés entretenus et durée de leurs entretiens

Répondant	Rôle du répondant dans l'entreprise	Expérience professionnelle	Durée de l'interview (min)
1	Ingénieur en Chef	Ingénieur bureau d'étude	110
2	Head of Product Policy & Architecture	Ancien ingénieur en chef	
3	Expert Aircraft Architect	Carrière entière sur l'architecture produit	55
4	Expert Aircraft Architect	Carrière entière comme ingénieur intégration machine et architecte hélicoptère	
5	Squad Leader Center Fuselage design	Ingénieur bureau d'étude	117
6	Structure Design Engineer	Ingénieur bureau d'étude	51
7	Industrial Test Architect	Carrière entière comme Ingénieur production et architecture industrielle	46
8	Industrial Product Officer Deputy	Team Leader ingénieur production et architecte industriel	58
9	Manufacturing engineering industrial architect	Ingénieur architecture industrielle, stratégie industrielle	55
10	Manufacturing engineering industrial strategy	Ingénieur architecture industrielle, stratégie industrielle	56
11	Head Of IPO	Architecte industriel, Industrial Product Officer (IPO) et chef de ligne d'assemblage final	52
12	Head Of Methods Blades	Architecte stratégie industrielle, bureau d'étude, production	91

### 3.1.2.1. Identification des métiers

Dans un premier temps il convient de présenter les métiers des employés ayant acceptés de répondre aux entretiens. On dissocie alors deux corps de métiers, les ingénieurs du BE ainsi que les ingénieurs de l'architecture industrielle. Parmi les ingénieurs du BE, on retrouve des ingénieurs en chef de programme, des Squad leader, designers et architectes produit. Côté industrie, on retrouve les architectes industriels et tests industriels ainsi qu'un IPO. Dans cette partie, il est intéressant de

préciser le rôle de chacun dans le processus de développement d'un nouvel appareil, ainsi que leur périmètre d'action tout au long du développement Figure 48.

Bureau d'étude		Bureau d'industrialisation	
Rôle	Interactions avec les autres métiers	Rôle	Interactions avec les autres métiers
<i>Ingénieur en chef (CE)</i>		<i>Architecte stratégie industrielle</i>	
Responsable du développement d'un appareil	Compromis entre exigences programme et contraintes de développement	Développe le modèle industriel	Définit l'architecture industrielle pour les appareils à venir
<i>Squad leader</i>		<i>Industrial Product Officer (IPO)</i>	
Converge les différents systèmes à intégrer dans l'appareil	Récupère les compromis émis par le CE et les répartit aux SDE	Responsable des activités opérationnelles du développement	Compromis entre exigences programmes et contraintes de développement
<i>Structure design engineer (SDE)</i>		<i>Architecte industriel test</i>	
Converge les interfaces des différents systèmes	Entame la conception CAO des systèmes dans la structure	Engage la conformité de la machine	Adresse les exigences au BE
		<i>Architecte industriel produit</i>	
		Applique le modèle industriel	Trouve les compromis avec les contraintes de design

Figure 48 : Métiers et fonctions

### 3.1.2.2. Identification des rôles

#### Ingénieur en chef

Son rôle est de trouver le meilleur compromis sur un appareil entre les différentes contraintes de développement et d'assurer la meilleure valeur ajoutée pour le client conformément à ses besoins. Il est la voix du client au sein des différents métiers du BE. L'ingénieur en chef travaille avec une équipe d'ingénieurs du BE. Ces derniers sont spécialisés par métiers. Leurs objectifs sont de faire le meilleur produit technologique. Cependant le meilleur produit technologique peut entraîner une sur-qualité, pas nécessaire aux besoins du client. Il y a donc un besoin de compromis à faire entre les coûts, les apports opérationnels et les contraintes de développement de façon à soutenir l'appareil durant sa durée de vie et sa production.

Lorsque l'appareil entre en développement, le rôle de l'ingénieur en chef devient plus opérationnel et devient responsable jusqu'à la certification. L'architecture de la machine n'est plus remise en cause : tous les grands équilibres en termes de masse, d'allocation d'espace, de volume sont définis. Il pilote pour s'assurer que le programme se déroule suivant le planning, dans les délais et les coûts qui ont été prévus pour remplir les exigences de la spécification définies lors de l'entrée en développement.

#### Squad Leader

Le BE est constitué de petits groupes autonomes autour d'un périmètre d'action appelés *Squads*. Le rôle d'une *Squad* est de récupérer le travail de la part des systèmes et de l'intégrer

physiquement dans la machine. Ces petits groupes sont synchronisés au niveau global de la machine pour concevoir, produire et exécuter les contrats du programme. Les groupes sont constitués de 7 à 10 ingénieurs avec une lettre de mission (avec données d'entrée et livrables) définie sur un temps imparti.

Le rôle du Squad Leader est de faire en sorte d'intégrer à l'intérieur du véhicule les différentes architectures et installations possibles. Au niveau de la *Squad* son rôle est de permettre à chacun dans l'équipe d'avancer sur ses sujets en se concentrant sur la convergence technique du système qu'elle développe et non en fonction du métier voisin. Dans chaque *Squad* ce n'est pas au leader de décider, mais à chacun des concepteurs de disposer de ce dont il a besoin pour avancer. Cela permet à toute l'équipe d'avancer ensemble et non séparément.

Cependant, pas 100% des métiers ne sont adressés aux *Squads*. Le module de climatisation (ECS) par exemple ne fait partie d'aucune *Squad* bien qu'il possède des interfaces aux frontières de la *Squad* « Véhicule, intégration des équipements » au sein du véhicule.

#### Structure Design Engineer :

Son rôle est d'assurer la convergence des interfaces entre les différents métiers. C'est la première étape. Il reçoit les répercussions et est tributaire des études des autres métiers (métier = BE). Comme il intègre les systèmes dans la machine, c'est lui qui reçoit les interfaces alors qu'il n'en émet pas. Avant de recevoir les interfaces il va s'assurer avec les différents métiers que leurs solutions techniques avec leurs répercussions sur la structure soient réalisables. Une fois que la convergence des systèmes et leur intégration machine est faite, le travail consiste à réaliser la 3D sur un logiciel de CAO ici, Catia® de Dassault System®). Une grosse partie du travail est faite en interne, mais il y a également la possibilité de la faire en sous-traitance. Il y a donc également un volet de gestion de la sous-traitance, de design 3D, mise en plan 2D et de certifs associés aux designs dans la fonction d'un SDE.

#### Industrial Product Officier

L'IPO est le représentant des activités opérationnelles de production d'un développement de programme. Il est l'un des 3 piliers sur le plateau programme. Il y a l'ingénieur en chef en charge de la définition du produit. Il y a l'IPO en charge de la définition du système de production. Enfin il y a le Product Support Officer (PSO) en charge du support du système (Figure 49). Au-dessus on a le chef de programme qui s'occupe de toutes les parties externes du programme. En général l'IPO est aussi celui qui est responsable des représentations de coûts récurrents de production. Dans toutes les décisions de design, il est celui qui maintient les coûts de production tels qu'ils sont définis par le programme, là où l'ingénieur en chef maintient une masse et des performances définies par le

programme. Enfin le PSO maintient les coûts de maintenance directs et les heures de maintenance tels qu'ils sont définis.

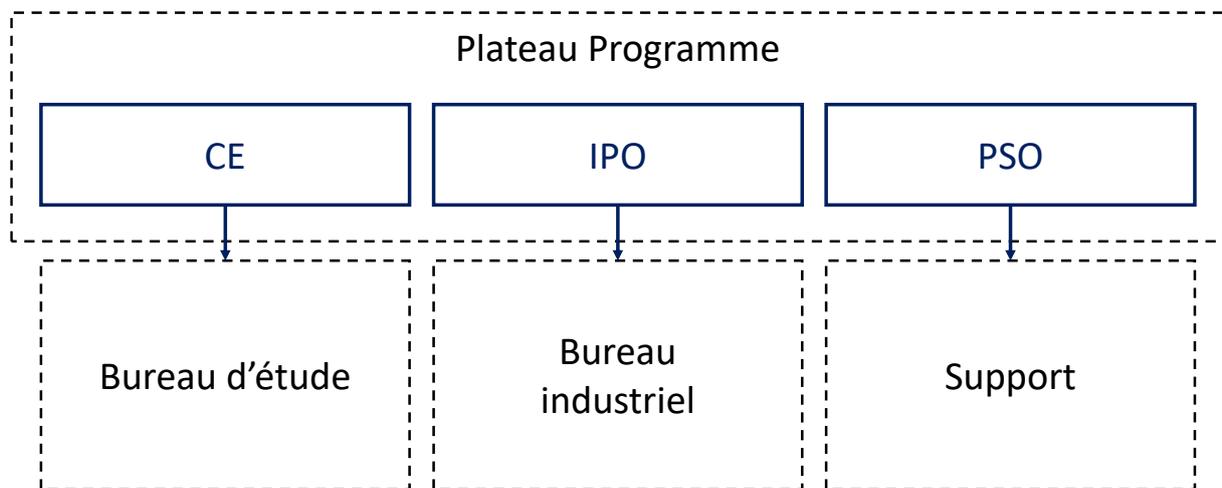


Figure 49 : Organigramme du plateau programme

Lorsqu'un appareil est en développement, son équipe d'architectes industriels s'assurent de soutenir le design en termes de coûts et de productibilité. L'application du process de design de la valeur ajoutée est clé dans cette phase pour s'assurer qu'on ne développe pas uniquement un appareil dont les performances ne se mesurent pas qu'avec la masse mais aussi avec sa capacité à être sérialisé tout en étant raisonnable en termes de coûts de production et donc de marge pour Airbus Helicopters. Dans les phases finales de conception, il a la charge d'implémenter le système de production configuré, la FAL, et également de coordonner les activités MCA comme celles des composants.

#### Architecte industriel (incluant « stratégie » et « de test »)

L'architecte industriel intervient à partir de l'entrée en développement du produit, lorsqu'il faut rendre le Modèle Industriel concret. Sa mission principale est de concevoir les moyens de production les plus performants (Coûts récurrents, cycle, Time to Market). Pour réussir à obtenir cette efficacité, il met en application le Modèle Industriel. Il est mis en contact des designers lors des phases de pré-développement pour trouver le bon compromis entre leurs différentes contraintes. On retrouve comme contraintes, une contrainte de design, de masse, de performances et de performance industrielle ainsi que la capacité à assembler correctement en termes d'ergonomie, de qualités, de coûts et de délais. Il s'assure que les solutions de design soient facilement montables et testables.

Il spécifie les contraintes au quotidien auprès du BE et des architectes. L'objectif est de convaincre le BE de dessiner une pièce de telle façon qu'elle permet d'avoir un gain non négligeable lors de son assemblage en FAL en termes de qualité, coût et délai. La stratégie d'un architecte est de faire les bons compromis afin d'optimiser les temps et donc les coûts d'assemblage en visant le cycle d'assemblage le plus court, optimisé et approprié. Le plus cours car plus le cycle d'assemblage est

cours, plus le WIP (en-cours de fabrication) est faible (immobilisation financière de la machine). Si un appareil reste cinq semaines en FAL, le capital est dépensé tout au long de ce cycle et ce n'est qu'au terme de ce dernier, lorsque la machine est vendue, qu'il y a une rentrée de cash-flow.

### Architecte Industriel Test :

Ici le test engage la conformité de la machine. Il y a 4 différentes familles de tests : essais de certification, de qualification, de production et de levée de risques. L'architecte industriel de test gère les essais de production et de levée de risques. Ces essais sont effectués sur chaque appareil en vue de démontrer la conformité à la certification (les deux premiers sont réalisés pour certifier le produit). Son objectif est de faire un appareil dit « facile à tester ». Il intervient dans le développement d'un appareil durant la phase de pré-développement jusqu'à la phase de l'entrée en service. C'est pendant le pré-développement qu'il adresse ses exigences au BE afin de construire un design adapté.

### Architecte Stratégie Industrielle :

Contrairement aux architectes industriels répartis dans les différents programmes, son périmètre est plus en amont autour de la recherche et développement (R&D). Le but est de mettre en lumière les différentes contraintes industrielles connues pour les anticiper et les résoudre le plus tôt possible. Il travaille aussi au déploiement d'une architecture industrielle générique type qui puisse être appliquée par tous les programmes futurs.

### Synthèse

Le rôle des acteurs responsables du développement d'un nouvel appareil nous a permis de découvrir les premières contraintes rencontrées au cours de ce développement.

On retrouve ainsi les besoins du client, qui dimensionnent la taille, les performances et les missions de l'appareil développé. On retrouve également du côté de l'industrie les contraintes d'essais qui doivent être prises en compte lors du design des différentes solutions de l'hélicoptère ainsi que les contraintes liées à la performance industrielle de l'appareil. En effet ces contraintes ont un impact sur la conception de ce dernier.

À travers les réponses apportées autour de l'architecture produit et industrielle, de nouvelles contraintes nous aideront à comprendre pourquoi dans l'industrie hélicoptériste, il est compliqué de développer un design compatible avec une MMFAL.

Les différents métiers rencontrés nous ont permis de découvrir le rôle du BE et de l'architecture industrielle au cours du développement d'un nouvel hélicoptère. Bien que ce processus de développement n'ait pas encore été éprouvé avec la naissance d'un nouvel appareil, le retour d'expérience du développement du H160 a permis de l'étayer et d'en ajuster certains aspects, surtout

au niveau de l'architecture industrielle. La Figure 50 résume l'état de l'art des interactions des différents acteurs du développement d'un nouvel appareil en fonction de ces phases de développement.

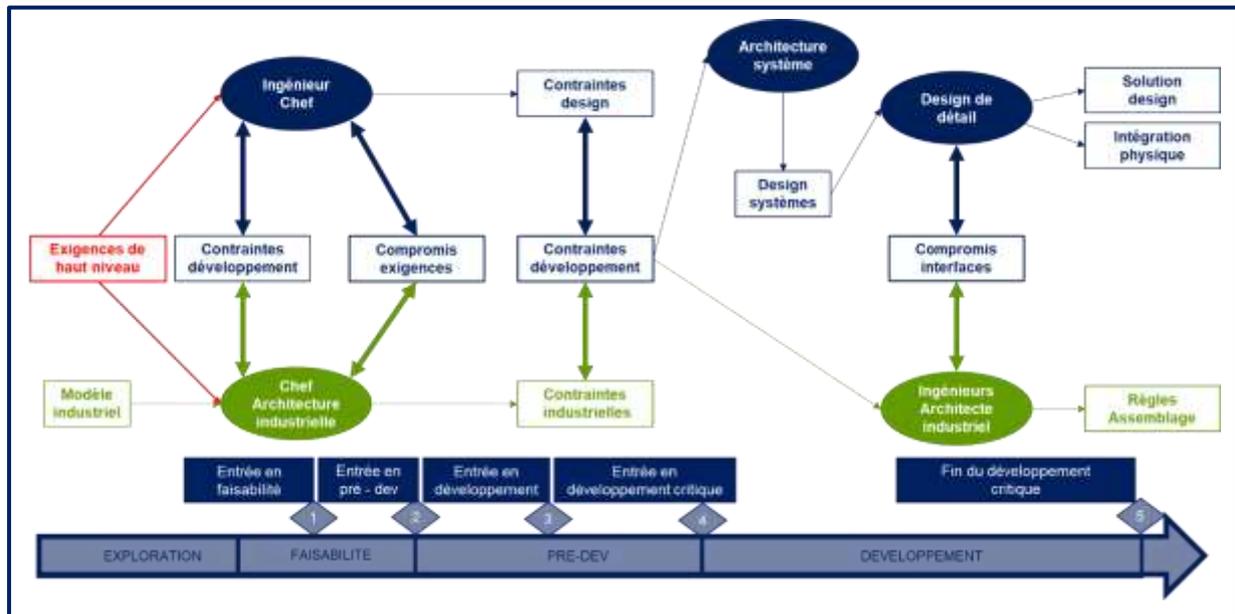


Figure 50 : Processus de développement d'un nouvel appareil entre le Bureau d'étude et l'architecture industrielle

### 3.1.2.3. Questions

#### Questions relatives à l'architecture industrielle

Aujourd'hui lorsqu'un hélicoptère est développé, il ne s'agit pas de développer uniquement la machine mais également son moyen de production. Des questions sont alors posées quant aux performances du moyen industriel qui produira les machines pendant les dizaines d'années à venir. On définit alors le modèle industriel qui générera les règles de Supply Chain, de production, d'assemblage et de tests qui seront appliquées à différentes phases pendant le développement de cet appareil. Dans cette partie il convient d'expliquer le rôle de l'architecture industrielle dans le développement d'un hélicoptère et quels sont les différents critères qui le définissent. Partager la même architecture industrielle est important pour faciliter le passage de deux hélicoptères sur la même ligne d'assemblage finale car il influence directement le design des interfaces de la machine ainsi que la manière dont il sera produit. Il est donc important de comprendre pourquoi les architectures industrielles des anciens programmes sont toutes différentes.

Comment le modèle industriel influence-t-il le design ?

Selon l'architecte en stratégie industrielle, le Modèle Industriel Générique prévoit une structure d'assemblage standard pour tous les appareils. Il décrit comment doit être découpé l'appareil

ou quelles interfaces doivent être disponibles. Sans ces exigences, le BE pourrait ne pas aller dans la même direction. Ainsi, il prévoit de découper l'appareil en plusieurs modules appelés MCA et CA. Chaque site d'Airbus Helicopters a la responsabilité d'un MCA telle qu'il est décrit dans le modèle industriel.

Les contraintes de la stratégie industrielle interviennent dès la phase d'entrée en développement du produit. D'après l'ingénieur en chef, il est important que ces contraintes soient visibles le plus en amont possible et sur les spécifications de l'appareil qui seront cascadées en exigences spécifiques. Petit à petit alors que la phase d'intégration des installations dans la machine avance, le niveau d'architecture globale de la machine est à un stade avancé et certains choix sont déjà liés à l'outil industriel qui sera mis en place plus tard dans le développement de l'appareil.

Le H160, d'après son ingénieur en chef, a depuis la phase de développement préliminaire été découpé par le modèle industriel. Ce découpage se traduit par l'apparition des différents MCA et CA (Major Components Assembly/Components Assembly) assemblés et testés dans les différents sites industriels d'Airbus correspondants. Puis lors de la phase suivante, entrée en développement des composants critiques, il est figé. En fait même si la prise en compte du découpage en MCA/CA est faite en amont, les designers du BE eux, découvrent le modèle industriel lors de l'entrée en développement général, c'est à ce moment-là que les architectes industriels découpent les CA.

Aussi, selon l'architecte en stratégie industrielle, son équipe, qui n'est pas rattachée aux programmes, mène aussi des projets de recherche sur des briques technologiques spécifiques qui seront appliquées sur les prochains programmes. C'est cette équipe qui décide, dans le cadre du modèle industriel, du *Make or Buy*, s'il faut acheter un équipement ou installation de manière complète ou pas.

Le découpage industriel prévoit donc de spécialiser les différents sites en France, en Allemagne et en Espagne en fonction des modules de l'appareil. Ainsi ces sites sont responsables de leur module et une fois en FAL ces derniers sont équipés et testés. Il est désormais intéressant d'étudier quels sont les critères qui ont menés à ce découpage grâce à la question suivante.

Quels sont les critères qui influencent ce découpage industriel ?

Selon l'architecte en stratégie industrielle, les meilleures pratiques de chacun des programmes ont servi à créer les sous-assemblages les plus régulièrement utilisés sur les appareils, comme l'ensemble train d'atterrissage ou la poutre de queue préassemblés. Les critères étaient essentiellement portés sur le partage du travail entre les différents sites d'Airbus, en France, en Allemagne et en Espagne et leur spécialisation. En effet, historiquement chaque site est spécialisé dans un domaine couvrant un module de l'appareil : la transmission à Marignane, les pâles au Bourget, le fuselage central en Allemagne et la poutre de queue en Espagne. Cependant, selon un architecte industriel, il

existe aussi des critères techniques tels que les tests d'étanchéité qui, par exemple, ont lieu avant les grands essais au sol pour éviter d'endommager en cas de fuite le matériel non étanche. Le montage des moteurs a lieu le plus tard possible à cause de leur coût. Comme les moteurs, les extincteurs sont également montés en fin de FAL car leur durée de vie est limitée. La poutre de queue est aussi montée le plus tard possible pour contrôler l'encombrement de l'appareil dans l'atelier. Enfin, la plupart des possesseurs de flotte d'hélicoptères sont aujourd'hui des *leasers* et demandent d'installer les optionnels le plus tard possible car ils ne savent pas encore quels clients utiliseront les machines pour quelles missions. En fait des critères d'encombrement, de durée de vie, de pré-équipements logistiques ou de sur-qualité sont aussi contraignants pour assurer le découpage industriel.

Cependant, d'après l'IPO, le plus gros guide du découpage industriel est de pouvoir paralléliser les activités de production. Il s'est avéré être plus rapide d'opter pour une approche séparée avec une poutre de queue équipée et testée, un fuselage, des réservoirs et un cockpit assemblés en parallèle dans les différents sites dédiés et spécialisés. Par exemple sur le H135, il n'est possible de travailler dans la machine qu'à 3 ou 4 personnes. Si on sépare les différents MCA, il est possible de dédier 10 personnes en parallèle. Ainsi le *lead time* est réduit, mais aussi l'accessibilité et les conditions ergonomiques.

Cela dit, le besoin est que chaque MCA et CA doivent être entièrement équipé lorsqu'ils sont assemblés dans la machine, ce qui engendre quelques défis. La réduction du *lead time* n'est pas la seule conséquence de l'assemblage des MCA en parallèle. En effet, selon l'architecte en stratégie industrielle, le concept de MCA diminue également la variation de la charge de travail à gérer sur une MMFAL car la diversité est gérée en amont et chaque module arrivent prêt à être assembler sur la machine.

Certains critères ayant influencé le découpage industriel apparaissent comme des contraintes de développement. Cependant, d'autres critères, comme la spécialisation des sites apparaissent comme des règles et recommandations. Il convient maintenant de se demander si tous les appareils possèdent le même découpage industriel et donc une architecture industrielle commune faciliterait-il leur passage dans une ligne d'assemblage finale multi-modèle ?

Une même architecture industrielle facilite-t-elle un passage en MFAL ?

Un développement part rarement d'une feuille blanche. Si le but est d'assembler deux appareils sur une même ligne d'assemblage, les contraintes ne sont pas uniquement de design, même pour un ordre de tonnage à peu près similaire. Quand bien même l'architecture industrielle est commune, la ligne doit également être flexible. Partager la même architecture industrielle peut faciliter le passage en MFAL mais ne le permettra pas.

Avoir une ligne plus flexible ici signifie que la charge de travail à fournir sur une machine pour l'assembler doit être équivalent entre les différents modèles explique le responsable méthode de la fabrication des pâles. Le but est que toutes les X semaines, les stations doivent avoir terminé la charge de travail qui leur est alloué pour recevoir la machine suivante.

Il y aura forcément une petite perte sur un des deux appareils, en effet l'un sera plus lourd que l'autre et sa charge de travail plus importante. La ligne sera réglée sur son *takt-time*<sup>3</sup>, le plus gros. En attendant les compagnons qui auront fini de travailler sur l'appareil avec le petit *takt-time* pourront aussi intervenir sur des opérations d'assemblage sur la grosse. Des études internes ont montré qu'une latitude existe pour assurer la compatibilité de deux appareils sur la même FAL. En effet, tant que la différence de charge de travail entre deux appareils différents n'excède pas les 20%, l'industrialisation est capable d'assurer la compatibilité sur une MMFAL selon l'architecte en stratégie industrielle.

Si deux appareils différents présentent la même architecture industrielle, il est possible donc, en respectant certaines règles d'assembler ces deux hélicoptères sur la même FAL. Cependant on constate que les architectures industrielles des programmes actuels sont soit inexistantes soit différentes. Il est donc naturel de se demander pourquoi.

Pourquoi les architectures industrielles sont différentes entre plusieurs hélicoptères de la gamme ?

Avant l'apparition du modèle industriel, toutes les architectures industrielles étaient différentes par le biais de contraintes étatiques ou contractuelles. Ces contraintes représenteront toujours une menace dans l'application théorique du modèle industriel.

En effet lors du développement des précédents appareils, des contrats de coopération ont souvent été signés. D'après un architecte industriel, ces contrats impliquent un découpage industriel très spécifique aux termes de chacun d'eux. Un hélicoptère issu d'une collaboration européenne voit sa charge de travail répartie en fonction de l'implication de chaque état. Si un état décide de s'impliquer deux fois plus, il n'est pas impossible qu'il réclame également deux fois plus de charge de travail et ainsi perturber le modèle industriel de l'appareil en réduisant la charge des autres pays.

Selon cet architecte, il arrive que le développement se fasse en partenariat avec un autre constructeur, c'est une contrainte qu'il faut également prendre en compte. Le drone VSR700 présente un vecteur aérien qui n'est pas issu du modèle industriel. En effet le drone est basé sur l'architecture produit du Cabri G2. La structure et la turbine sont livrées par des fournisseurs à Hélicoptères Guimbal. L'industriel produit la mécanique et le rotor et assemble sa machine dans ses ateliers. Dans ces cas-là, le travail est partagé et le modèle industriel n'a plus la main sur certaines parties du projet, il est donc difficile d'appliquer la même architecture industrielle entre 2 appareils, l'un présentant ces

---

<sup>3</sup> Le *takt-time* est le temps de cycle. C'est le temps utilisé par chaque station pour effectuer la charge de travail.

contraintes et l'autre issu d'un développement interne Airbus. Si en revanche il n'y a pas de contraintes d'*offset* particulières au départ d'un programme alors le modèle est appliqué et pour tous les développements futurs. Ce qui faciliterait le passage en MFAL des appareils.

L'architecte en stratégie industrielle ajoute que l'architecture industrielle est également différente car elle dépend fortement de l'architecture produit qui s'avère être toujours différente d'un hélicoptère à un autre. Certes un hélicoptère est toujours pourvu d'un rotor, de pâles et de turbines mais ces éléments n'ont en revanche jamais été découpés en MCA/CA. Chaque programme développait son produit sans architecture générique. Dû à ce manque, certaines installations n'étaient pas montées au même endroit dans la machine, en résultait un déséquilibre des masses et centrage (Performances cruciales pour un hélicoptère). Lorsque les masses n'étaient pas centrées, certaines installations étaient reculées ou avancées le long de l'appareil ainsi les localisations des installations variaient suivant sa mission entre deux machines du même modèle. Le H160 est le premier appareil à être pourvu d'une architecture industrielle. Il est donc le seul appareil de la gamme industrialisé en vue d'une production en série.

Résumé des différentes contraintes, règles et recommandations :

Contraintes :

L'architecture industrielle nous a appris que plusieurs types de contraintes empêchent les équipes de développement de concevoir un design compatible avec une MFAL. Le choix tardif des équipements de missions par le client est une des contraintes que rencontrent à la fois l'industrie et le design dans l'élaboration d'un design compatible avec une MFAL. On retrouve également la différence de charge de travail entre deux appareils à la masse maximale au décollage de l'appareil (Maximum Take Off Weight – MTOW) différente sur une MFAL. La mesure du MTOW sert à classer les aéronefs. Enfin lorsqu'un appareil est développé avec l'aide d'un industriel extérieur ou d'un état, des choix peuvent être imposés au constructeur représentant ici aussi, une contrainte.

Règles et recommandations :

Cette partie met en lumière certaines règles et recommandations permettant de faciliter cette compatibilité en MFAL. Aussi, la visibilité précoce des exigences du modèle industriel permet à l'organisation de design de mieux les lever et ce plus facilement. Respecter le modèle industriel et paralléliser l'assemblage des MCA a pour conséquence de diminuer le lead time de l'assemblage en ligne finale d'une part mais également l'écart de charge de travail entre les deux appareils au MTOW différent. Cet écart doit aussi respecter un différentiel de 20% afin d'assurer un assemblage des deux appareils sur la MFAL. Quand bien même l'écart de *workcontent* est diminué et de l'ordre de 20%, il est finalement nécessaire de régler le *takt-time* de la MFAL sur celui de l'appareil au MTOW supérieur.

L'architecture industrielle, telle que définie par le Modèle Industriel Générique vise à organiser l'industrialisation et la production d'une machine dès les phases amont de la conception d'un appareil. Suivre le modèle industriel n'est pas l'unique critère qui permet d'obtenir une architecture industrielle similaire. En effet, un hélicoptère est également défini par son architecture produit, c'est-à-dire la façon dont il est conçu et les technologies qu'il intègre.

### Questions relatives à l'architecture produit

L'assemblage d'un hélicoptère est défini par son architecture industrielle, sa conception, par son architecture produit. Cette architecture représente le squelette autour duquel sont développés l'appareil et ses différents systèmes. Il définit alors sa technologie, la solution apportée pour répondre au cahier des charges ainsi que la localisation des différentes installations à bord.

Une même architecture produit facilite-t-elle un passage en MFAL ?

D'après l'architecte en stratégie industrielle, deux hélicoptères partageant la même architecture produit sont deux appareils dont les installations sont intégrées aux mêmes localisations dans la machine. Ce sont des installations qui utilisent donc des interfaces communes. Que le poste de pilotage soit deux fois plus grand d'un appareil à l'autre ne pose aucun problème d'un point de vue production du moment que les interfaces physiques d'intégration (les prises de contact) sont les mêmes et se situent aux mêmes localisations. Certes il serait plus facile de réutiliser des composants d'un appareil à l'autre et de partager les mêmes modules MCA/CA mais l'adaptation de la chaîne d'assemblage finale au second appareil reste une problématique. Aujourd'hui si on partage une architecture commune alors, d'après un ingénieur en chef, la chaîne doit être également adaptée car les contraintes sont essentiellement des contraintes d'interfaces physiques et outillages. Même si les deux appareils possèdent la même architecture, les installations ne sont pas dimensionnées pour le même cahier des charges. Les outillages se reprennent sur des cadres forts, des parties de la structure ou des ferrures. Il est donc nécessaire qu'ils soient capables de prendre la structure par des points qui ne seront pas aux mêmes endroits et pas aux mêmes reprises sur deux appareils.

Maintenant que l'on connaît la conséquence d'une architecture produit commune entre deux appareils, il est intéressant de se demander pourquoi les architectures produit des appareils actuels sont différentes.

Pourquoi les architectures produits sont-elles différentes dans la gamme des appareils ?

Cela peut s'expliquer de différentes manières d'après les architectes produits. Les innovations technologiques sont souvent une des raisons principales. Le Dauphin par exemple apportait

l'utilisation de sandwich pour raidir la structure alors que les autres hélicoptères utilisaient une technologie traditionnelle de taules raidies. Le principe du sandwich métallique a ensuite été écarté au profit du composite. Le H175 est le premier appareil civil à utiliser cette technologie.

Ce même appareil est issu d'une coopération avec la Chine, si bien qu'Airbus a fait le choix de ne pas transférer du savoir-faire. C'est la raison pour laquelle le composite du H175 est en fibre de verre et celle du H160 en fibre de carbone.

De plus les grands choix techniques n'étaient pas tout à fait les mêmes entre la France et l'Allemagne. Historiquement l'Allemagne utilisait le composite alors que la France des technologies métalliques, beaucoup plus souples en termes de mise en œuvre, avec des cycles raccourcis et des possibilités de modifications plus importantes. Le H175 de responsabilité française optait pour une option forte sur le métallique avec un peu de composite alors que la volonté forte de l'Allemagne qui a développé un outil industriel de fabrication de structure composite a poussé le H160 à intégrer à 100% la fibre de carbone.

Les innovations technologiques ou les contrats de coopérations partageant le travail entre les industriels représentent les contraintes responsables de la différenciation des architectures produits des appareils de la gamme. Aujourd'hui, grâce au modèle industriel adopté, la politique industrielle est fixée. En effet, la structure d'un hélicoptère sera systématiquement développée en Allemagne levant donc la contrainte de l'innovation technologique. Lors du développement d'un nouvel appareil, se tenir à la politique industrielle permet donc d'assurer l'utilisation de la même technologie entre deux appareils développés intégralement par l'industriel d'après un architecte industriel. Si toutefois, une innovation amène l'Allemagne à modifier la technologie de la structure de ses développements, il est toujours possible pour l'industrialisation de garder la compatibilité en MFAL grâce à l'utilisation d'interfaces et d'outillages communs.

Résumé des différentes contraintes, règles et recommandations :

Contraintes :

Le changement de technologie de la structure entre les différents appareils apparaît ici comme étant la première contrainte empêchant les appareils de partager la même architecture produit et donc une MMFAL. Une des conséquences de l'utilisation de technologies différentes (mais également lorsqu'elles sont identiques) est la non-standardisation des interfaces d'outillage. Les coopérations extérieures dans lesquels une des parties de l'appareil n'est pas développée par le même industriel engendrent la différence d'architecture produit de deux appareils à assembler en MFAL. Enfin le temps de développement entre deux appareils est aussi responsable de cette différence d'architecture.

Règles et recommandations :

Cependant les entretiens ont révélé des règles et recommandations à suivre afin de faciliter l'assemblage en MFAL. Un des principaux critères pour faciliter l'assemblage en MFAL est l'allocation réservée et communes d'un appareil à l'autre aux équipements et installations. On retrouve également le principe d'adapter l'outillage durant l'assemblage final afin de travailler sur les systèmes des appareils différents. Aussi le découpage des MCA dans chaque site spécialisé permet de développer chaque module en intégrant la même technologie. On retrouve également la standardisation des interfaces d'intégration de systèmes équivalents entre les deux appareils à assembler sur la MFAL.

Garder une architecture produit commune d'un appareil à l'autre permet à la fois de développer les hélicoptères en utilisant la même technologie mais facilite aussi l'utilisation d'interfaces et d'outillage commune. D'après la stratégie industrielle, il existe un autre aspect important dans le développement d'un nouvel appareil qui peut être responsable du passage de deux appareils différents sur la même ligne d'assemblage finale, c'est le principe du *reuse*. Ce principe permet d'assurer, en intégrant les mêmes ensembles, sous-ensembles ou pièces d'un appareil à l'autre de garder des interfaces communes et donc l'utilisation d'outillages communs.

### Questions relatives au Reuse

Le *reuse* est un principe qui consiste à réutiliser un ou plusieurs éléments jusqu'à un module entier d'une machine existante à une autre machine. Il est possible de différencier deux façons d'utiliser ce principe. Un programme arrive en fin de vie et certaines de ses pièces sont réutilisées pour développer son remplaçant. Il est également possible de réutiliser des pièces et ensembles standards entre hélicoptères de familles différentes (légers, médiums, lourds). Le *reuse* consiste à utiliser la même référence de pièce d'une machine à l'autre et donc garder rigoureusement la même pièce avec les mêmes interfaces. Dans ce passage il convient d'expliquer pourquoi dans l'industrie hélicoptériste il est compliqué de maximiser le *reuse* dans le développement des hélicoptères bien qu'il soit admis qu'il facilite le passage de deux appareils sur une MMFAL.

### Pourquoi n'arrive-t-on pas à maximiser le *reuse* ?

Le BE essaye déjà de pratiquer le *reuse* et presque de manière systématique d'après les ingénieurs en chef. Cela dit si aujourd'hui le *reuse* reste compliqué dans l'industrie hélicoptériste, c'est en raison de contraintes de performances, de masse, de sécurité, de certifications ou de Supply Chain venant rendre très complexe son application dans le développement de deux appareils différents. Si un hélicoptère en remplace un autre, il y a de grandes chances que, inscrits sur un temps

long, les équipements de ce dernier soient pourvus de technologies obsolètes rendant caduques l'application du *reuse*.

Contraintes de performances :

La masse est une performance clé dans le développement d'un hélicoptère. Utiliser du *reuse* d'équipements/installations d'un programme d'un MTOW supérieur ou inférieur implique un « sur » ou « sous » dimensionnement de ces installations réutilisées. Selon l'ingénieur en design de structure, le surdimensionnement engendre une augmentation de la masse et un sous dimensionnement ne répondrait pas aux besoins fixés par le programme. Les hélicoptères sont aujourd'hui dimensionnés au juste besoin pour garantir des performances la plus optimale possible. Pour des problématiques de tailles et de volume il est compliqué de récupérer un CA en entier. Un CA tronçon avant est toujours spécifique à la machine, et donc pas compatible d'une machine à une autre, la poutre de queue en tant que MCA également, la poutre de queue du H160 n'irait pas sur un H145 car elle est trop grosse (En plus des contraintes d'architectures produits et industrielles vues plus haut). De la même manière, le volume est aussi un élément important à prendre en compte dans le cas du *reuse*. En effet si on suppose un hélicoptère réutiliser les installations d'un appareil au MTOW plus grand, alors l'équipement réutilisé est non seulement surdimensionné et pose des problèmes de masse mais risque en plus d'occuper une aire affectée dans la structure plus importante. Un équipement risque de ne plus s'intégrer dans cette zone. Ce second équipement est alors déplacé dans la structure, modifiant ainsi le centrage des masses de l'appareil.

Un ingénieur en chef ajoute que l'architecture produit d'un appareil peut changer entre sa version civile ou militaire. Il est donc aussi difficile d'assembler la version civile et militaire sur la même FAL alors qu'il s'agit pourtant du même appareil. Bien que certains éléments comme la climatisation soient réutilisés entre une version civile et une militaire, toute la distribution du système est reprise et modifiée dans sa globalité (climatiseur, ventilation, chauffage) car il est soumis à des contraintes différentes. Dans une version civile, il est important de bien ventiler, climatiser ou chauffer une cabine pour le transport de passagers. Lors d'un vol militaire, la porte de la cabine reste ouverte la plupart du temps, il y a donc moins de contraintes de climatisation de la cabine. De plus le système de climatisation est gourmand en énergie et peut altérer les performances de l'appareil. En revanche le cockpit de la version militaire est pourvu de plus d'équipements, ces derniers dissipent énormément de chaleur, si bien qu'une partie de la climatisation est dérivée pour ventiler les dissipations thermiques. L'environnement opérationnel représente également une contrainte dans le *reuse*, les milieux agressifs dans lesquels opèrent les hélicoptères militaires sont souvent très sableux. Installer des protections implique de modifier les ventilateurs et la distribution. Ces deux exemples ont un impact sur

l'architecture produit et donc industrielle qui limitent fortement la capacité de *reuse* d'un appareil à un autre ou d'une version à une autre.

Dans les faits il n'est pas envisageable pour le BE de réutiliser un équipement d'un appareil à un autre surtout pour des questions de dimensionnement. Le besoin de l'industrie va dans le même sens, il n'est pas question de mixer un appareil léger avec un lourd sur la même ligne car cela ne présente aucun avantage. Pour appliquer le *reuse*, d'après l'IPO, il faut donc viser des performances à peu près équivalentes. Des performances équivalentes de dimensionnement peuvent s'obtenir entre appareils de même famille de produit, identifiées chez Airbus comme les hélicoptères légers, médiums et lourds. Ces familles se caractérisent par un delta masse de l'ordre d'une tonne. Il est intéressant donc d'étudier la question du *reuse* et des performances des installations lorsque la différence de MTOW entre deux appareils est de l'ordre de la tonne. Il s'agirait alors de développement des modules répondants aux besoins de deux appareils aux MTOW différents plutôt que des systèmes différents sur chaque appareil. Toutefois si le BE ne peut pas répondre aux besoins du client en réutilisant un équipement, il est quand même possible d'assurer un assemblage sur une MFAL en travaillant sur les interfaces physiques des équipements à intégrer et l'outillage en ligne de production.

Les contraintes de performance jouent un rôle important dans l'application du *reuse*. Impliquant généralement un dimensionnement spécifique, certains systèmes ne sont pas compatibles dans des appareils d'un MTOW différent. Aussi, les variantes-missions ou gouvernementales d'un appareil conditionnent les systèmes utilisés et complique l'application du *reuse* au sein même du même appareil. Cependant les performances ne sont pas le seul frein à la réutilisation de composants, la certification et les contraintes contractuelles le sont également.

Contraintes de certification :

Il arrive de réutiliser un composant d'un hélicoptère pour un futur programme, si la pièce n'est pas redessinée alors la certification ne pose pas de problème d'après le Squad Leader. Cependant il ajoute que les pièces sont la plupart du temps modifiées et doivent donc être de nouveau certifiées.

Entre le train d'atterrissage de la version civil d'un appareil et sa version militaire, leur certification diffère. Pour la version civile, il sera demandé que le train ne casse pas jusqu'à un impact à 2 m/s alors que sur le militaire il est demandé 3 m/s minimum. Cette vitesse est une sécurité. Avec des conditions houleuses où un hélicoptère se pose avec du vent, les vitesses relatives combinées fortes peuvent faire rebondir l'appareil sur le pont d'un navire et le faire tomber à l'eau. Le pilote doit alors baisser complètement le manche collectif (commande responsable de la prise ou perte d'altitude) et vient s'écraser sur le pont. Le train doit donc être dimensionné pour encaisser ce choc.

Chaque modification de design induit une certification qui, selon son niveau de complexité est soumis devant l'organisme de certification en vigueur même s'il existe des privilèges accordés aux modifications mineures. Cependant elles sont quand même certifiées par des Compliant Certification Engineer, identifiés au bureau d'études au nom de l'organisme responsable de la certification.

Il ajoute qu'une base de certification peut évoluer avec le temps et ainsi un élément certifié il y a vingt ans ne répondrait plus aux critères actuels en vue d'une certification de nos jours.

En effet, selon le Squad leader la sécurité des vols oblige les organismes certificateurs à demander un niveau d'exigences de plus en plus élevé, si bien que lorsqu'un composant est réutilisable il peut ne plus répondre au besoin de certification à cause du laps de temps entre les deux développements. Ainsi lorsqu'un BE veut récupérer la cloison pare-feu d'un hélicoptère pour l'assembler sur un autre, il est possible que pour des raisons de sécurité, la pièce ne réponde plus aux critères de certification et ainsi doit être redésignée pour y parvenir. Dans ce cas on ne parle plus de *reuse*.

On retrouve ici la même problématique que les contraintes de performances. Pour diverses raisons, la certification représente un frein dans l'application du *reuse* lors du développement d'un appareil compatible avec une MFAL. Enfin il existe un dernier point bloquant, les contraintes contractuelles qui rendent compliqué l'application de ce principe.

Contraintes contractuelles :

Des contraintes venant des clients de lancement imposent à l'industriel de travailler avec certaines entreprises explique un ingénieur en chef. Le H160 est le quatrième porteur de Helionix©, la suite avionique d'Airbus Helicopters commune aux appareils de la gamme civile. L'utilisation de cette suite sur 4 hélicoptères de la gamme repose sur du *reuse* des écrans, calculateurs ou encore du système d'exploitation. Le fournisseur de la suite avionique n'a pas été retenu pour la version militaire de l'appareil car la provenance du matériel représentait une problématique politique et industrielle.

En fait cette contrainte implique un impact industriel lourd car la baie avionique du cockpit différente sur la version militaire doit quand même être compatible avec les outils industriels. Les exigences clients créent quelques difficultés dans ce sens et notamment d'intégration. En effet la baie avionique militaire est plus grande et risque de ne pas rentrer par la porte de l'appareil lors de son intégration en FAL à l'instar de sa version civile. Cela remet en cause le principe du CA qu'il faudra peut-être découper. Il est possible de faire en sorte que les interfaces des outillages permettent quand même sa bonne intégration. Cependant ce travail impliquerait de déplacer des éléments du cockpit et ainsi toucher à son ergonomie.

Les contraintes contractuelles viennent conditionner dès le début d'un développement sa compatibilité sur une MFAL. En effet les équipes de développement perdent une partie de la responsabilité des systèmes et ainsi ne maîtrisent plus les différentes interfaces nécessaires au passage des appareils en MFAL.

Résumé des différentes contraintes, règles et recommandations :

Contraintes :

L'utilisation de *reuse* dans le développement de deux appareils compatibles sur une MFAL est donc limitée par des contraintes de natures différentes. On retrouve ainsi le dimensionnement des appareils au juste besoin dans lequel certains systèmes ne répondent pas aux besoins d'un appareil au MTOW, mission ou variantes différents. La taille de certaines installations rend également le *reuse* impraticable, le risque étant de manquer de place dans un appareil pour intégrer d'autres installations. Aussi, les exigences croissantes de certification d'un appareil limitent l'utilisation de *reuse* entre deux développements. Finalement les contraintes contractuelles s'ajoutent également à la liste des contraintes limitant l'utilisation de *reuse* de composants d'un appareil à l'autre pour les rendre compatible en MFAL.

Règles et recommandations :

Les deux appareils doivent intégrer des systèmes et équipements développés pour un ordre de masse définit et non au juste besoin d'un seul des deux appareils. Cet écart de masse se situe autour d'une tonne. Cependant le *reuse* permet surtout de garder les mêmes interfaces d'outillage et d'intégration. Il est donc envisageable, lorsqu'il n'est pas possible d'appliquer le *reuse*, de développer des systèmes utilisant ces mêmes interfaces entre les deux appareils à assembler sur la MFAL.

### 3.1.3. Vérification et synthèse des entretiens

Pour un domaine de vol et un marché donné, un industriel développe un hélicoptère tous les quarante ans. La politique de l'entreprise et les technologies en vigueur sont autant de contraintes qui viennent perturber le pouvoir d'appliquer le modèle industriel lors du développement de nouveaux appareils. Aussi, l'architecture produit et l'utilisation du *reuse* sont aussi des aspects du développement impactés par ces contraintes.

Au cours des entretiens nous avons appris que les problématiques d'interfaces physiques entre les installations, la structure et l'emplacement de ces installations sont des critères importants pour assurer le passage de deux hélicoptères différents sur une MMFAL. Aussi, assurer un outillage commun entre ces différents appareils est également important car il permet d'assurer un temps d'assemblage commun, une station commune et un métier commun. Ces aspects de la production sont des facteurs non négligeables quant au passage de deux appareils différents sur une MMFAL. Ainsi, nous avons mis au point le schéma du découpage modulaire (Figure 51) d'un produit pour orienter la décomposition des efforts entre le BE et le BI. A l'issue des entretiens, plusieurs solutions permettant l'assemblage en MMFAL d'un nouveau produit nous ont été données. A travers ce schéma, nous avons essayé de les trier par niveau de modularité, en commençant du plus grand ensemble d'un produit jusqu'au métier nécessaire pour gérer l'intégration d'un composant. Cette étude permet de comprendre la répartition entre le BE et le BI des solutions existantes pour assurer le passage d'un appareil en MMFAL.

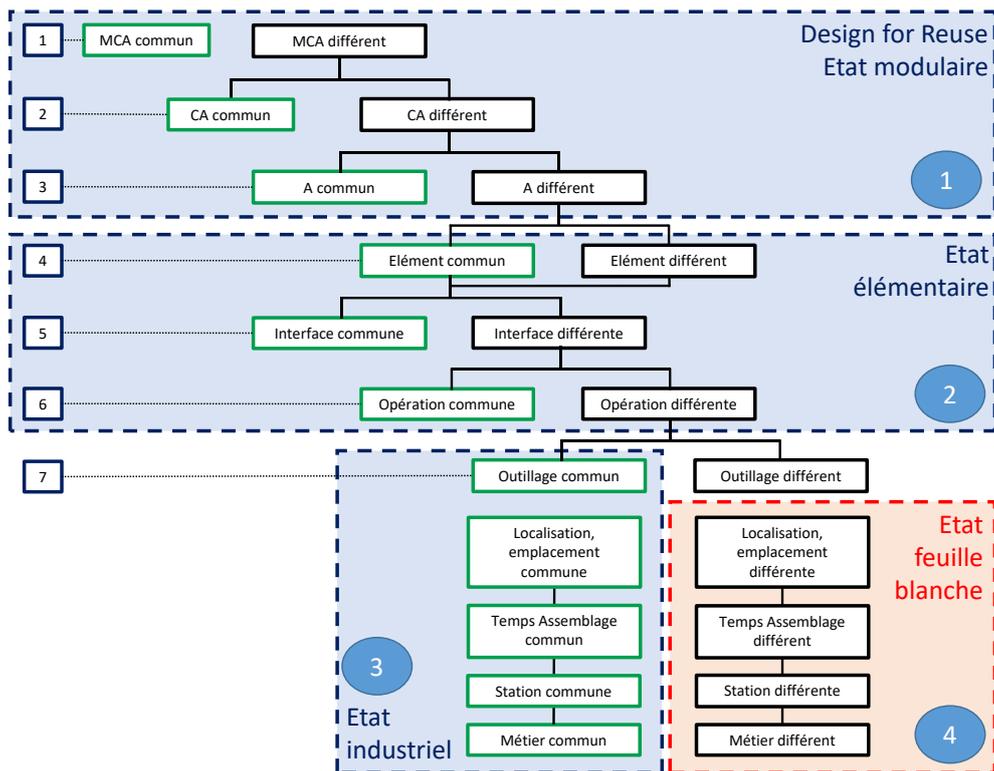


Figure 51 : Découpage modulaire indiquant les quatre états de modularité d'un produit

Onze phases décrivent l'ensemble des niveaux de modularité d'un produit, allant du MCA au niveau Interface, qui désigne un composant qui assure l'intégration d'éléments similaires entre les deux produits. Plus le niveau de modularité de deux produits est proche du niveau MCA, plus il est facile de les assembler en MMFAL, plus le design est contraint par les spécificités du DfMMFAL et moins l'effort à fournir par le système de production est grand. Sous ces niveaux, nous retrouvons les pratiques en ligne d'assemblage. Lorsqu'il n'est pas possible d'assurer la communalité entre différents composants de deux produits, il est quand même envisageable de les assembler en MMFAL grâce aux niveaux inférieurs. Ces niveaux assurent que les composants entre deux appareils ayant la même fonction partagent un outillage d'intégration, une zone d'assemblage et un temps d'assemblage, une station et un métier communs, ce qui permet l'assemblage en MMFAL. Lorsqu'ils sont différents, l'effort à fournir pour préparer l'assemblage en MMFAL sera plus important, cela peut également engendrer une différence de charge de travail importante sur la ligne et est donc une source d'inefficacité. Ces 11 niveaux de modularité sont répartis dans 4 états : l'état modulaire, élémentaire, industriel et feuille blanche. Le Tableau 9 présente les états ainsi que leurs impacts sur le processus de conception et le système de production.

Tableau 9 : Présentation des états du découpage modulaire d'un produit

États du découpage	Processus de conception	Système de production
--------------------	-------------------------	-----------------------

Modulaire	Design entièrement sous contraintes de DfMMFAL	Forte réduction des efforts pour compatibilité en MMFAL
Élémentaire	Réduction du design sous contraintes de DfMMFAL	Réduction des efforts pour compatibilité en MMFAL
Industriel	Réduction importante du design sous contraintes de DfMMFAL	Augmentation des efforts pour compatibilité en MMFAL
Feuille blanche	Non prise en compte des contraintes de DfMMFAL	Effort élevé : engendre des différences de charge de travail entre les 2 produits Source d'inefficacité

Les entretiens nous ont également permis de dresser le Tableau 10. Celui-ci résume les différentes contraintes émises lors des entretiens qualitatifs ainsi que les règles associées et connues permettant de les lever lors du développement d'un appareil.

Grâce au tableau de synthèse, nous avons pu identifier 6 champs dans lesquelles certaines contraintes peuvent évoluer empêchant l'assemblage de deux hélicoptères différents dans une MMFAL :

- 1) **besoins du client ;**
- 2) **performance et dimensionnement des appareils ;**
- 3) **certification ;**
- 4) **collaborations industrielles ou étatiques ;**
- 5) **performances industrielles ;**
- 6) **architecture produit.**

Lors de ces entretiens les ingénieurs concernés par le développement d'un hélicoptère ont su émettre des règles et recommandation pour lever ces contraintes. Ces règles évoluent autour de plusieurs champs d'application que sont :

- 1) **optimisation du processus de conception ;**
- 2) **équilibrage de la MMFAL ;**
- 3) **adaptabilité de la MMFAL ;**
- 4) **spécialisation des sites industriels.**

Tableau 10 : Contraintes issues de l'identification des métiers au sein d'Airbus Helicopters

	Champs de la contrainte	Contraintes	Règles	Champs d'application
1	Besoins du client	Les besoins du client dimensionnent et différencient deux appareils	Développer des systèmes pour deux appareils dont l'écart de performance permet l'intégration du même système au sein des deux appareils	
	Performance et dimensionnement des appareils	Les appareils sont dimensionnés au juste besoin ce qui ne laisse pas de marge de performance pour un appareil de gamme inférieure ou supérieure		
	Certification	Avec le temps, la certification peut durcir et empêcher de réutiliser pleinement un ensemble pourtant certifié auparavant		
2	Collaboration industrielles ou étatiques	Les collaborations avec d'autres industriels ou états participants au développement d'un appareil peuvent freiner l'application du modèle industriel	Prendre en compte précocement les contraintes dans le processus de conception	Optimisation du processus de conception
		Collaboration avec un industriel qui impose son module dans l'appareil et casse l'architecture produit		
3	Performance industrielle	Respect des cibles de qualités, coûts, délais et assemblage des appareils	Montage de certains composants, sous-ensembles ou ensembles en fin de cycle d'assemblage	
4		Soumission des spécificités d'essais à réaliser en FAL au bureau d'étude	Prendre en compte précocement les contraintes dans le processus de conception	
5		Choix tardif des équipements de mission sur les appareils	Affecter tardivement les appareils assemblés en FAL aux clients	
6		Différence de charge de travail entre 2 appareils différents à assembler en MMFAL	Régler le <i>takt time</i> sur celui de la machine avec la plus grande charge de travail	
7	Assurer un maximum de 20% de différence de charge de travail par cycle d'assemblage entre les deux appareils			
8	Architecture produit	Il est difficile de maintenir une architecture produit similaire lorsque l'outillage d'intégration est différent	Utiliser un outillage flexible pour l'intégration d'éléments au sein des deux appareils en MMFAL	Adaptabilité du système de production
9		Deux appareils de gamme proche ne sont pas forcément développés dans le même site industriel avec la même spécialisation de technologie	Développer systématiquement le même module d'un site à un autre pour appliquer la même technologie entre deux produits différents	Spécialisation des sites industriels

## Vérification

Dans le cadre de l'hypothèse 1, nous attendions des recommandations techniques et conceptuelles modélisées pour pallier les contraintes relatives à l'assemblage en MMFAL, il s'agit du Tableau 10 présenté ci-dessus.

Dans le cadre de l'hypothèse 2, nous attendions d'une part un schéma représentant les différentes phases de développement d'un hélicoptère qui met en évidence les interactions entre le BE et le BI, ce schéma a été présenté dans la synthèse de la sous-section 3.1.2.2, voir Figure 50. D'autre part, nous attendions également d'être en mesure de dresser un schéma représentant le découpage modulaire d'un produit pour orienter le BE ou le BI vers des solutions de conception compatibles avec un assemblage en MMFAL.

## Synthèse

L'étape de la formalisation des connaissances attendait 2 apports principaux :

- 1) Un **schéma** illustrant le **développement d'un nouvel appareil** et les interactions correspondantes entre **les BE et BI** (voir Figure 50).
- 2) Un **schéma illustrant le découpage modulaire** d'un appareil. Celui-ci permet d'orienter le BE ou le BI vers des **solutions compatibles avec une MMFAL**.
- 3) Un **tableau** (Tableau 10) reprenant l'ensemble des **contraintes de développement d'un nouvel appareil** concernant **l'architecture produit, industrielle et la réutilisation de composants**. Ce tableau présente également **les recommandations des experts** associées aux différentes contraintes.

L'ensemble de ces résultats constituent la base de notre formalisation des connaissances autour des spécificités de l'industrie hélicoptéristes. Aussi, les résultats de ces entretiens nous ont également aidés à nous guider lors des expérimentations des étapes suivantes de notre méthode DfMMFAL.

La section suivante présente les expérimentations des étapes de traitement suivantes de la

### 3.2. Formaliser les pratiques existantes – Expérimentations

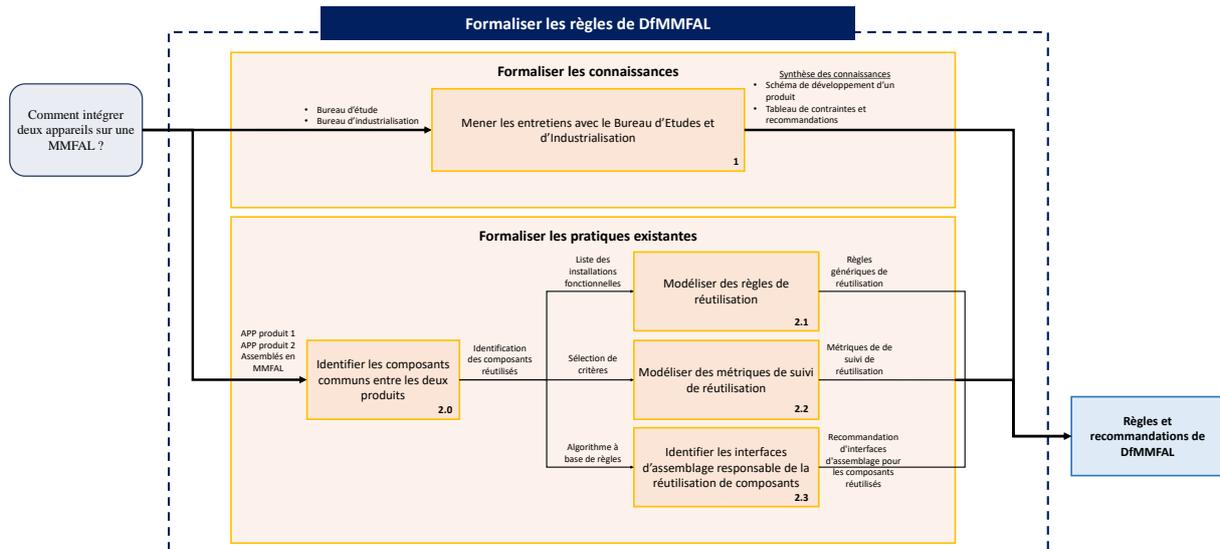


Figure 52 : Rappel de la méthode de formalisation des règles DfMMFAL

Lors de nos chapitres précédents, nous avons identifié notre problématique de recherche :

**Comment assister les équipes de développement à concevoir de manière optimisée des nouveaux produits compatibles avec une ligne d'assemblage finale multi-modèle ?**

ainsi que nos hypothèses de résolutions :

1 La méthode DfMMFAL permet de formaliser des recommandations techniques pour aider les équipes de développement à concevoir un produit compatible MMFAL.

2 La méthode DfMMFAL améliore les échanges entre les processus de conception amont et les systèmes de production.

Dans le cadre de l'élaboration de la méthode DfMMFAL nous avons commencé ce chapitre par la formalisation des connaissances à travers la compréhension des spécificités du terrain. Les entretiens qualitatifs ont été conduits au sein de l'entreprise Airbus Helicopters. À l'issue de ces entretiens nous avons formalisé les connaissances. À présent nous allons tester la formalisation des pratiques existantes au sein de l'équipe « Transformation Produits PLM » de l'entreprise Airbus Helicopters qui accueille ces travaux de recherche pour vérifier notre hypothèse et mettre au point, valider et analyser la pertinence des résultats de notre méthodologie DfMMFAL.

Pour ce faire, nous avons à disposition deux couples d'hélicoptères de la gamme d'Airbus assemblés en MMFAL mais dont les pratiques de conception ayant permis leur assemblage n'ont pas été formalisées. Les H125 et H130 (Figure 53) sont un couple d'hélicoptères légers. Il s'agit des plus petits appareils de la gamme, ces monoturbinés peuvent décoller avec une charge maximale d'environ 2.5t. Historiquement, le H125 est l'appareil le plus ancien du couple, issu d'un développement des

années 1970, il est aussi connu sous le nom d'Écureuil. Le H130 est basé sur le H125. Plus récent, il est capable de décoller avec une charge supérieure. Ces deux hélicoptères partagent plusieurs parties communes comme la cellule, les réservoirs ou la turbine Arriel. Leurs principales missions sont le transport commercial de passagers, le transport privé ainsi que le travail aérien. Le H125 se spécialise dans le travail aérien en conditions difficiles (pays chauds et altitude) et les missions de services publics alors que le H130 peut assurer des missions d'EMS.



Figure 53 : Hélicoptères H125 à gauche et H130 à droite

Les H215 et H225 (Figure 54), tous deux formant la famille des 'Super Puma' sont les hélicoptères biturbines les plus lourds de la gamme Airbus. Ils sont respectivement capables de décoller avec une charge maximale interne de 8.6 et 11t. Bien que le H225 soit une version allongée du H215, il présente certaines différences d'architectures comme un rotor principal à 5 pâles et arrière à 4 (contre 4 et 5), des turbines conçues spécialement pour lui. Leur polyvalence leur vaut d'être opérés par l'armée française depuis plusieurs années. Ils sont tous deux capables de remplir des missions de travail aérien, de transport de passagers et de services publics. Le H225 se spécialise dans les missions de SAR et de transport de VIP



Figure 54 : Hélicoptères H215 à gauche et H225 à droite

### 3.2.1. Étape 2.0

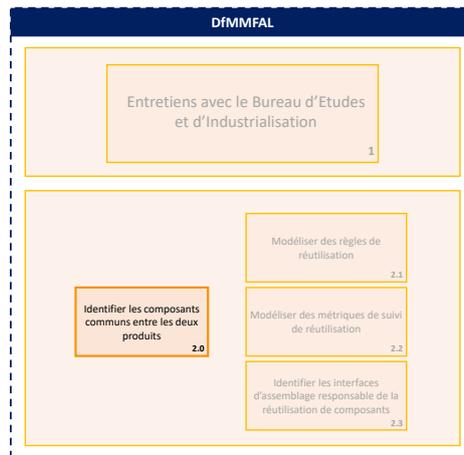


Figure 55 : Schéma de suivi – étape 2.0

Dans un premier temps, nous mettons en œuvre l'AR dont les résultats représentent les données d'entrées aux trois étapes de traitement. Deux couples sont examinés lors de nos cas d'études. Dans un premier temps il convient alors d'acquérir les données puis de les prétraiter pour homogénéiser les données d'entrées pour les étapes suivantes.

Le protocole expérimental de cette étape (voir Figure 56) se déroule en 3 parties. Premièrement, nous allons présenter les résultats escomptés à la suite de l'AR, ensuite nous allons dérouler notre démarche. Enfin, nous allons vérifier dans la synthèse que les résultats obtenus sont conformes et vérifient nos hypothèses.

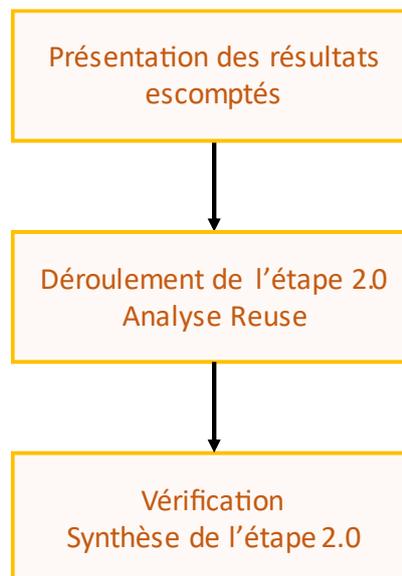


Figure 56 : Protocole expérimental de l'étape 2.0

### 3.2.1.1. Résultats escomptés

L'étape 2.0 représente la base aux étapes de traitement suivantes. Ses résultats, l'identification des composants communs, sont les données d'entrée de ces étapes. À l'issue de l'AR et à partir de l'APP du second appareil, nous attendons donc de pouvoir retrouver chacun des composants réutilisés depuis le premier. Ces résultats serviront de références au BE lors du développement d'un nouveau produit.

### 3.2.1.2. Déroulement de l'étape 2.0

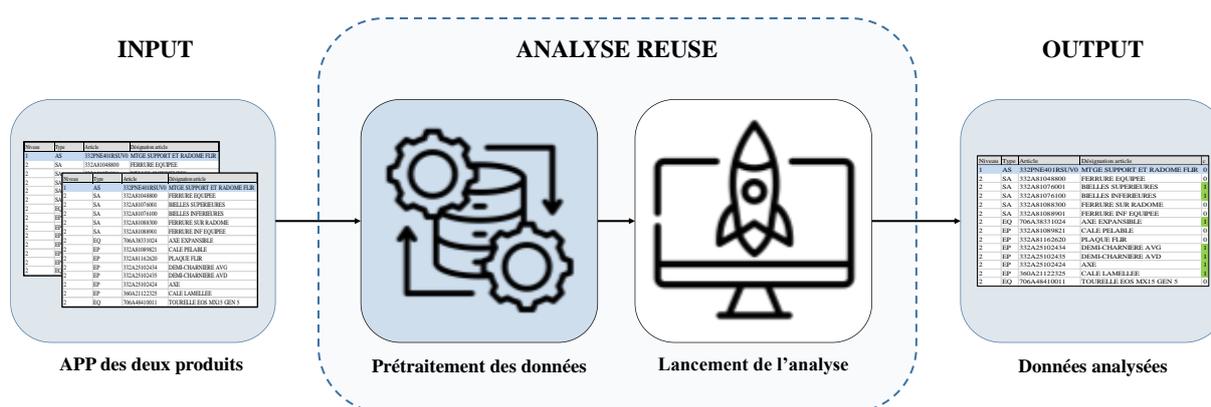


Figure 57: Rappel de la démarche de l'étape 2.0

### INPUT : APP des deux produits

Dans notre cas d'études, les APP sont extraits de SAP. La décomposition d'un APP est représentée par le Tableau 11.

Tableau 11 : Décomposition d'un APP issu de SAP

Niveau de granularité	Désignation du niveau	Types de références par niveau
0	Découpage industriel du produit	Gamme de fabrication
1	Opération d'assemblage	Solution d'assemblage (AS)
2	Composants utilisés dans l'AS	Sous-assemblage (SA), Pièce élémentaire (EP), Equipements (EQ), Articles Standards (ST)
3 +	Composants sous- jacents au niveau 2 et inférieurs	Sous-assemblage (SA), Pièce élémentaire (EP), Equipements (EQ), Articles Standards (ST)

## Prétraitement des données

L'AR n'intervient pas sur la totalité des références ou de leurs caractéristiques. Avant de lancer l'analyse dans le cadre des différentes phases de nos expérimentations, nous prétraiterons les données présentes en fonction des résultats souhaités. Le Tableau 12 présente un extrait d'un APP avant l'étape de prétraitement des données. Nous avons volontairement camouflé la codification des références ainsi que certaines caractéristiques des références dans un souci de confidentialité. Le niveau 0, la gamme d'assemblage n'est pas considérée dans notre étude dans la mesure où nous nous intéressons à l'ensemble des opérations d'assemblage qui composent la somme de ces gammes.

Tableau 12 : Extrait d'un APP avant l'étape de prétraitement des données

Niveau	Type	Référence	Désignation de la référence
.1	AS	332PNE401XXX	MONTAGE SUPPORT ET RADOME FLIR
..2	ST	1305123	E0812-05\GAINÉ THERMORET.AUTO-EXTING
..2	SA	332A81XXXXXX	BIELLES SUPERIEURES
...3	EP	332A81XXXXXX	FERRURE NUE
....4	ST	1232055	ASNA3365-3912\PLAT 2618A

## Lancement de l'analyse et OUTPUT

Une fois les données acquises et prétraitées, l'AR peut être lancée sur un tableur Microsoft® Excel®. Le Tableau 13 présente l'extrait d'un APP après le calcul de l'AR. En tout, c'est environ 71 000 lignes qui ont été analysées par l'étape 2.0 pour le couple H215/H225 et 8 800 lignes pour le couple H125/H130.

Tableau 13 : Extrait d'un APP après le calcul de l'Analyse Reuse sur le couple H215/H225

Niveau	Type	Article	Désignation article	r
1	AS	332AAE10XXXXXX	CAPA PLATINE AMC	1
1	AS	332AAE45XXXXXX	MONT RACK ET BOITIER AMC MK2+	0
2	EP	332A67XXXXXX	RACK EQUIPE	0
3	SA	332A67XXXXXX	RACK	1
3	EP	332A67XXXXXX	CALE	0

Maintenant que nous avons exécuté l'AR sur nos cas d'étude, les résultats forment les données d'entrée pour nos étapes de traitement étudiés dans les sections suivantes.

### 3.2.1.3. Vérification et synthèse de l'étape 2.0

#### Vérification

Nous souhaitons, à l'issue de l'étape 2.0 être en mesure d'identifier les composants réutilisés entre deux hélicoptères. Nous avons analysé les deux couples d'hélicoptères mis à notre disposition.

Le premier couple, H125/H130 nous a permis de dresser une liste sous format Excel de 5600 composants réutilisés, soit 63.7% de *reuse* sur la totalité de l'appareil. Le couple H215/H225 a permis d'identifier 26094 composants réutilisés, soit 36.6% de *reuse* sur la totalité de l'appareil.

## Synthèse

L'étape 2.0 de la formalisation des pratiques a pour objectif d'identifier les composants communs entre 2 produits. Le résultat attendu de cette expérimentation est donc **une liste** mettant en **évidence tous les composants réutilisés**. Le Tableau 13 présente sur la colonne de droite, un indice de réutilisation, noté « r ». Celui-ci précise bien si le composant de la ligne associée est présent sur la liste de l'autre produit, et donc réutilisé.

Au sein de la méthode DfMMFAL, **cette étape établit la base** à partir de laquelle les **étapes de traitement** suivantes tenteront de vérifier les hypothèses. Aussi, elle **met à disposition** du BE **une démarche** permettant **d'obtenir les informations** relatives à **la réutilisation** de composants d'un appareil à l'autre.

### 3.2.2. Étape 2.1

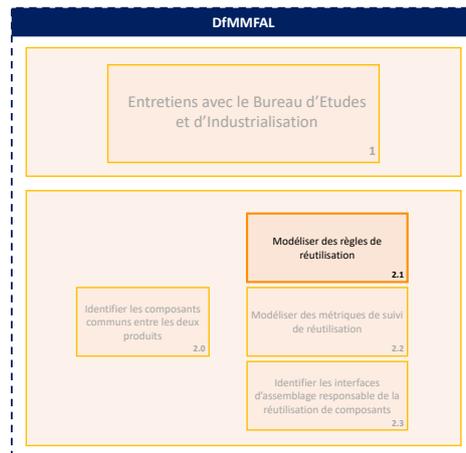


Figure 58 : Schéma de suivi – étape 2.1

L'expérimentation de l'étape 2.1 vise à modéliser des règles et recommandations à partir de l'étude d'un couple d'hélicoptères existants ; les H215 et H225 (voir Figure 54). Dans le cadre de l'expérimentation, seul ce couple est étudié car le couple H125/H130 ne comprend pas suffisamment de composants pour apporter les résultats attendus. Aussi, certains critères ne sont pas disponibles sur ces appareils.

Le protocole expérimental de l'étape 2.1 (voir Figure 59) se déroule en 3 parties. Premièrement, nous allons présenter les résultats escomptés à la suite de la modélisation des règles de réutilisation. Ensuite, nous allons dérouler notre démarche. Sa construction reprend la démarche présentée en Section 2.2.2.2 (voir Figure 32). Enfin nous allons vérifier à travers la synthèse si les résultats obtenus sont conformes et vérifient nos hypothèses.

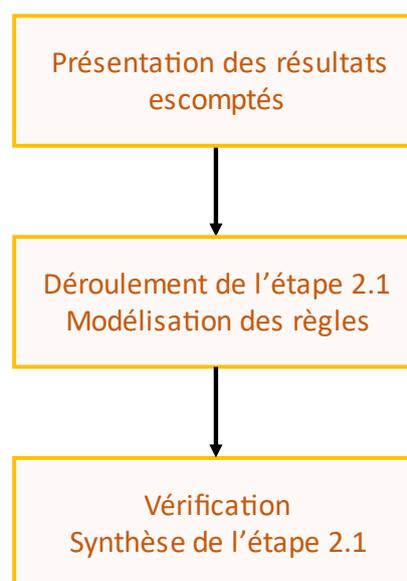


Figure 59 : Protocole expérimental de l'étape 2.1

Dans le cadre de l'expérimentation, les données d'entrées issues de l'AR ne nous permettent pas d'avoir l'information en fonction d'installations fonctionnelles. Il est donc nécessaire de chercher à compléter ces données, notamment à travers l'étude des Références Commerciales. Il s'agit des ensembles choisis par le client lors de la configuration de son appareil. La démarche suivie par l'outil est rigoureusement la même que si les données étaient classées selon les fonctions ou sous-fonctions des appareils.

La sous-section suivante décrit, à travers la présentation de la Gestion de Configuration, le processus et les différents acteurs entre la configuration d'un appareil par le client et sa livraison. Ainsi, nous présentons comment, au cours de l'expérimentation, nous avons fait le rapprochement entre les références commerciales et l'APP.

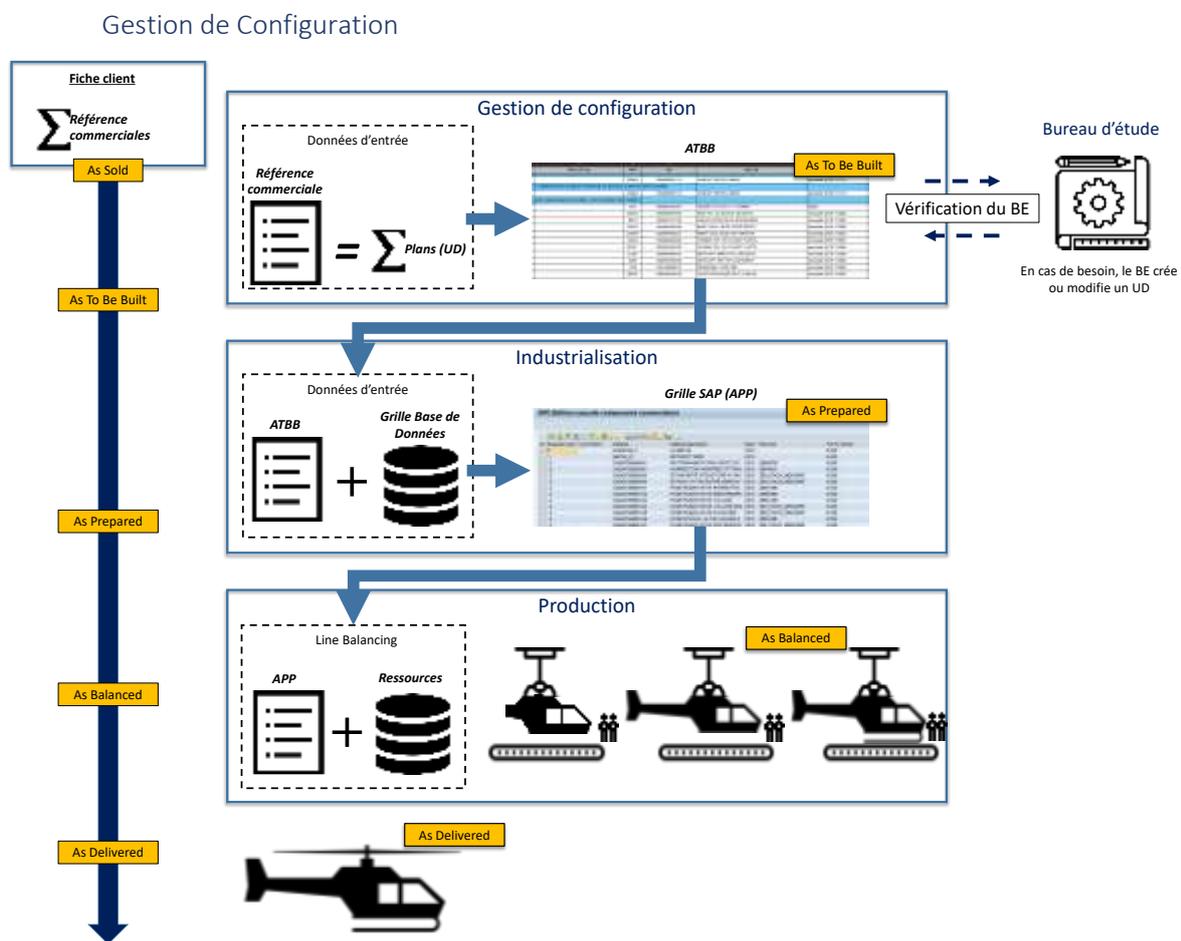


Figure 60 : Processus de transformation des données de la fiche client jusqu'à l'assemblage d'un appareil

À l'instar d'un configurateur dans l'automobile, la gestion de configuration est chargée de décrire techniquement le produit acheté par le client. Dans notre industrie hélicoptériste, le client choisit un appareil spécifique et y associe des options afin qu'il puisse remplir les missions souhaitées. Le document qui contient ces options est la fiche client (Figure 60). Une option est alors associée à une référence commerciale. La fiche client représente la somme de ces références commerciales.

La configuration consiste alors à associer les unités de design (UD, ou plans) correspondantes pour chaque référence commerciale. En même temps, des allers-retours ont lieu avec le BE pour savoir si le plan existe ou s'il est reconductible. Sinon le BE est alors chargé de créer un ou plusieurs nouveaux plans pour répondre au besoin de la référence commerciale.

Une fois que la configuration a associé tous les plans nécessaires, il transmet l'information aux préparateurs sous forme d'*As To Be Built* (ATBB). Le rôle du préparateur est de définir les gammes d'assemblage ainsi que les instructions de travail qui les composent au sein de l'appareil. À partir de cet ATBB et d'une grille de base de données des gammes d'assemblage d'un type d'appareil, il va associer une ou plusieurs instructions en fonction des UD de l'appareil vendu au client. À l'instar de la configuration, si aucune instruction n'existe, son rôle est alors de la créer. Il décrit ensuite l'ordre technique dans lequel ces instructions doivent être réalisées, ce qui représente l'APP.

### 3.2.2.1. Résultats escomptés

L'apport primaire relatif à cette étape est de savoir si notre démarche est capable de généraliser des règles à partir de l'analyse de la réutilisation des composants. Cette analyse est portée sur les installations conçues par le BE : les références commerciales. Aussi, nous attendons de cette étape à retrouver des règles identiques en fonction des différents cas et pas uniquement des cas particuliers. Le dernier apport est de savoir si cette démarche peut nous permettre de généraliser ces règles.

Enfin, nous attendons une mise en évidence des solutions mises en place par le BI et à destination du BE pour réutiliser des ensembles.

### 3.2.2.2. Déroulement de l'étape 2.1

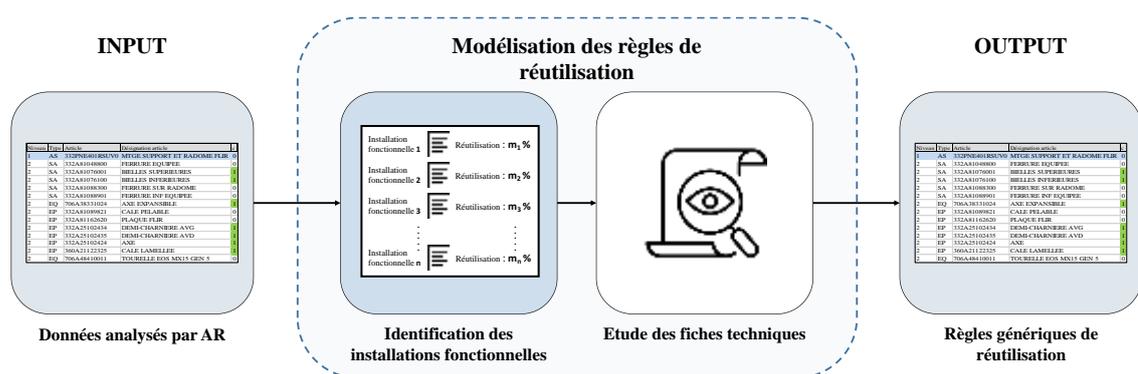


Figure 61 : Rappel de la démarche de l'étape 2.1

### Identification des installations fonctionnelles

Pour procéder à l'identification, nous nous sommes tournés vers la Gestion de configuration pour obtenir l'ATBB correspondant et vers les préparateurs pour obtenir la liste des UD associés aux

AS de nos APP. Une fois les références commerciales et les références des composants liées, il est désormais possible d'associer à chacun des composants d'un hélicoptère, la référence commerciale correspondante via une commande Excel, obtenir notre table de données et procéder à la suite de la démarche de l'étape 2.1. L'Annexe 2 est un extrait de la table de données prétraitée et prête pour la suite de notre expérimentation.

### Étude des fiches techniques

Une fois que les références commerciales sont associées aux composants, il convient de les classer sous forme d'histogramme avec un pas de 10. Le graphique en Figure 62 présente un aperçu des résultats.

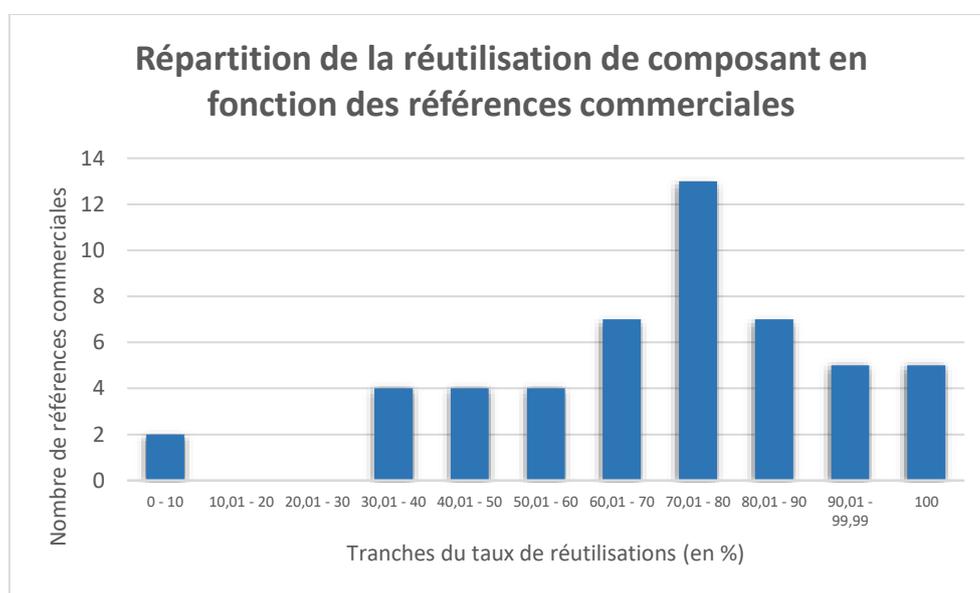


Figure 62 : Répartition de la réutilisation de composants en fonction de références commerciales

Au total, 3 089 composants ont pu être liés aux références commerciales et ont donc été analysés. Les deux hélicoptères choisis, le H215 et le H225 assurent la même mission SAR. Nous avons fait ce choix pour optimiser les résultats et mieux cerner les solutions d'intégration des composants sur deux appareils différents. Ces 51 références commerciales sont celles du H225 que l'on retrouve également dans le H215. Sur un total de 51 références commerciales, deux d'entre elles présentent un taux de réutilisation de 0%. Dans le cadre de notre étude, il convient de ne pas prendre ce résultat en compte car il s'agit d'options supplémentaires que le client d'un appareil uniquement a choisies (teinte des hublots cabine en vert et ajout de lunettes de vision nocturnes). Cinq de ces références commerciales présentent un taux de réutilisation de 100%. Réutiliser 100% d'une référence commerciale signifie que les équipes de développement savent entièrement réutiliser l'installation et l'intégrer d'un appareil à l'autre. En ce qui concerne les références réutilisées à moins de 100%, les

tableaux suivants présentent les tranches de réutilisation de >70% à <100%. Dans notre étude, nous présenterons uniquement les résultats des tranches strictement supérieures à 70%. C'est à partir de cette tranche que nous retrouvons le plus de réutilisation, nous pensons donc y découvrir les règles que nous cherchons à formaliser.

#### Analyse des instructions de travail

Dans un premier temps nous commençons par analyser les références commerciales par tranche de réutilisation. Le Tableau 14 présente le nombre total de composants, celui des composants réutilisés ainsi que le type de composants différents au sein de chaque référence commerciale comprise dans la tranche [90% ; 100%[ de réutilisation. Le Tableau 15 concerne la tranche [80% ; 90%[ de réutilisation et le Tableau 16 de ]70% ; 80%[ de réutilisation.

Tableau 14 : Tranche [90% ; 100%[ (9,8% des références)

Référence commerciale	Nb composants total	Nb composants (c=0)	Composants
ILS #1	18	1	Prise de coupure
ILS #2	92	5	Prise de coupure Supports de relais/de coupleur/d'antenne Équerre
Altimètre radio #2	23	2	Boîte de commande radio Joint
Radar Météo	56	4	Connecteur Harnais coupleur (x2) Support de prise coupleur
IFF	55	4	Étiquette Tresse de métallisation (x3)

Tableau 15 : Tranche [80% ; 90%[ (13,73% des références)

Référence commerciale	Nb composants total	Nb composants (c=0)	Composants
HEEL	168	27	Lampes, supports et alimentation
Flotteurs d'urgence	105	16	Faisceaux électriques équipés, écopés, obturateurs Flotteurs gauche, droit et arrière.
Kit de jumelles de vision nocturne	11	2	Prise JVN et étiquettes prise
Conditionnement d'air poste de pilotage et cabine	70	10	Supports équipés, de relais, de prise et de masse Cale
Émetteur/Récepteur (E/R) VHF/UHF	45	6	Conduite de ventilation Collier de cheminement Supports prise et prise capot coulissant
Système de gestion de la radio	38	5	Supports équipés et de prise Boitier de jonction radio,
E/R spécifiques <sup>4</sup>	66	10	Support équipé antenne basse (capabilité), E/R (support, cale et contrepoids)

<sup>4</sup> E/R spécifiques aux missions de l'appareil.

Tableau 16 : Tranche ]70% ; 80%[ (25,49% des références)

Référence commerciale	Nb total de composants	Nb de composants (c =1)	Composants (c=0)
Mitrailleuses de sabord	213	58	Mitrailleuses et supports, cales, fixations.
Pré-installation des sièges de troupes	13	3	Strapontin supplémentaire Banquette Filet de rangement
Antenne et récepteur GPS	60	12	Récepteur, support
Flight Management System (FMS SAR)	20	4	Boîtes de commande supplémentaires
E/R VHF/AM	37	9	Support antenne et renforts Antenne supplémentaire et supports
Parties fixes des flotteurs d'urgence	147	38	Parties fixes flotteurs différents
Parties fixes de l'encordement rapide de troupes	97	20	Renfort structure
Système de surveillance des composants critiques (HUMS)	332	98	Câblage, rampe, supports Boîtes de commande supplémentaires Capteurs supplémentaires
Parties fixes leurres thermiques	90	20	Renforts, cales, supports
Système de détection des missiles (MILDS)	82	18	Dispositif de commande, supports, renforts et cales
Parties Fixes Camera FLIR	211	48	Caméra, flexibles, embase, supports Porte FLIR, support, goulotte Convertisseur
Parties Mobiles Camera FLIR	32	8	Tourelle caméra, support, platine et poignée

Les instructions de travail associées aux références commerciales nous permettent de découvrir quels sont les évènements qui ont conduit les équipes de développement à utiliser des composants différents et comment ceux-ci ont quand même permis aux deux appareils d'être assemblés sur une MMFAL.

Tranche [90% ; 100%[

**Instrument Landing System (ILS)<sup>5</sup> #1** : Sur les 18 composants de ce dispositif, un seul n'est pas réutilisé, il s'agit d'une prise de coupure : une pièce assurant l'interface du cheminement du harnais

<sup>5</sup> Dispositif facilitant l'approche lors des phases d'atterrissage d'un aéronef.

reliant le récepteur ILS au boîtier de commande. La prise de coupure permet au harnais de cheminer dans la même zone de montage bien que légèrement décalée par rapport à l'autre appareil.

**ILS #2** : Sur les 92 composants de la partie 2 de l'ILS, cinq ne sont pas réutilisés. Il s'agit d'éléments d'interface appartenant à l'antenne, au coupleur ainsi qu'au relais. La zone de montage est différente entre les deux appareils, il est donc nécessaire d'adapter les supports pour un environnement différent.

**Altimètre Radio #2** : Sur les 23 composants de l'altimètre, deux d'entre eux sont différents entre les deux appareils. Le joint n'a pas d'influence sur le montage de l'altimètre. Le boîtier de commande radio (composant différent) est différent à la suite d'un choix du client.

**Radar Météo** : Sur les 56 composants du radar météo, quatre d'entre eux sont différents. Les zones d'intégration des coupleurs sont différentes. Nous retrouvons les prises du radar (coupleur) et leurs supports différents.

**Identification Friend of Foe (IFF)<sup>6</sup>** : Sur les 55 composants de l'IFF, quatre d'entre eux sont différents entre les deux appareils. Les étiquettes ainsi que les tresses de métallisation n'ont pas d'influence sur l'assemblage en MMFAL de l'IFF.

Tranche [80% ; 90%[

**Helicopter Emergency Egress Lighting (HEEL)<sup>7</sup>** : Sur les 168 composants du HEEL, 27 ne sont pas réutilisés. Il s'agit en fait des lampes, leur alimentation et support. Un des deux clients a choisi uniquement la capacité d'accueillir le système d'éclairage de secours alors que l'autre client a choisi de l'installer à bord. Il s'agit donc d'une réutilisation totale.

**Flotteurs d'urgence** : Sur les 105 composants du flotteur d'urgence, 16 ne sont pas réutilisés. Un des appareils est plus lourd que l'autre, il n'est donc pas surprenant d'avoir trois flotteurs sur quatre différents. En effet ces derniers doivent être dimensionnés pour assurer une flottaison minimum. Les autres composants sont liés aux flotteurs différents. Cependant on remarque que le reste des composants, y compris les supports sont réutilisés. L'interface les intégrant à la structure est donc identique entre les deux.

**Kit de jumelles de vision nocturne (JVN)**: Sur les 11 composants du kit, deux ne sont pas réutilisés. Il s'agit du montage des prises sur lesquelles seront branchées les lunettes de l'équipage. Plus tôt, nous avons vu qu'un des appareils n'est pas équipé des lunettes de vision nocturne, cependant la capacité est quand même assurée dans le cas où le client choisit l'option ultérieurement. Les pièces non réutilisées correspondent au montage de la prise du troisième homme dans le poste de pilotage.

**Conditionnement d'air** : Sur les 70 composants du conditionnement d'air, 10 ne sont pas réutilisés. Les différents supports identifiés ainsi que la cale servent d'interface afin d'assurer l'assemblage des composants réutilisés.

---

<sup>6</sup> Dispositif permettant à un aéronef d'identifier un aéronef ami ou ennemi sur son radar.

<sup>7</sup> Dispositif d'éclairage d'urgence indiquant les sorties de secours de l'appareil.

**Émetteur/Récepteur (E/R) Very High Frequency (VHF)/Ultra High Frequency (UHF) :** Sur les 45 composants de l'E/R, six ne sont pas réutilisés. Comme le dispositif n'est pas installé au même endroit sur les deux appareils, les supports de prises, conduite de ventilation et collier de cheminement sont différents.

**Radio Managment System (RMS) :** Sur les 38 composants du RMS, cinq ne sont pas réutilisés. Ces cinq composants sont liés au boîtier de jonction de la radio. Le RMS n'étant pas installé au même endroit sur un des deux appareils, un boîtier de jonction est nécessaire pour assurer son assemblage.

**E/R spécifiques :** Sur les 66 composants de l'E/R, 10 ne sont pas réutilisés. Cet E/R n'a pas été installé sur l'appareil, ce qui correspond aux 10 composants non-réutilisés. Cependant cette installation est composée d'éléments communs à d'autres installations du même fournisseur.

Tranche ]70% ; 80%[

**Mitrailleuse de sabord :** Sur les 213 composants des deux mitrailleuses de sabord, 58 ne sont pas réutilisés. Le choix des mitrailleuses est différent entre les deux appareils, certains supports, cales et fixations sont donc également différentes. La plupart des composants critiques ne sont pas réutilisés alors que la réutilisation reste majoritaire.

**Sièges troupes :** Sur les 13 composants de la pré-installation des sièges, trois sont différents. Un des appareils à une capacité de sièges inférieure. Ainsi on retrouve une rangée de siège, une banquette et les filets de rangement en plus.

**Antenne et récepteur Global Positioning System (GPS) :** Sur les 60 composants du GPS, 12 sont différents dont le récepteur et les composants nécessaires à son intégration. L'antenne GPS et son support sont les parties invariables alors que le récepteur et son support des parties invariables.

**Flight Management System (FMS) :** Sur les 20 composants du FMS SAR, quatre (dont une étiquette) ne sont pas réutilisés, il s'agit d'une option de personnalisation choisie par le client d'un des appareils. Le calculateur et son environnement sont réutilisés, il s'agit de la partie invariable. Dans cette installation il n'y a pas de parties variables mais une partie spécifique qui correspond à l'option de personnalisation du client et qui utilise une pièce d'interface pour l'intégrer à l'appareil.

**E/R VHF/ Amplitude Modulation (AM) :** Sur les 37 composants, neuf ne sont pas réutilisés. Un des appareils utilise une antenne différente. Cependant la monture de l'antenne l'intégrant sur l'appareil reste identique entre les deux assurant ainsi une opération de montage identique.

**Partie fixes flotteurs d'urgence :** Sur les 147 composants, 38 ne sont pas réutilisés. Nous avons identifié précédemment que la différence de masse entre les deux appareils résultait d'un dimensionnement différent de la flottabilité d'urgence et donc de composants différents. Les parties fixes sont donc également différentes.

**Parties fixes encordement rapide de troupes :** Sur les 97 composants, 20 ne sont pas réutilisés. La structure des deux appareils étant différentes, les renforts nécessaires pour porter la poutre

d'encordement sont donc différentes. Les composants différents assurent l'intégration dans l'appareil malgré les différences structurelles.

**Health & Usage Monitoring System (HUMS)<sup>8</sup>** : Sur les 332 composants, 98 ne sont pas réutilisés. Les deux installations présentent la même fonction mais provenant de fournisseurs différents. Aussi, un des appareils présente plus de capteurs que l'autre pour ce système. Cependant elles restent intégrées dans les mêmes zones de montage. Les composants assurant les fonctions de détection communes sont les parties invariables. Les parties variables sont les composants différents assurant une fonction de détection commune. Enfin les parties spécifiques sont les composants assurant une fonction de détection supplémentaire.

**Parties fixes leurres thermiques** : Sur 90 composants, 20 ne sont pas réutilisés. Les lances-leurres sont différents entre les deux appareils. Cependant un châssis commun permet l'intégration des deux types de lances leurres au même endroit et un plan d'interface entre le support du lance leurre et le châssis assure cette adaptabilité. Ici la partie invariable représente le châssis et son environnement alors que les parties variables, les lances leurres et leur support.

**Missile Launch Detection Sensors (MILDS)** : Sur les 82 composants, 18 sont différents. Les différences proviennent du choix des clients qui ont choisis un système d'alerte missile différent mais provenant du même fournisseur. Les parties invariables sont alors les montures permettant d'intégrer les différentes parties de l'installation autour de l'appareil alors que les parties variables sont les composants critiques.

**Parties fixes et mobiles caméra Forward Looking InfraRed (FLIR)** : Sur les 243 composants, 56 ne sont pas réutilisés. Les deux systèmes utilisés proviennent de deux fournisseurs différents. Nous retrouvons donc en parties invariables le radome et son support ainsi que le châssis du FLIR (caméra qui assure la fonction associée). Les parties variables sont donc le FLIR et son environnement direct dont les boîtiers de commande, les faisceaux électriques, les différentes prises ainsi que les composants dont le plan d'interface assure l'intégration des caméras sur un radome réutilisé.

À travers l'étude approfondie de chacune des références commerciales, nous avons repéré quels sont les composants réutilisés et non réutilisés pour chacune d'elles. Le nombre de composants réutilisés moyen par références commerciales montre que les équipes de développement ont su intégrer ces références commerciales dans un appareil différent ou assurer une fonction équivalente en choisissant une référence commerciale différente. La section suivante présente les règles de réutilisation mises en place issues de la formalisation de l'analyse des fiches technique.

---

<sup>8</sup>Dispositif dont les capteurs, situés aux endroits critiques de l'appareil sont mise à disposition des pilotes pour signaler de manière prédictive toutes pannes de l'appareil.

## OUTPUT : Règles génériques de réutilisation

À l'issue de l'analyse des instructions de travail liées aux références commerciales. Nous avons pu instancier les premières règles de réutilisation de composants. Ces règles de réutilisation sont mises à disposition des équipes de développement dès les phases amont de conception afin d'avoir un aperçu de comment réutiliser les composants lorsque ceux-ci s'intègrent dans une installation commune entre deux hélicoptères différents. Le Tableau 17 ci-dessous présente les règles de réutilisation formalisées à la suite l'expérimentation de l'étape 2.1.

Tableau 17 : Règles de réutilisation liées aux références commerciales

Référence Commerciale	Scénario	Spécificité 1	Spécificité 2	Solution mise en place	Impact en MMFAL
<b>IFF</b>	La référence commerciale est entièrement réutilisable.				Opération identique
<b>E/R spécifiques</b>	Installation différente choisie par le client	Fournisseur commun		Réutilisation des composants standards par le fournisseur	Une partie de l'opération est identique
<b>MILDS</b>				Interface des composants critiques similaire	Intégration identique en MMFAL
<b>Mitrailleuse de sabord</b>		Fournisseur différent	Composants critiques en partie différents	Plans d'interface associés identiques	
<b>HUMS</b>			Capacités supplémentaires	Plans d'interfaces identiques entre les composants critiques	
<b>Parties fixes leurres thermiques</b>			Composants critiques différents	Utilisation d'un châssis dont l'interface est compatible avec les composants critiques des deux installations	
<b>E/R VHF/UHF</b>					
<b>Parties fixes et mobiles caméra FLIR</b>					
<b>ILS #1</b>	Zone de montage différente	Une partie de l'installation		Pièce d'interface assurant l'intégration du composant réutilisé	Une partie de l'opération est identique

<b>ILS #2</b>		Toute l'installation			
<b>RMS</b>					
<b>Radar Météo</b>					
<b>Altimètre Radio #2</b>	Composant critique différent	Composant choisi sur catalogue	Remplis les contraintes d'intégration du système de production	Plan d'interface assurant l'intégration du composant réutilisé	Intégration identique en MMFAL
		Composant conçu par le BE			
<b>Antenne et récepteur GPS</b>	Composants critiques différents	Découpage de l'installation pour trouver le maximum de réutilisation			Une partie de l'opération est identique
<b>E/R VHF/AM</b>		Utilisation d'un châssis dont l'interface est compatible avec les composants critiques des deux installations		Support dont le plan d'interface est compatible entre composants critiques et châssis	Intégration identique en MMFAL
<b>Partie fixes flotteurs d'urgence</b>	Dimensionnement différent	Réutilisation des composants uniquement de la plus petite capacité		Plan d'interface d'intégration des composants critiques supplémentaires identiques aux composants réutilisés	Une partie de l'opération est identique
<b>Flotteurs d'urgence</b>					
<b>Sièges troupes</b>					
<b>Flight Management System</b>	Option de personnalisation	Réutilisation de tous les composants critiques liés à la base de l'installation			Une partie de l'opération est identique
<b>Parties fixes encordement rapide de troupes</b>	Structure différente	Découpage de l'installation pour étendre la réutilisation		Utilisation d'une pièce d'interface compatible entre la structure et les composants critiques	Une partie de l'opération est identique
<b>HEEL</b>	Capabilité	L'installation de la capabilité pour assembler ultérieurement une installation est nécessaire pour s'assurer de son intégration au moment choisi.			

<b>KIT de lunettes de vision nocturne</b>		
<b>Conditionnement d'air</b>		

Le Tableau 17 caractérise les références commerciales étudiées en différents scénarios. Ce sont les scénarios que nous trouvons pendant l'analyse des instructions de travail. Chaque scénario peut se dissocier jusqu'à trois sous-scénarios.

Au total, nous avons trouvé six scénarios principaux (Installation différente choisie par le client, zone de montage différente, composant (s) critiques (s) différent(s), dimensionnement différent, option de personnalisation, structure différente et capacité) auxquels les équipes de développement peuvent faire appel lors de la réutilisation de composants sur une installation. Pour chacun de ces scénarios se trouvent les spécificités. La dernière couche représente la solution historiquement mise en place pour assurer la compatibilité avec la MMFAL malgré les contraintes rencontrées. Lorsque les équipes de développement, et plus particulièrement de conception rencontreront une contrainte dont le scénario est traité par l'étape 2.1, elles auront à disposition une règle de réutilisation à mettre en place.

### 3.2.2.3. Vérification et synthèse de l'étape 2.1

#### Vérification

Lors de l'étape 2.1, nous attendions de modéliser des règles génériques sur la réutilisation de références commerciales entre deux appareils de missions communes. Aussi, ces règles doivent être en mesure d'être adressées au BE et au BI pour les aider à visualiser les pratiques existantes de réutilisation de références commerciales.

A l'issue de l'étape, nous avons analysé 23 références commerciales et obtenu 13 règles de réutilisation. La méthode et l'analyse des fiches techniques nous ont permis de catégoriser les références commerciales en différents scénarios, spécificités et solutions mises en place. Ainsi, avec la présentation des impacts en MMFAL, cet outil permet au BE et au BI de visualiser les solutions historiquement mises en place pour lever les contraintes de réutilisation.

#### Synthèse

L'étape 2.1 de la formalisation des pratiques a pour **objectif de modéliser des règles de réutilisation** à partir de l'analyse des **références commerciales**. Le résultat attendu de cette expérimentation est donc de **vérifier si la démarche** mise en place permet de mettre à disposition **des règles génériques**. De plus, il est important que ces règles ne soient **pas une série de cas particuliers** mais que certaines soient redondantes.

L'étude de **23 références commerciales** nous a permis de mettre en place **13 règles de réutilisation**. De plus, l'étude des fiches techniques montre que **les règles ne représentent pas de cas particuliers** dans la mesure où différents scénarios de réutilisation sont associés à une même règle. Les résultats ont démontré la **capacité de la démarche à fournir une règle générique** que les équipes de développement peuvent suivre lors de la conception d'un appareil assemblable sur une MMFAL. Aussi, le tableau modélisé par l'expérimentation de la démarche **met en évidence les solutions** mises en place par **le bureau industriel**.

Maintenant qu'il est possible de prescrire quels composants doivent être réutilisés lorsqu'une référence commerciale ou un système est identique entre deux appareils à assembler en MMFAL, il convient de passer à l'étape suivante. Celle-ci vise à modéliser des métriques de suivi

### 3.2.3. Étape 2.2

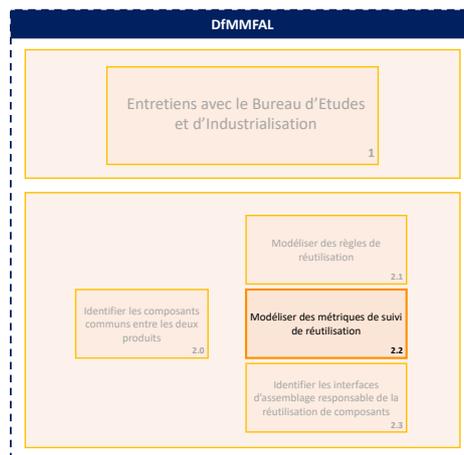


Figure 63 : Schéma de suivi – étape 2.2

L'expérimentation de l'étape 2.2 vise à modéliser les métriques de suivi de réutilisation à partir d'un couple d'hélicoptères existants ; les H125 et H130 (voir Figure 53). Le faible volume de composants contenu dans ces appareils facilite la mise en œuvre de notre outil avant de renforcer nos résultats avec le couple H215 et H225 (Figure 54).

Le protocole expérimental de l'étape 2.2 (voir Figure 64) se déroule en 3 parties. Premièrement, nous allons présenter les résultats escomptés à la suite de la modélisation des métriques. Ensuite, nous allons dérouler notre démarche. Sa construction reprend la démarche présentée en Section 2.2.2.3 (voir Figure 35). Enfin nous allons vérifier à travers la synthèse si les résultats obtenus sont conformes et vérifient nos hypothèses.

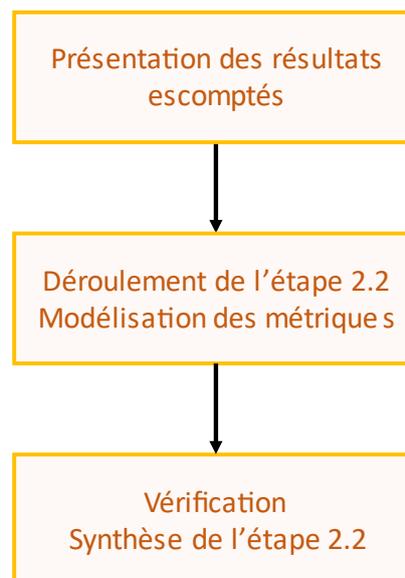


Figure 64 : Protocole expérimental de l'étape 2.2



- Niveau de granularité : Dans l'APP, le niveau de granularité est présenté dans la première colonne (Figure 66). Les niveaux supérieurs au niveau 4 ne sont pas pris en compte dans notre étude car ils ne rentrent pas dans le découpage modulaire.
- Zone de montage : Selon le standard du Bureau de Normalisation de l'Aéronautique et de l'Espace (BNAE)<sup>9</sup>, la zone de montage est représentée par deux des caractères de la référence d'une AS. Il est nécessaire de modifier l'APP en créant une nouvelle colonne dédiée à la zone de montage puis d'étendre la zone spécifiée à chaque référence sous-jacente de l'AS. La commande Excel permettant de spécifier la zone de montage à chaque composant est présentée sur la Figure 66.

Ni	Typi	Article	ZMH13	Zone de montage	Désignation article
1	AS	350ABA452SCH01	BA	STXT(C3;5;2);E2	CHEM PC ELEC SOUS BARQUE AVANT
2	SA	350A61258801		BA	CABL PRISE COLLECTIF B4
2	SA	350A61258804		BA	PRISE SHUNT CYCLOQUE 4G
1	AS	350ABA453SCH00		BA	DECAPAGE METAL MODULES DE MASSE
1	AS	350ABA454RX01		BA	CHEM PC ELEC MILIEU SOUS BARQUE
1	AS	350ABADB15RU00		BA	DEBIT PLATEAU CENTRAL AVANT NLR
2	SA	350A61303105		BA	PLATEAU AVANT ET RAILS
3	EP	350A61302800		BA	PLATEAU CENTRAL AVT EQUIPE
4	EP	350A61302820		BA	PLATEAU CENTRALE AVANT EQUIPE
3	EP	350A67807920		BA	PLATINE RELAIS
3	EP	350A61355721		BA	SUPPORT PRISE COUPURE

Figure 66 : Commande Excel permettant d'afficher la zone de montage associée à chaque référence de l'APP

La Figure 67 présente comment nous avons identifié les données avant le lancement de l'expérimentation. L'étape de préparation des données permet aussi d'alléger notre table. Choisir uniquement les caractéristiques utiles à notre étape nous permet ainsi d'augmenter la vitesse de calcul de notre outil et de réduire les risques de disfonctionnement. L'Annexe 3 est un extrait de la table de données prêtes pour la suite de l'étape.

<sup>9</sup> Le standard BNAE est une normalisation de la codification des composants dans les filières de l'aéronautique et du spatial sur le plan national, européen et international.

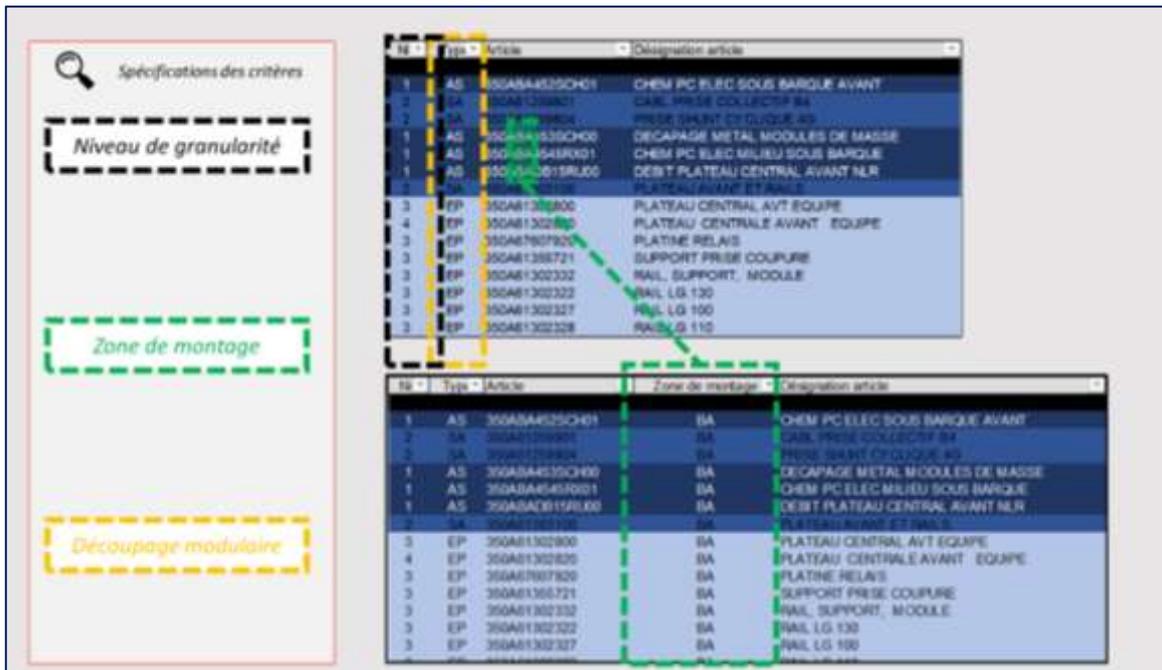


Figure 67 : Préparation des données pour l'étape 2.2

### Répartition selon les critères

Une fois que les différentes métriques ont été réunies sur le premier couple d'hélicoptère, il convient de totaliser la quantité d'éléments réutilisés en fonction des critères de modularité, de granularité et des zones de montage.

Lors de la décomposition de l'APP des appareils, nous nous sommes appuyés sur la Figure 51. Cependant, nous l'avons modifiée afin qu'elle représente la réalité du terrain depuis lequel nous avons expérimenté notre démarche. La Figure 68 correspond donc à cette version et représente comment se décompose les différents modules dans la conception d'un appareil. Dans notre étude, nous ne nous intéressons pas au niveau 1 de granularité. En effet les entretiens qualitatifs ont montré que les contraintes pour développer un MCA commun à deux ou plusieurs produits dans l'industrie hélicoptériste sont trop fortes pour être levées. Nous partons donc du principe que le MCA est différent. Si le MCA est commun alors on suppose que les équipes de développement ont su réutiliser l'intégralité de ses éléments sous-jacents.

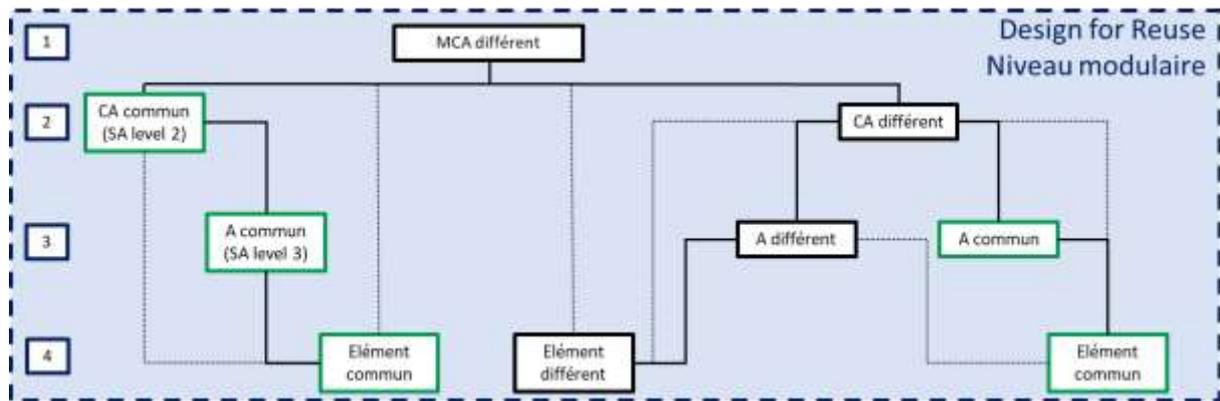


Figure 68 : Découpage utilisé pour les critères granularité et modularité

### Critères 'Granularité'

#### Niveau 2

Les composants que l'on retrouve au niveau 2 de granularité sont tous les composants montés sur la chaîne d'assemblage directement sur l'appareil. Chez Airbus Helicopters, il peut s'agir de SA ou E de niveaux 2, pièces élémentaires préassemblées ou achetées, installées directement. Les SA et E composant un niveau 2 peuvent être soit communs, soit différents.

#### Niveau 3

Les composants que l'on retrouve au niveau 3 de granularité sont les SA de niveau 3 ainsi les E sous-jacents au CA. Ce ne sont que les composants montés sur un assemblage ou pré assemblage. Les SA et E issus d'un niveau 2 différent peuvent être soit communs, soit différents à leur tour. Dans le cas d'un niveau 2 commun, les SA et E sous-jacents ne peuvent être que communs.

#### Niveau 4

Les composants que l'on retrouve au niveau 4 de granularité sont les E sous-jacents au niveau 3. Les E issus d'un niveau 3 différent peuvent être soit communs, soit différents à leur tour. Dans le cas d'un niveau 3 commun, les E sous-jacents ne peuvent être que communs.

### Critère 'Modularité'

#### Constituent Assembly (CA)

Les composants que l'on retrouve au niveau CA de modularité sont tous les SA de niveaux 2 de granularité dans l'APP.

#### Assembly (A)

Les composants que l'on retrouve au A de modularité sont tous les SA de niveaux 3 de granularité dans l'APP.

## Élément (E)

Les composants que l'on retrouve au niveau E de modularité sous tous les équipements, pièces élémentaires ou autres SA (de niveau 4 uniquement).

La Figure 69 présente un extrait d'un découpage modulaire et granulométrique d'une poutre de queue d'hélicoptère.

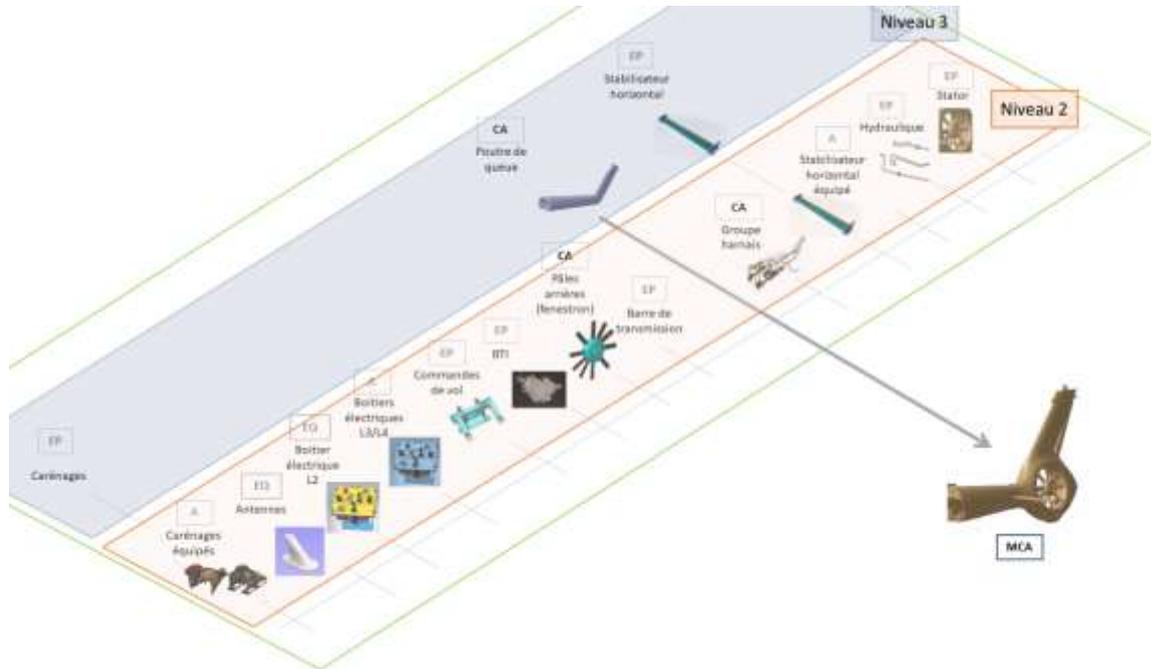


Figure 69 : Exemple d'un découpage modulaire et granulométrique sur la poutre de queue d'hélicoptère

Le Tableau 18 présente tous les critères de l'étape 2.2. La représentation des zones de montage sur un hélicoptère est décrite dans l'Annexe 4. Notons que pour des raisons de lisibilité dans ce document nous n'avons gardé que les 20 valeurs de zones de montage communes entre les deux couples étudiés bien que l'étude ait été effectuée sur l'ensemble des zones de montage. Les hélicoptères de grandes tailles comme les H215 et H225 se décomposent en zones de montage différentes dû aux différences de conception et de dimension. Le critère 'Granularité' se décompose en trois sous-critères que sont les niveaux 2, 3 et 4 et 'Modularité' se décompose également en trois sous-critères que sont les CA, A et E.

Tableau 18 : Les différents critères de l'étape 2.2

Critères					
Zone de montage	BA – Barque	Granularité	2	Modularité	Constituent Assembly (CA)
	CD – Cabine Droit				
	CF – Cloison Pare-Feu				
	CG – Cabine Gauche				
	EC – Ensemble Cargo				
	EX - Extérieur				
	HZ – Hors Zones		3		Assembly (A)
	ME – Boite de transmission				
	PB – Planche de Bord				
	PE – Poutre de Queue (Extérieur)				
	PI – Partie Intermédiaire				
	PL – Plancher Pilote				
	PM – Plancher Mécanique		4		Element (E)
	PP – Poste Pilote				
	PQ – Poutre de Queue (Intérieur)				
	QD – Quart de Coque Droit				
	QG – Quart de Coque Gauche				
	RE - Réservoir				
TZ – Toutes Zones (Divers)					
VE - Verrière					

### Résultats

Une fois l'AR lancée, il convient de répartir le résultat selon nos différents critères. Dans un premier temps nous présenterons les résultats en fonction des critères de modularité et de granularité. Ensuite, nous présenterons ceux liés aux différentes zones de montage de notre appareil.

#### *Modularité et Granulométrie*

La répartition des résultats de l'AR a été faite à la main dans cette étude. La fonction tri et les tableaux croisés dynamiques nous ont permis d'obtenir nos différents chiffres et d'en déduire les pourcentages de réutilisation selon chaque critère. La Figure 70 présente la démarche qui nous a permis de compter le total de réutilisation selon les critères de granularité, une démarche similaire a été utilisée pour définir les pourcentages de réutilisation selon nos critères de modularité.

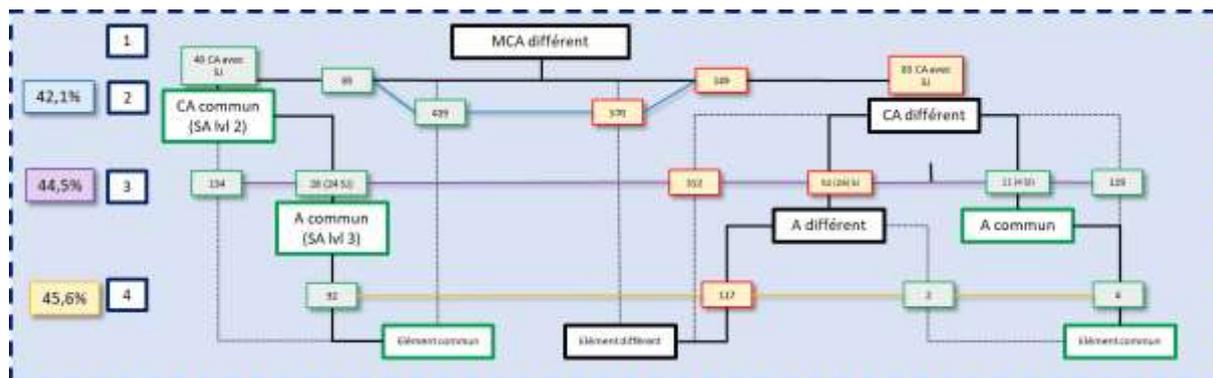


Figure 70 : Résultats de l'étape 2.2 sur le couple H130/H125

Le Tableau 19 reprend les résultats selon les critères de modularité et de granularité. Les différents critères présentent tous un taux de réutilisation proche entre eux. La moyenne de ces différents critères est de 42,60%. En d'autres termes il semblerait qu'avec un taux de réutilisation d'au moins 40%, il est envisageable d'assembler deux appareils sur la MMFAL. Le critère avec le plus faible taux de réutilisation est le niveau CA de Modularité avec 36,30%. Ce qui s'explique par le fait que dans l'industrie hélicoptériste, il est difficile de réutiliser des grands ensembles, les différentes contraintes listées d'après nos entretiens qualitatifs en sont la cause. Le critère avec le plus haut taux de réutilisation est le niveau 4 de granularité avec 45,60% de réutilisation, soit seulement 9,3% de plus que le critère CA. À l'instar de ce dernier critère, plus le niveau de granularité est bas, plus il est facile de réutiliser de petits composants, moins influencés par les contraintes de développement d'un appareil.

Tableau 19 : Résultats de l'étape 2.2 selon les critères de granularité et de modularité

Critères		H125/H130
Modularité	CA	36,30%
	A	42,90%
	Element	44,20%
Granularité	2	42,10%
	3	44,50%
	4	45,60%

#### Zone de montage

La fonction des tableaux croisés dynamiques d'Excel nous a permis de répartir notre répartition du pourcentage de réutilisation selon nos critères de Zones de montage. Le Tableau 20 présente les résultats de l'étape selon les 20 valeurs de la zone de montage. La moyenne de réutilisation entre les zones de montage est de 60,21%, où la valeur minimum est la poutre de queue-extérieur (PE avec 37,22%) et la valeur maximum est l'ensemble boîte de transmission (Mechanics (ME) avec 93,13%). Cela s'explique par la différence de design entre les deux poutres de queue, une présente un carénage autour du rotor arrière, entraînant une diversité dans les composants de cette

zone. Concernant les boîtes de transmission, nous retrouvons ici un point soulevé lors des entretiens qualitatifs : un effort particulier avait été fait lors du développement du H130 pour reprendre le maximum d'éléments de la boîte de transmission principale du H125.

Tableau 20 : Résultats de l'étape 2.2 selon les zones de montage

Zone de montage	r = 1	Total	Réutilisation
BA	324	618	52,43%
CD	111	174	63,79%
CF	24	29	82,76%
CG	21	31	67,74%
EC	222	468	47,44%
EX	454	821	55,30%
HZ	26	49	53,06%
ME	2129	2286	93,13%
PB	44	113	38,94%
PE	265	712	37,22%
PI	177	249	71,08%
PL	27	42	64,29%
PM	405	609	66,50%
PP	299	551	54,26%
PQ	357	539	66,23%
QD	59	93	63,44%
QG	135	276	48,91%
RE	184	215	85,58%
TZ	248	503	49,30%
VE	141	330	42,73%
<b>Total</b>	<b>5652</b>	<b>8708</b>	<b>60,21%</b>
<b>Reuse total</b>	<b>64,91%</b>		

Il est nécessaire de procéder à une étape de validation afin de s'assurer de comment réutiliser ces résultats en tant qu'indicateur de suivi de développement, toujours en suivant l'objectif de développer un produit compatible avec une MMFAL. La section suivante présente cette étape de validation, lancée sur un couple de H215/H225 (Figure 54).

### Renforcement des résultats

Pour garantir la pertinence dans l'orientation de la décomposition des hélicoptères en fonction de la réutilisation, nous avons la possibilité de renforcer les résultats avec le couple d'hélicoptère H215 et H225 (Figure 54). Les appareils sont plus lourds et contiennent une plus grande quantité de composants. Il est donc intéressant d'observer les différences et similitudes entre les deux résultats de l'étape 2.2 pour nous aider à formaliser nos métriques et identifier une décomposition générique potentielle. La Figure 71, le Tableau 21 et le Tableau 22 présentent les résultats obtenus à la suite de cette phase de renforcement. Certaines similitudes entre les deux couples sont à noter. Le Tableau 21 présente la différence relevée entre les appareils légers et lourds. Sur les six critères présents au sein

du tableau, nous remarquons que quatre d'entre eux possèdent moins de 10% de différence, les niveaux CA et E de modularité ainsi que les niveaux 2 et 3 de granularité. Cependant les écarts entre les niveaux A de modularité et niveau 4 de granularité sont supérieurs avec respectivement 34,97% et 42,11%. La différence de réutilisation moyenne des critères entre les deux couples est de 15,22%.

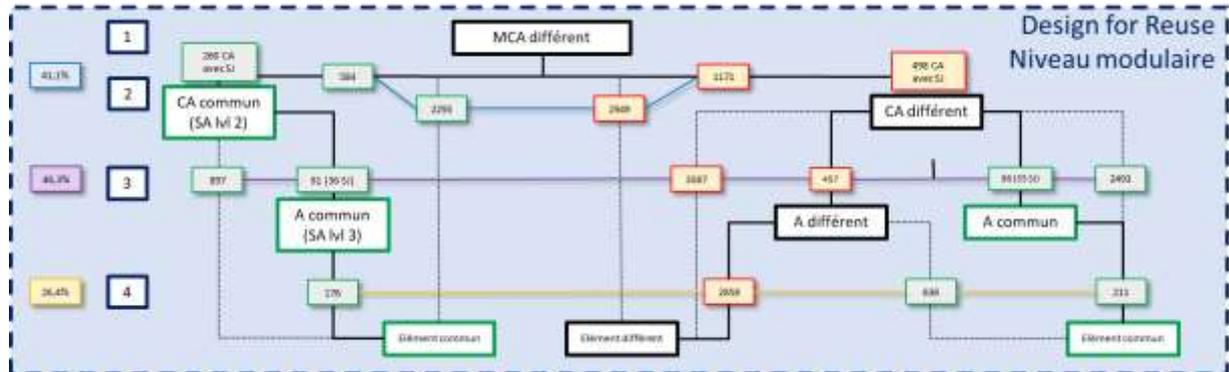


Figure 71 : Résultats de l'étape de renforcement de l'étape 2.2 sur le couple H215/H225 selon les critères de modularité et granularité

Tableau 21 : Résultats de l'étape 2.2 avec l'étape de renforcement

Critères		H125/H130	H215/H225
Modularité	CA	36,30%	33,30%
	A	42,90%	27,90%
	E	44,20%	41,70%
Granularité	2	42,10%	41,10%
	3	44,50%	46,30%
	4	45,60%	26,40%
	Total	42,60%	36,12%

Tableau 22 : Résultats de l'étape de renforcement de l'étape 2.2 sur le couple H215/H225

Zone de montage	C = 1	Total	Réutilisation
BA	1651	5586	29,56%
CD	1520	3540	42,94%
CF	297	813	36,53%
CG	1138	2583	44,06%
EC	2171	8090	26,84%
EX	1863	4213	44,22%
HZ	2731	4766	57,30%
ME	1338	2706	49,45%
PB	480	781	61,46%
PE	59	986	5,98%
PI	995	2783	35,75%
PL	410	951	43,11%
PM	2658	4959	53,60%
PP	948	2340	40,51%
PQ	166	1561	10,63%
QD	221	325	68,00%
QG	327	860	38,02%
RE	1244	3214	38,71%
TZ	590	2577	22,89%
VE	170	951	17,88%
<b>Total</b>	<b>20977</b>	<b>54585</b>	<b>38,37%</b>
<b>Reuse total</b>	<b>38,43%</b>		

Les résultats correspondants à la validation selon le critère des zones de montages sont visibles sur le Tableau 22. Tout d'abord nous pouvons observer que la quantité globale de composants largement supérieur sur notre second couple, le taux de réutilisation est également éloigné du taux de réutilisation du couple d'hélicoptères légers. La valeur minimum correspond à l'extérieur de la poutre de queue (PE) avec 5,98% de réutilisation. Cette zone correspond aux habillages de la poutre de queue ainsi qu'aux équipements intégrés sur l'habillage. La valeur maximum est le quart de coque droit (QD) avec 68% de réutilisation. Il s'agit de la jupe latérale de l'hélicoptère.

À travers la répartition du taux de réutilisation selon nos différents critères, nous avons repéré que l'étape de renforcement révèle des similitudes sur quatre de ces six critères, les niveaux « CA » et « E » de modularité et 2 et 3 de granularité. Aussi, nous remarquons que le taux de réutilisation globale entre les deux couples est très proche malgré la différence du nombre de composants entre les deux couples alors que la répartition selon les zones de montage ne révèle pas de similitudes particulières. La section suivante présente les données de sorties de l'étape 2.2.

## OUTPUT : Modélisation des métriques

L'étape 2.2 se présente comme une analyse profonde de l'existant et a pour but de décrire la décomposition dans la réutilisation de composants. Son utilisation s'inscrit dans la continuité de la précédente étape. Adresser une orientation dans la décomposition ainsi que des métriques de suivi de

réutilisation aux équipes de développement sert alors de recommandations pour s’assurer du bon usage de la réutilisation en vue de l’assemblage du produit en MMFAL. Le Tableau 23 présente les métriques modélisées au cours de cette étape. Ces métriques ont été validées par les ingénieurs responsables de la conception d’un appareil lors des entretiens qualitatifs. Une fois lancée sur un appareil en cours de développement cette étape permettra aussi de visualiser l’écart dans la répartition de la réutilisation de composants avec ces indicateurs.

Tableau 23 : Indicateurs clés à suivre lors du développement d’un nouvel appareil à assembler en MMFAL

Critères							
Zone de montage	BA	3,77%	Granularité				
	CD	19,30%					
	CF	36,53%					
	CG	27,27%					
	EC	11,59%					
	EX	36,04%					
	HZ	54,29%					
	ME	49,45%					
	PB	11,48%					
	PE	5,98%					
	PI	29,11%					
	PL	8,33%					
	PM	20,89%					
	PP	12,15%					
	PQ	10,63%					
	QD	17,86%					
	QG	16,49%					
	RE	38,71%					
	TZ	22,89%					
	VE	1,65%					
			2	41,10%	Modularité	Constituent Assembly (CA)	36,30%
			3	44,50%		Assembly (A)	42,90%
			4	26,40%		Element (E)	44,20%

Les valeurs de réutilisation affichées dans le Tableau 23 correspondent aux valeurs minimums des deux couples d’appareils de notre cas d’étude. Il est spécifique à Airbus Helicopters. Au total nous avons pu adresser trois familles de métrique dans notre instanciation. La première correspond aux zones de montage et comprend 20 valeurs. La seconde métrique, les niveaux de granularité comprend trois valeurs. En ligne d’assemblage finale, les équipes du système de production ne travaillent qu’avec les composants de niveau 2 de granularité. Enfin la dernière métrique comprend également trois valeurs et correspond au découpage modulaire du produit. Les appareils assemblés en MMFAL présentent un taux de réutilisation autour des 40%, calculé sur la base de nos deux couples d’hélicoptères. Il s’agit d’une valeur cible. L’analyse de plusieurs couples supplémentaires peut préciser ces indicateurs.

### 3.2.3.3. Vérification et synthèse de l'étape 2.2

#### Vérification

Lors de l'étape 2.2, nous attendions de modéliser des métriques de suivi de la réutilisation catégorisées par critères. Dans un premier temps, l'étape a effectivement permis d'attribuer une valeur de réutilisation sur chacun des critères définis par la méthode DfMMFAL, et ce, pour les deux couples d'hélicoptères de l'expérimentation. Seul le critère relatif aux installations fonctionnelles des appareils n'a pas été attribué faute de disponibilités des données lors de l'expérimentation.

A l'issu de l'étape, nous attendions également un schéma générique orientant le découpage d'un appareil en fonction de certains critères. Au cours de l'expérimentation de l'étape, nous avons mis au point ce schéma qui nous a permis d'attribuer les valeurs de réutilisation pour les critères de modularité et de granularité. Aussi, un tableau reprenant un ensemble de zones de montage des appareils permet d'attribuer les valeurs de réutilisation. Ces documents ont pour but d'être mis à disposition des BE et BI.

#### Synthèse

L'étape 2.1 de la formalisation des pratiques a pour **objectif de modéliser des métriques de suivi de réutilisation** à partir d'une analyse multicritères. Le résultat attendu de cette expérimentation est donc de **vérifier si la démarche** mise en place permet de mettre à disposition **ces métriques**.

L'étude de deux couples d'hélicoptère a permis **d'établir une liste de critères** dont les valeurs montrent la **répartition de la réutilisation des couples assemblés en MMFAL**. Il en résulte que quatre de ces six critères (les niveaux « CA » et « E » de modularité et 2 et 3 de granularité) présentent des **valeurs proches, autour de 40% de réutilisation**.

Les résultats ont démontré la **capacité de la démarche à fournir une série de métriques de réutilisation** mise à disposition, sous forme de schéma d'orientation de réutilisation et d'un tableau présentant la série de zones de montage. Ces documents seront à disposition des BE et BI lors de la conception de nouveaux appareils.

Maintenant que la démarche a montré sa capacité à fournir des métriques de réutilisation sous forme de document à destination des BE et BI, il convient de passer à l'étape suivante. Celle-ci vise à modéliser des métriques de suivi de réutilisation.

### 3.2.4. Étape 2.3

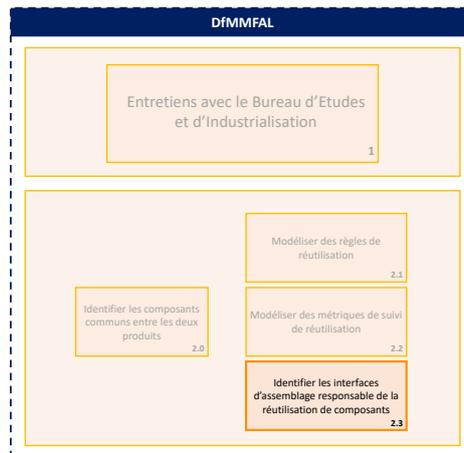


Figure 72 : Schéma de suivi – étape 2.3

L'expérimentation de l'étape 2.3 vis à identifier les interfaces d'assemblage responsable de l'intégration des composants réutilisés. Dans cette étape nous utilisons les couples H215/H225 (Figure 54) et H125/H130 (Figure 53). Les deux appareils partagent la même variante de mission. Un hélicoptère peut être décliné en plusieurs variantes de mission : recherche et sauvetage, services d'urgence ou transport de VIP en sont quelques exemples. Le protocole expérimental de l'étape 2.3 se déroule en trois parties. La première consiste à exposer les résultats attendus de cette. Ensuite, nous lançons notre démarche, sa construction reprend celle présentée sur la Figure 35. Enfin, nous allons vérifier à travers la synthèse si les résultats obtenus sont conformes et vérifient nos hypothèses.

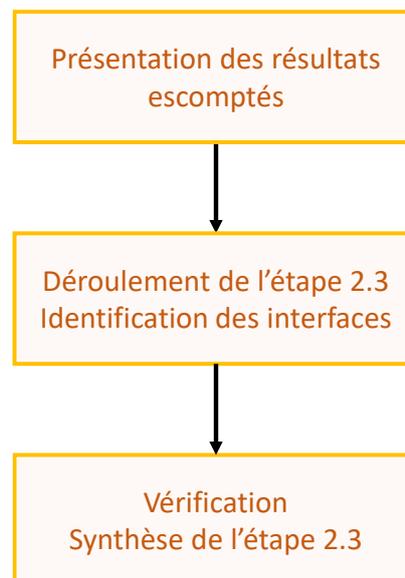


Figure 73 : Protocole expérimental de l'étape 2.3

### 3.2.4.1. Résultats escomptés

L'apport primaire relatif à cette étape est de vérifier si l'algorithme à base de règles est capable d'identifier les interfaces d'assemblage responsables de la réutilisation des composants à travers l'expérimentation de la démarche sur deux hélicoptères assemblés sur une MMFAL. Aussi, nous avons mis en place dans cette démarche, des listes d'interdiction visant à filtrer les éléments non pertinents pouvant être identifiés par l'algorithme. Nous attendons également que certains composants aient été filtrés par les listes.

Enfin, nous attendons une mise en évidence des solutions mises en place par le BI et à destination du BE pour réutiliser des composants et les intégrer.

### 3.2.4.2. Déroulement de l'étape 2.3

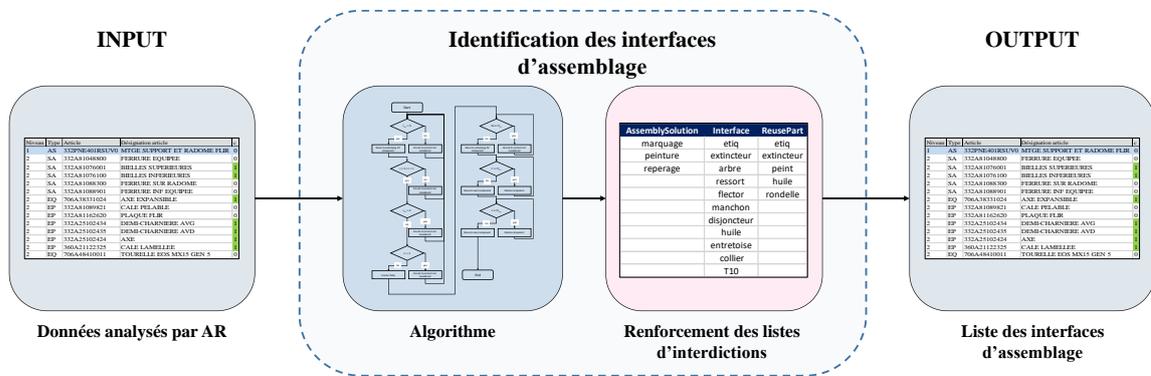


Figure 74 : Rappel de la démarche de l'étape 2.3

### Première itération : Identification des interfaces d'assemblage

À partir des résultats de l'AR, l'algorithme est lancé une première fois. Le Tableau 24 affiche les résultats : les AS<sub>r=0</sub> avec comme références sous-jacentes SA<sub>r=1, r=0</sub> EP<sub>r=1, r=0</sub> EQ<sub>r=1, r=0</sub>. Les interfaces d'assemblage potentielles sont identifiées à l'aide d'un indice 'i' visible dans la dernière colonne. Lorsque 'i = 1', le composant est identifié comme une interface d'assemblage.

Tableau 24 : Extrait de l'opération du montage du FLIR avec les résultats de l'algorithme

Niveau	Type	Article	Désignation article	r	i
1	AS	332PNEXXXXXX	MTGE SUPPORT ET RADOME FLIR	0	0
2	SA	332AXXXXXXX	FERRURE EQUIPEE	0	1
2	SA	332AXXXXXXX	BIELLES SUPERIEURES	1	0
2	SA	332AXXXXXXX	BIELLES INFERIEURES	1	0
2	SA	332AXXXXXXX	FERRURE SUR RADOME	0	1
2	SA	332AXXXXXXX	FERRURE INF EQUIPEE	0	1
2	EQ	706XXXXXXXXX	AXE EXPANSIBLE	1	0
2	EP	332AXXXXXXX	CALE PELABLE	0	1
2	EP	332AXXXXXXX	PLAQUE FLIR	0	1

Après avoir obtenu les résultats de la première application sur notre couple d'hélicoptères, l'algorithme a détecté 613 composants réutilisés et 713 interfaces d'assemblage identifiées correspondantes (Tableau 25). Cette première démonstration a pour but de préparer l'étape de renforcement des listes d'interdiction. En effet, certaines des 713 interfaces spécifiées ne sont pas des interfaces valides ; il faut donc fournir un effort supplémentaire pour détecter les interfaces non-valides et remplir les listes d'interdiction. L'étape de renforcement des listes est décrite à travers la deuxième itération dans la section suivante.

Tableau 25 : Résultats de l'algorithme après le premier déploiement

	<b>AS</b>	<b>Composants réutilisés</b>	<b>Interfaces</b>
Première itération	110	613	713

### Seconde itération : Renforcement des listes d'interdiction

Cette phase consiste à apporter une correction à l'algorithme après l'exécution de la première itération. L'algorithme ne pouvant fournir des résultats optimaux, une technique de renforcement est à prendre en compte pour améliorer la pertinence des interfaces d'assemblage identifiées.

Trois listes d'interdictions ont alors été mises en place lors de l'élaboration des règles de décision. Une pour les interfaces, une pour les composants réutilisés et une pour les opérations d'assemblage. Parmi les 713 interfaces d'assemblage spécifiées, tous les composants ne sont pas des interfaces valides. Certains d'entre eux s'avèrent être conformes à l'algorithme basé sur les règles bien qu'il ne s'agisse pas d'interfaces recherchées. Il est possible de les reconnaître en utilisant la désignation de l'élément lorsque celle-ci ne fait pas référence à une interface. Par exemple, une étiquette a été identifiée par l'algorithme à base de règles comme une interface. Dans l'opération concernée, l'étiquette est la seule référence non réutilisée car elle indique dans la langue du client la désignation de son installation qui se trouve être réutilisée dans le second appareil. Les étiquettes sont fréquemment utilisées dans les produits pour placer des marqueurs et indiquer la position des instruments de vol et des équipements à l'intérieur de la structure pour faciliter les opérations de maintenance par exemple. Lorsque les étiquettes sont différentes (en fonction de la langue du client), l'algorithme risque de les détecter comme étant une interface. On peut donc généraliser l'exclusion du terme « étiquette » grâce aux listes d'interdiction.

Elle sera donc ajoutée à la liste des interdictions afin de garantir que l'algorithme n'identifie plus aucune pièce contenant le mot « étiquette » dans sa désignation. C'est le test 2.2 qui compare le composant identifiable comme une interface ( $r = 0$ ) avec la liste d'interdiction, comme le mot « étiquette » y figure désormais, ce dernier ne sera pas retenu.

Après avoir identifié le reste des composants n'évoquant pas une interface d'assemblage identifiés par l'algorithme, nous implémentons les mots repérés dans notre catalogue d'interdiction. Le

même processus est appliqué aux opérations d'assemblage non pertinentes et aux composants réutilisés non pertinents. Les corrections les plus critiques effectuées au cours de cette étape sont présentées dans le Tableau 26. Une fois la liste d'interdictions terminée, l'algorithme à base de règles est déployé une seconde fois. Cette liste a pour vocation d'être consultée à chaque fois que l'algorithme est lancé.

Tableau 26 : Exemple de mots figurant dans la liste d'interdiction

<b>Assembly Solution</b>	<b>Interface</b>	<b>Composants réutilisés</b>
marquage	etiquette	eti
peinture	extincteur	extincteur
reperage	peinture	peint
	ressort	huile
	flector	rondelle
	manchon	
	disjoncteur	
	huile	

Après avoir rempli les différentes listes d'interdictions, la seconde itération présente un résultat de 95 solutions d'assemblage regroupant 235 interfaces d'assemblage responsables de la réutilisation de 459 composants (Tableau 27).

Tableau 27 : Résultats de l'algorithme après le second déploiement

	<b>AS</b>	<b>Composants réutilisés</b>	<b>Interfaces</b>
Seconde itération	95	459	235

En conséquence, la liste des interfaces identifiées a été réduite de 67%. La désignation de 478 interfaces spécifiées ne fait pas référence à des interfaces et a donc été ajoutée à la liste d'interdiction pour le prochain test. Cependant, même si la liste d'interdiction réduit de 67% le total des interfaces identifiées, 12% d'entre elles ne sont pas des interfaces valides. Une phase de validation est alors nécessaire pour les découvrir. Cette phase de validation visuelle est décrite dans la section ci-dessous.

### Validation visuelle des interfaces et OUTPUT

La phase de validation visuelle des interfaces a pour but de vérifier si les interfaces identifiées sont réellement les interfaces d'assemblage qui ont permis l'intégration d'un composant réutilisé. Nous utiliserons une approche étape par étape dans laquelle une partie des AS identifiées comme ayant des interfaces seront examinées à travers leur fiche technique. L'instruction de travail présente la séquence d'opérations pour accomplir la tâche d'assemblage des composants apparaissant dans l'AS.

Nous pourrions visuellement vérifier si le composant marqué comme interface par l’algorithme l’est réellement. Dans ce document, le dessin des pièces est lié aux références des composants. Ces instructions de travail, reliées aux AS, sont considérées comme suffisamment pertinentes pour affirmer qu’une interface identifiée est une véritable interface. Nous analyserons les fiches techniques des deux appareils intégrant le composant réutilisé. Notre expérience ainsi que celle d’experts dans le domaine de l’industrie et de la production nous permettent de procéder à cette étape de validation. Sur les 95 AS identifiées comme comprenant des interfaces d’assemblage, nous n’en vérifierons qu’une partie choisie aléatoirement. L’échantillon est présenté dans la section suivante. Dans cette section nous ne présenterons que trois AS intégrant un composant réutilisé ainsi qu’une ou plusieurs interfaces d’assemblage pour l’intégrer dans l’appareil différent. La première AS que nous analyserons est le montage d’une antenne GPS.

#### Montage d’une antenne GPS

L’ouverture des fiches techniques du montage de l’antenne des deux appareils nous montre le composant réutilisé. Dans le H125, l’antenne GPS intégrée directement sur sa structure alors que sur le H130, un composant intermédiaire est utilisé pour assurer son intégration sur la structure. Nous pouvons alors en déduire que l’interface identifiée au sein de cette AS est bien une interface d’assemblage qui a permis d’intégrer le composant du premier appareil dans le second. Figure 75 présente l’information visuelle qui nous a permis de constater la validation de la présence de l’interface d’assemblage.

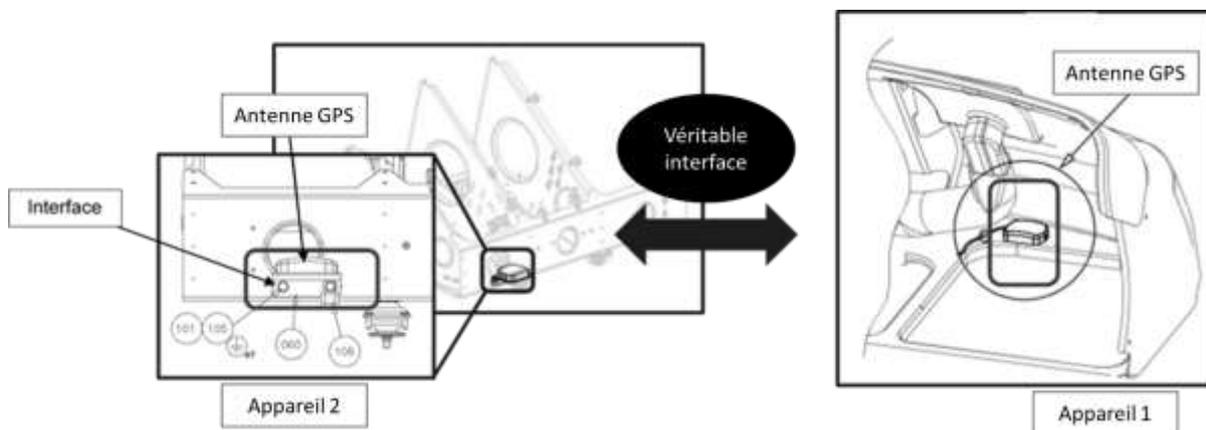


Figure 75 : Comparaison des deux fiches techniques du montage d’une antenne GPS

#### Assemblage relai et boîtier disjoncteur

L’ouverture des fiches techniques de cette opération pour les deux appareils nous révèle que la plaque d’interface identifiée correspond effectivement à une véritable interface. Le schéma de la Figure 77 met en avant l’intégration du relai réutilisé alors que la Figure 76 montre l’installation sur le H125 sans utiliser d’interface. La plaque d’interface assure effectivement la fonction d’intégration. C’est donc une interface d’assemblage. Contrairement à la Figure 77, la Figure 76 n’est pas un plan

issu de la CAO de l'appareil. En effet, bien que de nouvelles versions aient vu le jour, le H125 ayant été conçu dans les années 1970, ses systèmes ne sont pas tous dessinés en CAO. C'est pourquoi nous retrouvons dans les fiches techniques des photos du montage.

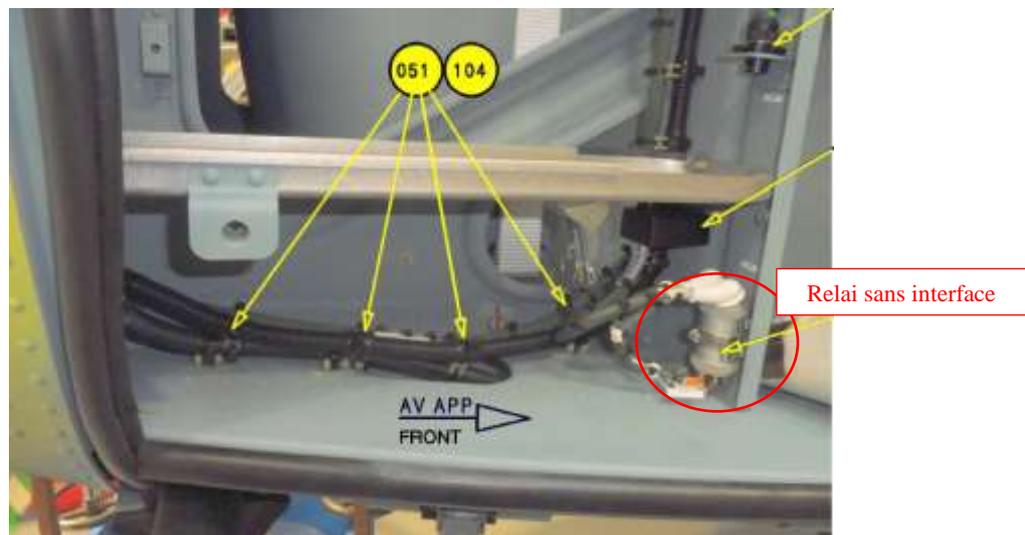


Figure 76 : Intégration du relai sans plaque d'interface sur le premier appareil

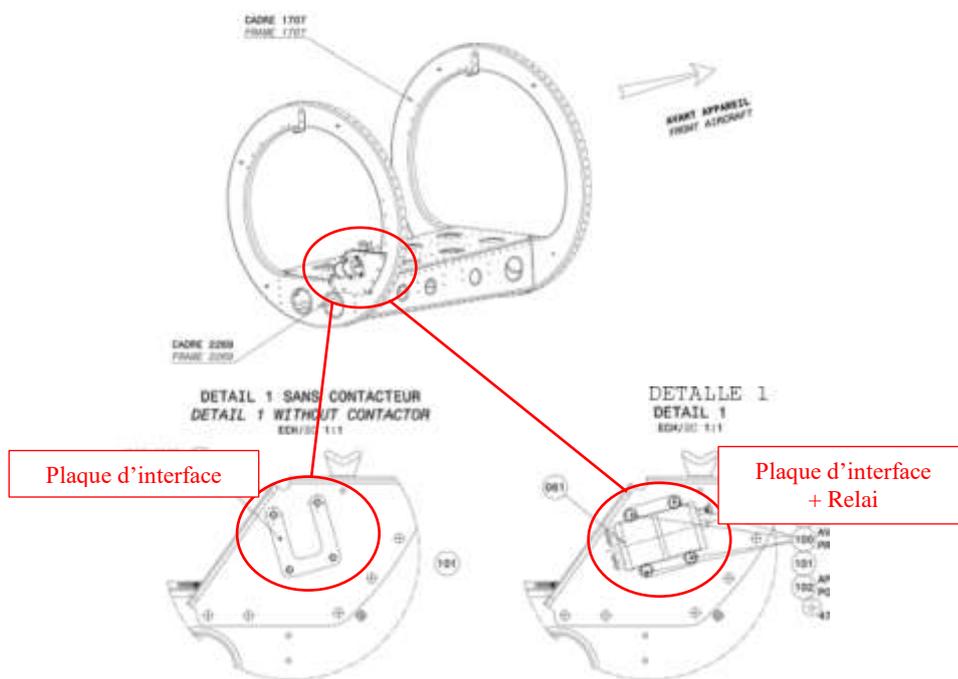


Figure 77 : Intégration du relai de disjoncteur avec une plaque d'interface pour le second appareil

### Équipement du réservoir

Dans cette opération d'assemblage, le réservoir des deux appareils est identique. Cependant, ils ne sont pas équipés de la même façon comme la montre la Figure 78. En effet la platine et ses liens de réservoir sont différents et jouent le rôle d'interface afin de permettre l'intégration du réservoir

complet du H125 sur le H130. La lecture des fiches techniques correspondantes nous ont confirmé la présence d'interfaces identifiées par notre algorithme. Il s'agit de la platine et des liens d'interface.

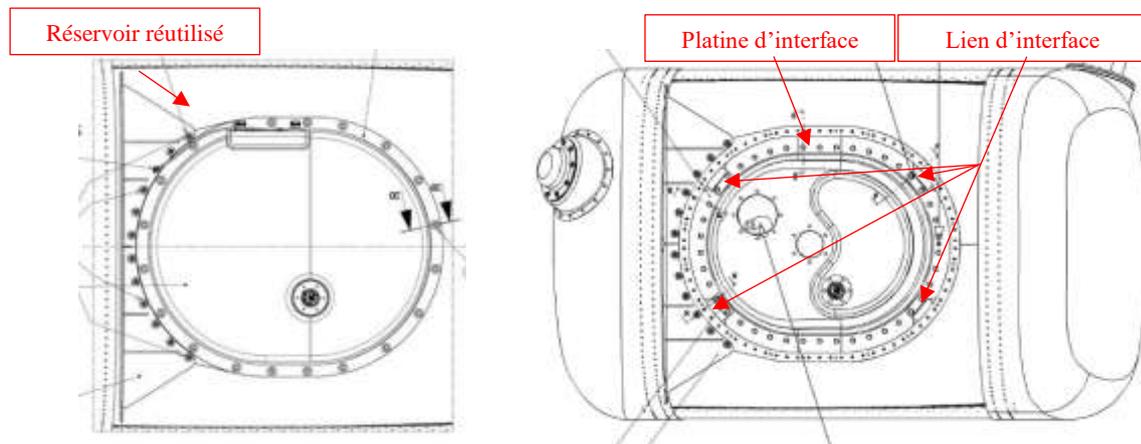


Figure 78 : Équipement des réservoirs de l'appareil A à gauche et 2 à droite

Le Tableau 28 présente les résultats du travail de recherche. Le même processus est appliqué aux 95 AS qui comprennent 235 interfaces d'assemblage identifiées ainsi qu'à la deuxième paire d'hélicoptères pour obtenir des résultats plus précis.

Après avoir obtenu la validation visuelle des interfaces d'assemblage en analysant leurs fiches techniques correspondantes, 207 (88%) interfaces sont vraies pour les hélicoptères légers. La démarche a été lancée sur le couple d'appareil lourd et 304 (84,9%) des interfaces d'assemblage se sont révélées être vraies.

Tableau 28 : Résultats de l'étape 2.3 après les deux itérations et l'étape de validation

<i>Itération 1 &amp; 2</i>		<i>Étape de Validation</i>				
		AS	Composants réutilisés	Interfaces	Interfaces valides	Total
Hélicoptères Légers	Itération 1	110	613	713		
	Itération 2	95	459	235	207	88%
Hélicoptères Lourds	Itération 1	195	1124	1083		
	Itération 2	177	843	358	304	84,9%

### 3.2.4.3. Vérification et synthèse de l'étape 2.3

#### Vérification

L'étape 2.3 avait pour objectif de tester la capacité à la démarche de proposer une liste des interfaces d'assemblage responsable de la réutilisation des composants réutilisés entre deux appareils. Les deux couples d'hélicoptères ont été testés lors de l'expérimentation. Il en résulte une liste d'interfaces pour chacun des couples. Cette liste comprend les composants réutilisés et leurs interfaces

d'assemblage correspondantes et sont classés par AS. Une colonne précise si le composant est réutilisé et une autre s'il s'agit d'une interface.

De plus, les listes issues de l'étape 2.3 sont à destination des BE et BI. Il leur est donc possible de consulter la fiche technique de l'AS correspondante pour visualiser comme la solution a été conçue pour intégrer un composants réutilisé dans un appareil différent.

A l'issu de l'expérimentation de l'étape 2.3 nous avons donc à disposition une liste d'interfaces (voir extrait Tableau 24) d'assemblage ainsi que la possibilité de visualiser comment celles-ci permettent d'intégrer le composant réutilisé correspondant.

## Synthèse

L'étape 2.3 de la formalisation des pratiques a pour objectif **d'identifier les interfaces** d'assemblage responsables de l'intégration des composants réutilisés à l'aide d'**un algorithme à base de règles** et de **listes d'interdiction**. Le résultat attendu est donc **une liste de composants** dans laquelle **apparaît distinctement** ceux identifiés comme **interfaces**. Aussi, nous nous attendons à ce que **les listes d'interdictions** aient pu **filtrer** certains composants comme n'étant **pas des résultats pertinents**.

L'expérimentation de l'étude 2.3 a permis **de démontrer le fonctionnement de l'algorithme**. Les listes d'interdiction ont été complétées avec les premiers résultats et le second test nous a montré l'**efficacité des listes** en passant de **713** interfaces identifiées à **235**. Enfin, la validation visuelle nous a permis de **valider notre algorithme** avec un total de **88,0% d'interfaces** identifiées comme de véritables interfaces d'assemblage sur **le couple d'appareils légers** et **84,9% sur le couple lourd**. Aussi, la liste d'interfaces générée par l'expérimentation de la démarche **met en évidence les solutions** mises en place par **le bureau industriel**.

L'expérimentation de l'étape 2.3 permet donc de fournir une liste de véritables interfaces d'assemblage ayant permis l'intégration de composants réutilisés au sein de deux appareils différents.

### 3.3. Synthèse de l'expérimentation des étapes de la méthode DfMMFAL

Le troisième chapitre a décrit les expérimentations liées à la formalisation des recommandations DfMMFAL. Airbus Helicopters, et plus particulièrement la direction de transformation PLM rattachée à la direction des opérations centrales, nous a permis de tester les étapes de notre méthode pour évaluer sa capacité à répondre à notre problématique.

Les entretiens qualitatifs nous ont permis de formaliser les connaissances via d'une part l'élaboration du processus de conception d'un nouveau produit. D'autre part via la mise en place d'un tableau de recommandations, nécessaires pour lever les contraintes relatives à la conception d'un appareil compatible avec une MMFAL.

L'analyse des deux couples d'hélicoptères a permis d'expérimenter nos quatre étapes suivantes dans le cadre de la formalisation des pratiques. À l'issue de ces expérimentations, les démarches de ces étapes ont révélé être en mesure de fournir des règles de réutilisation, des métriques de suivi de réutilisation avec une orientation du découpage d'un appareil ainsi qu'une série de solution d'intégration de composants réutilisés.

Chacune de ces cinq étapes fonctionne avec une démarche d'utilisation. L'objectif du Chapitre 3 était de vérifier si la démarche permettait d'obtenir les résultats escomptés. C'est dans la suivante que nous discuterons de ces résultats par rapport à notre problématique initiale et à nos hypothèses.

### 3.4. Discussions

Dans cette section nous précisons que les étapes de notre modèle constituent une première approche dans le développement de produits compatibles avec une MMFAL. Aussi, l'expérimentation des étapes de traitement est adaptée à l'industrie hélicoptériste et plus particulièrement à Airbus Helicopters. Cependant, grâce à la généralité de la méthode, nous pouvons préconiser les entreprises désireuses d'une telle approche, notre modèle DfMMFAL pour aider les équipes de développement à concevoir un produit compatible avec une MMFAL.

À travers les expérimentations de la formalisation des connaissances et des pratiques menées grâce aux cas d'étude d'Airbus Helicopters, nous avons pu tester notre méthode DfMMFAL et ainsi dégager des axes d'amélioration.

#### Étape 1

Lors de l'expérimentation de l'étape 1, le but était de vérifier si la démarche associée de la méthode DfMMFAL permet, grâce aux réponses apportées, de nous apporter deux apports. D'une part dresser un schéma résumant le process de conception d'un nouvel appareil chez Airbus Helicopters pour mieux comprendre les interventions des différents acteurs du développement. D'autre part, être capable de dresser un tableau synthétisant les différentes contraintes de conception concernant la réutilisation de composants et l'assemblage en MMFAL. Ce tableau devait également être accompagné des recommandations associées. A l'issue de l'expérimentation, le tableau obtenu présente **9 règles pratiques palliant 6 contraintes** de conception pour un assemblage en MMFAL. **Deux schémas** ont également été élaborés à la suite des entretiens. Un **schéma de découpage modulaire** permettant de visualiser les différentes solutions permettant un assemblage en MMFAL et le **processus de conception d'un nouveau produit**.

Nous considérons que les réponses des participants aux entretiens sont valables pour nos résultats, malgré le fait que les recommandations et les conseils apportés par les différents experts ne soient que des règles pratiques. Les réponses des participants sont pertinentes car ils ont une expérience considérable dans la conception et la production d'hélicoptères et leurs réponses proviennent de leurs expériences professionnelles et d'exemples réels. Par conséquent, les recommandations associées aux différentes contraintes dans notre tableau vérifient l'efficacité de la première étape pour fournir les connaissances nécessaires à l'aide des équipes de développement dans la conception de produits compatibles avec une MMFAL.

#### Étape 2.0

Lors de l'expérimentation de l'étape 2.0, le but était de vérifier si la démarche mise en place pouvait nous proposer une identification de tous les composants communs entre deux appareils depuis

un APP. Après avoir effectué l'AR, l'étape 2.0 a été en mesure de nous fournir l'APP du second produit en indiquant pour chacun des composants réutilisés un indice «  $r = 1$  ». En conséquence, nous sommes en mesure de vérifier le fonctionnement de la démarche de l'étape 2.0 de la méthode DfMMFAL. En ce qui concerne le couple d'appareils légers **H125/H130**, **5 600** composants ont été identifiés comme **réutilisés**. Sur le couple d'hélicoptères lourds **H215/H225**, **26 094** composants ont été identifiés comme **réutilisés**.

## Étape 2.1

Lors de l'expérimentation de l'étape 2.1, plutôt que d'utiliser les systèmes et sous-systèmes fonctionnels des deux produits pour identifier les composants réutilisés, nous avons utilisés les références commerciales. La gestion de configuration actuelle chez l'industriel ne nous permettait pas de lier les APP étudiées avec leurs ensembles fonctionnels décomposant l'appareil. Aussi, la confidentialité, l'accessibilité et le volume de données relatives à ces ensembles n'étaient pas compatible avec le cadre de notre thèse. Choisir les références commerciales était donc un moyen plus accessible pour vérifier si notre étape 2.1 **pouvait mettre à disposition des règles génériques** de réutilisation de composants **en fonction de différents ensembles**. Les références commerciales représentent un ensemble de composants décrivant une spécificité d'un appareil et est donc comparable avec une spécificité similaire sur un autre appareil.

Finalement, **l'expérimentation de l'étape 2.1 a pu nous proposer 13 règles de réutilisation** à partir de l'analyse de 23 références commerciales. Ces références commerciales comprennent plus de 70% de réutilisation. Ces règles restent pratiques, elles sont basées sur des observations, on ne peut donc pas les qualifier de règles théoriques. Même si nous ne n'attendions pas un nombre spécifique de règles de réutilisation pour valider l'étape, les résultats obtenus montrent **qu'il est possible de formaliser** ces règles à partir de l'analyse des références commerciales de deux produits grâce à la démarche de l'étape 2.1.

La gestion de configuration peut être différente d'un industriel à l'autre. Cependant, à partir de la mise en évidence d'un regroupement de composants en ensembles comparables d'un appareil à un autre, l'étape mise en place reste applicable et est en mesure de mettre à disposition des règles génériques pour les équipes de développement. Ainsi, l'étape 2.1 est généralisable dans le cas d'une application chez un industriel.

## Étape 2.2

Lors de l'expérimentation de l'étape 2.2, nous n'avons pas été en mesure d'adresser des métriques de réutilisation au niveau ensemble fonctionnel, à l'instar de l'étape précédente. Nous avons donc **obtenu des métriques en fonction des critères des niveaux de granularité, de modularité et de zones de montage**. Cette expérimentation est basée sur l'étude de deux couples d'hélicoptères, un

couple d'appareil léger et un couple lourd. Celui-ci nous a permis de renforcer nos résultats et d'affiner les métriques obtenues par notre démarche ainsi que de vérifier si les résultats obtenus par l'étape de traitement convergent vers une répartition de la réutilisation de composants homogènes entre des familles différentes d'hélicoptères. Au total, nous avons pu attribuer les valeurs de réutilisations sur **26 métriques identifiés**. Les valeurs sont ainsi classées par zone de montage (**20 métriques**), niveaux de granularité (**3 métriques**) et niveaux de modularité (**3 métriques**) Les niveaux de granularité et de modularité ne montrent pas d'écart particulièrement significatifs entre les deux couples d'appareils. En ce qui concerne les zones de montages, nous ne relevons pas de convergences particulières. Cela peut en partie s'expliquer par la différence de taille entre les deux couples et à la quantité de composants assemblés dans les différents appareils. Nous avons pu noter pendant l'exécution du cas d'étude, que les zones de montage entre les différents couples présentaient des divergences qui peuvent expliquer cette différence dans les résultats.

Aussi, un nombre plus élevé de cas d'étude à soumettre à l'étape 2.2 nous aurait permis de dresser des résultats plus précis et de vérifier si une convergence particulière existe bien. Cependant, **les résultats obtenus** lors de l'expérimentation ont quand même **montré la capacité de l'étape 2.2** mise en place à **mettre à disposition des métriques de suivi de réutilisation** aux équipes de développement ainsi que la capacité à **orienter le découpage de l'appareil** dans sa **répartition de la réutilisation** des composants.

L'étape 2.2 ainsi mise en place est généralisable dans le cas d'une application chez l'industriel à partir des données de l'APP liées à différents critères mis en place.

### Étape 2.3

L'expérimentation de l'étape 2.3 montre et témoigne des progrès et **des résultats positifs obtenus par l'algorithme pour identifier les interfaces d'assemblage** comprises au sein des APP. L'étape **s'appuie sur l'algorithme de détection** qui identifie les interfaces d'assemblage responsable de la réutilisation de composants entre différents appareils. D'autre part, du fait des différentes règles de détection, un tri supplémentaire était nécessaire et a donné naissance **aux listes d'interdiction**. Le fait que les listes créées soient réduites prouvent que l'algorithme fonctionne bien. Les différentes listes ont su détecter et ignorer 67% des interfaces identifiées lors de la première exécution de l'algorithme de détection. Au fur et à mesure que l'outil sera utilisé et détectera des fausses interfaces d'assemblage, les utilisateurs ajouteront les mots associés à la liste et l'outil deviendra de plus en plus précis. Finalement, l'étape de validation visuelle montre que respectivement 88% et 84,9% des interfaces d'assemblage restantes permettent l'intégration de composants réutilisés. En tout, **207 interfaces** ont été identifiées pour le couple **d'hélicoptères légers** et **304 interfaces** pour le couple **d'hélicoptères lourds**.

Cependant, dans le modèle de données utilisés, les APP n'intègrent pas tous les composants des produits. En effet, si un fournisseur livre l'intégralité du fuselage de base d'un produit, alors certaines interfaces d'assemblage ne figurent pas dans l'APP. Il en résulte une perte d'interfaces d'assemblage identifiables. Cependant, la prise en compte de cette limitation augmente la complexité du modèle puisque ce n'est pas l'industriel qui gère les informations requises, mais le fournisseur.

Dans la mesure où **l'étape a pu identifier une certaine quantité d'interfaces d'assemblage**, il est en mesure de **les adresser aux équipes de développement** comme solutions permettant l'intégration de composants réutilisés entre différents appareils à assembler sur une MMFAL. Ainsi quelle que soit l'industrie dans laquelle est utilisé l'étape 2.3 de la méthode, celle-ci est généralisable dans le cas d'une application chez l'industriel. Ces recommandations restent objectives et pratiques car basées sur les observations pratiques d'un cas d'étude. Ce ne sont pas des règles théoriques.

## Validation de nos hypothèses

Les expérimentations de notre méthode DfMMFAL autour de la formalisation des connaissances et de la formalisation des pratiques nous permettent de valider nos hypothèses de recherche.

En effet, comme nous l'avons vu dans les sections précédentes, notre méthode DfMMFAL a permis de formaliser des recommandations techniques pour aider les équipes de développement à concevoir un produit compatible avec une MMFAL. De plus, les différentes règles et recommandations issues des étapes de traitement de la méthode ont permis d'améliorer les échanges entre les processus de conception amont et des systèmes de production à travers l'application des solutions en fonction des différentes phases de développement d'un produit. À travers ce travail de formalisation, nous avons pu montrer que DfMMFAL permet de créer un ensemble de règles et recommandations pour aider les équipes de développement à concevoir un produit compatible avec une MMFAL.

## Synthèse du troisième chapitre

Dans ce troisième chapitre, nous avons présenté les expérimentations des cinq étapes de notre méthode DfMMFAL pour tester et valider nos deux hypothèses de recherche. Nous nous sommes appuyés sur le cas d'étude d'Airbus Helicopters, notamment à travers l'analyse de deux couples d'hélicoptères, les H125/H130 et H215/H225, couples assemblés en MMFAL mais dont les pratiques n'ont pas été formalisées. Le Tableau 29 suivant résume ce travail d'expérimentations en présentant les objectifs, les conclusions de chacune ainsi que la ou les hypothèses associées à l'étape.

Tableau 29 : Synthèse des expérimentations sur la méthode DfMMFAL

Expérimentations	Objectifs	Conclusion	Hypothèses
<p><b>Étape 1</b></p> <p>-</p> <p><b>Formalisation des connaissances</b></p>	<p>Comprendre les spécificités du terrain relatives aux activités de conception, de réutilisation et d'assemblage en MMFAL.</p>	<p>Les entretiens ont permis de dresser le processus de développement d'un nouvel appareil entre le BE et l'architecture industrielle. <b>9 règles et recommandations</b> sont formalisées à partir des connaissances pour pallier <b>6 contraintes de développement</b> envers une MMFAL.</p>	<p><b>H1</b> : À l'issue de cette étape, des recommandations techniques et conceptuelles ont été modélisées pour combattre les contraintes relatives à l'assemblage en MMFAL.</p> <p><b>H2</b> : L'étape a montré sa capacité à générer le schéma des phases de développement d'un hélicoptère.</p>
<p><b>Étape 2.0</b></p> <p>-</p> <p><b>Identification des composants communs</b></p>	<p>Identifier les composants communs entre deux produits à partir de leur APP. Remonter les données visibles de l'industrialisation au niveau BE.</p>	<p>La démarche de l'étape 2.0 permet d'identifier <b>5 600 composants réutilisés</b> pour le couple H125/H130 et <b>26 094</b> pour le couple H215/H225. Nous l'appelons AR. Les résultats sont mis à disposition du BE.</p>	<p><b>H2</b> : Le BE a désormais une démarche formalisée permettant de connaître comment sont réutilisés les composants entre les appareils.</p>
<p><b>Étape 2.1</b></p> <p>-</p> <p><b>Modélisation des règles de réutilisation</b></p>	<p>Modéliser des règles de réutilisation à partir des résultats de l'AR croisés avec les références commerciales.</p>	<p>La démarche de l'étape 2.1 permet de modéliser <b>13 règles de réutilisation génériques</b> à partir de l'étude de <b>23 références commerciales</b> associées aux résultats de l'AR.</p>	<p><b>H1</b> : L'étape a pu modéliser des règles génériques, considérées comme des recommandations techniques.</p> <p><b>H2</b> : Elle permet également de visualiser les solutions mises en place par le BI et à destination du BE pour réutiliser des ensembles.</p>
<p><b>Étape 2.2</b></p> <p>-</p> <p><b>Modélisation des métriques</b></p>	<p>Modéliser des métriques multicritères pour orienter la réutilisation dans le découpage d'un nouveau produit et assurer le suivi de la réutilisation lors de sa conception.</p>	<p>Les métriques modélisées par la démarche de l'étape 2.2 permettent d'orienter la réutilisation dans le découpage du produit. L'utilisation de <b>26 métriques</b> classés en <b>3 familles de critères</b> (zone de montage, granularité, modularité) lors des</p>	<p><b>H1</b> : L'ensemble des métriques de suivi modélisées par l'étape représente des recommandations techniques.</p> <p><b>H2</b> : Oriente le découpage modulaire entre le BE et BI.</p>

		différentes phases de développement permet de visualiser la répartition de la réutilisation au sein d'appareils assemblés en MMFAL.	
<b>Étape 2.3</b> - <b>Identification des interfaces</b>	Identifier à l'aide d'un algorithme à base de règles et de listes d'interdiction les interfaces d'assemblage responsable de l'intégration des composants réutilisés.	La démarche de l'étape 2.3 permet d'identifier <b>511 interfaces d'assemblage responsables de l'intégration des composants réutilisés</b> . L'utilisation de cette démarche est associée à un algorithme à base de règles et aux listes d'interdiction.	<b>H1</b> : L'ensemble des résultats fournis par l'étape représente des recommandations techniques. <b>H2</b> : Elle permet également de visualiser les solutions mises en place par le bureau industriel et à destination du BE pour réutiliser des composants et les intégrer.

L'analyse des résultats de ces quatre expérimentations a permis de valider nos hypothèses de recherche. En effet, la méthode DfMMFAL a permis de formaliser des règles et recommandations techniques pour aider les équipes de développement à concevoir un produit compatible MMFAL. La méthode DfMMFAL a permis d'améliorer les échanges entre les processus de conception amont et les systèmes de production.

- **H1** : La formalisation des connaissances et des pratiques a permis de modéliser des règles génériques, des métriques de suivi et d'orientation, un recueil d'interfaces d'assemblage associées au composants réutilisés. Ces résultats forment un ensemble de recommandations techniques mis à disposition des équipes de développement pour les assister lors de la conception d'un produit compatible en MMFAL
- **H2** : Les démarches de notre méthode DfMMFAL ont permis de formaliser des résultats et recommandations techniques jusqu'alors jamais établis au sein de l'entreprise. Les remontées de connaissances et de pratiques entre le BE et le BI n'ont jamais été effectuées auparavant dans un objectif d'assemblage mixte. Notre méthode a donc montré une certaine capacité à proposer des démarches pour y parvenir et favorise ainsi les échanges entre le BE et le BI.

L'analyse et la comparaison des différentes démarches utilisées dans les expérimentations nous ont également permis d'identifier des axes d'améliorations de notre méthode.

Dans le Chapitre 4, nous présenterons la version améliorée de notre méthode qui représente l'apport principal de ces travaux de recherche.





# Chapitre 4

## Apports et limites

## Chapitre 4 : Apports et limites

### Introduction du quatrième chapitre

Dans ce quatrième chapitre, nous rassemblons l'ensemble des résultats de nos travaux de recherche afin d'en proposer une synthèse. Nous présenterons tout d'abord les apports scientifiques et industriels de notre recherche. Puis nous aborderons les limites auxquelles nous avons été confrontées en termes de contexte mais aussi de méthode.

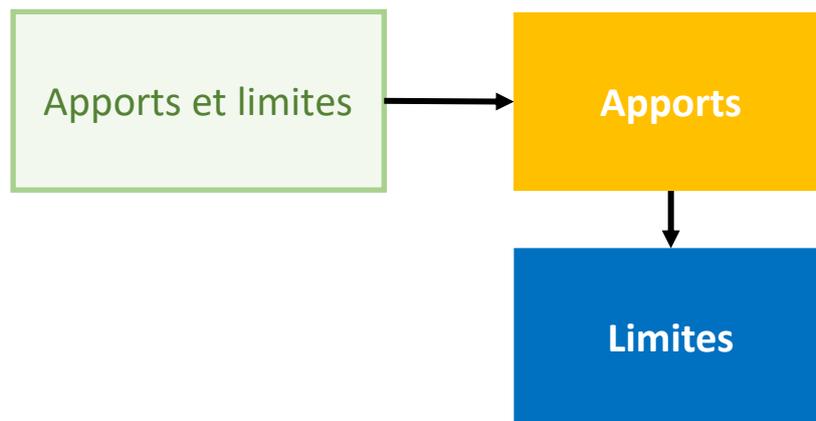


Figure 79 : Structure du quatrième chapitre

### Apports

De nombreux travaux proposent des méthodologies, approches ou outils basés sur les principes de DfA ou DfMA et traitant de sujets comme la modularité, la réutilisation de composants ou la standardisation des interfaces d'assemblage. Aussi, les MMFAL sont un sujet largement abordé autour des sujets de séquençement et d'équilibrage de la ligne. Cependant pour des industries manufacturières complexes où la différence de travail entre deux produits ne peut être compensée par ces sujets, il convenait de prendre en compte des contraintes d'une MMFAL dès les phases amont des processus de conception permettant d'orienter les produits vers un système de production commun.

Ces travaux ont été motivés par la problématique de recherche suivante : comment assister les équipes de développement à concevoir de manière optimisée des nouveaux produits compatibles avec une ligne d'assemblage finale multi-modèles ? Problématique mettant en avant l'importance d'apporter une méthodologie aux équipes de développement pour concevoir de tels produits.

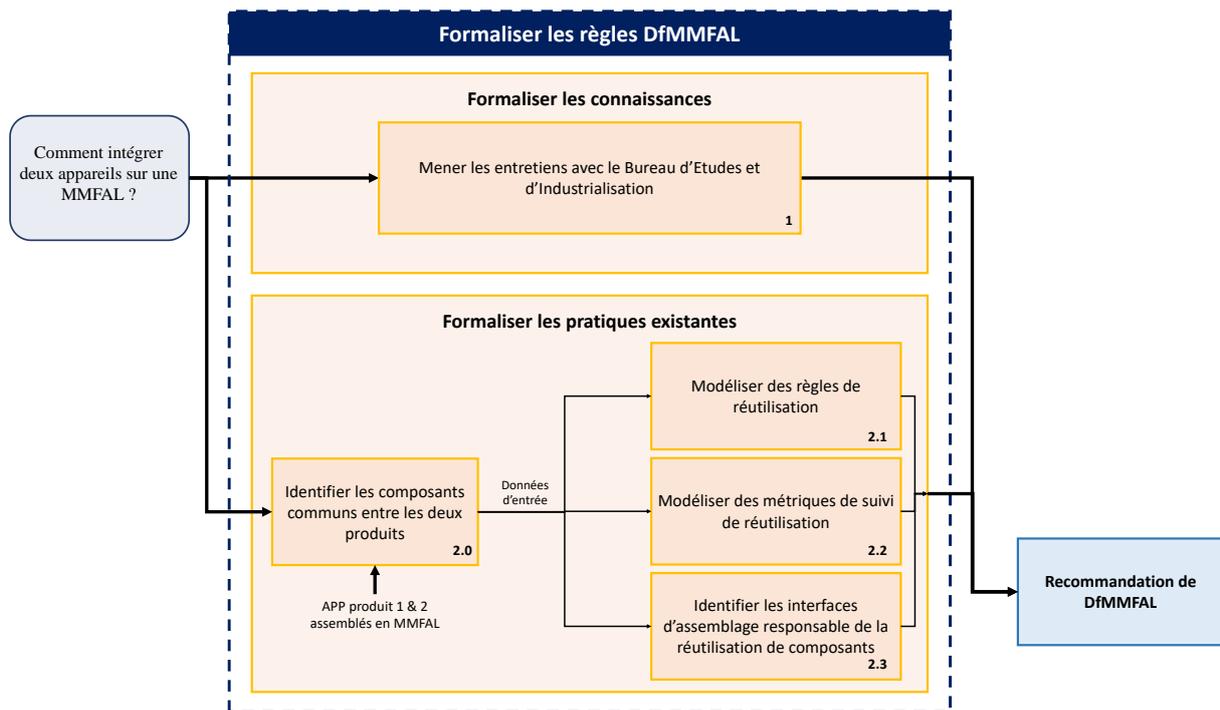


Figure 80 : Méthode DfMMFAL

Pour y répondre nous avons proposé **une méthode de DfMMFAL** (Figure 80) aux entreprises ayant **déjà assemblé deux produits sur une MMFAL** mais **dont aucune pratique ou règle n'ont été formalisée**. Cette méthode repose sur l'utilisation des résultats **d'une analyse de la réutilisation de composants entre deux appareils assemblés en MMFAL**. C'est à partir **du traitement de ces résultats** que **trois étapes** proposent une formalisation des pratiques visant à **modéliser des règles et recommandations** à destination des équipes de développement.

L'étape 1 présente une démarche pour conduire des entretiens qualitatifs. Les entreprises de l'industrie manufacturière ayant chacune leurs spécificités, la méthode DfMMFAL commence par une étape de formalisation des connaissances basé sur une série d'entretiens autour des équipes de développement, d'un nouveau produit. Ainsi, l'architecture produit, industrielle et la réutilisation des composants sont des sujets traités dans ces entretiens. Cette étape permet de dresser le processus de développement d'un nouveau produit dans l'industrie concernée. Elle permet aussi de présenter les différentes contraintes opposées aux équipes de développement relatives au Design Reuse et à l'assemblage en MMFAL. Ces contraintes sont aussi accompagnées de différentes recommandations techniques et organisationnelles pour les lever.

L'étape 2.0 permet d'**identifier les composants communs** entre différents appareils assemblés en FAL à partir de leur APP.

**L'étape de traitement 2.1** est en mesure de **modéliser des règles de conception** pour aider les équipes de développement à identifier et sélectionner les solutions permettant la réutilisation complète ou partielle de références commerciales entre deux produits à assembler en MMFAL.

**La démarche fonctionne**, elle permet, à partir d'un cas existant de **recupérer les informations** nécessaires et de **déduire des règles et recommandations**. Il se penche vers la liaison entre les différents ensembles de deux appareils produits en MMFAL et leur AS correspondantes. Un des **prérequis pour cette étape** est de **faire le lien entre les AS et les ensembles** ciblés pour comparer deux produits. Lorsque les ensembles sont réutilisés entre les deux appareils, l'étape formalise la solution de réutilisation alors mis en place. Lors des expérimentations, une série de règles de réutilisation ont été mises en place et qui ont été utilisées sur deux hélicoptères assemblés sur une MMFAL. Par ailleurs, une fois l'étape mise en place, il permet d'aller chercher rapidement les installations dont le design et l'intégration sont compatibles avec la MMFAL concernée, et donc de les réutiliser telle quelles.

**L'étape de traitement 2.2** propose des **métriques de réutilisation** pour assurer le suivi des valeurs qui ont permis l'assemblage en MMFAL de deux produits existants. Ces valeurs sont mises en place autour de plusieurs critères pour adresser un modèle fin de réutilisation autour du produit. Aussi, la modélisation de ces métriques pourrait mettre en avant un schéma de répartition pour orienter le bureau d'étude ou d'industrialisation sur les efforts de réutilisation à accomplir.

**La démarche de l'étape fonctionne**, elle permet, à partir de cas existants de **recupérer les informations relatives à ces différents critères** et d'en **déduire les métriques de réutilisation** associées à partir des résultats des résultats de l'étape 2.0. La démarche se porte vers les **niveaux de granularité**, le **découpage modulaire**, les **zones de montage** ainsi que sur les **installations fonctionnelles**. L'étape décrit également comment faire le lien entre les différents critères et les résultats de l'étape 2.0 à comparer.

Enfin, **l'étape de traitement 2.3** est en mesure de **fournir une liste d'interfaces** d'assemblage responsable de **l'intégration de composants réutilisés**. Il propose une **identification** des interfaces qui ont servies **de solutions d'intégration** d'un composant réutilisé entre deux produits assemblés en MMFAL mais dont ces **solutions n'ont pas été formalisées**. L'étape fonctionne à partir d'un **algorithme** à base de règles chargé de détecter les interfaces. Cet algorithme communique avec des **listes d'interdiction** pour s'assurer que les interfaces détectées sont **pertinentes**. Aussi, cette étape suppose que les composants réutilisés n'interfèrent pas avec la faisabilité géométrique et donc avec la séquence d'assemblage du produit à concevoir.

**Le modèle proposé est une méthode de formalisation de règles** génériques pour aider et assister les équipes de développement lors de la conception de nouveaux produits. Son utilisation

repose sur la formalisation de règles de conception qui ont conduit, dans le passé, à développer des appareils compatibles avec une MMFAL. **Son but n'est pas de prendre des décisions systématiques et définitives.** Les résultats obtenus par l'expérimentation de notre méthode DfMMFAL ne représente pas nécessairement la solution "optimale". Par conséquent, la **solution technique doit être remise en question** avant son acceptation. Cependant, elle permet aux entreprises désireuses d'envisager un assemblage de deux produits différents en MMFAL en se basant sur le principe du DfMMFAL.

Pour les entreprises dont :

- 1) **Le processus de conception** de deux produits ayant conduit par le passé à leur assemblage en MMFAL n'a pas été formalisé et ;
- 2) La remontée d'information entre **le système de production et le processus de conception** est faite de manière indépendante et sans processus particulier,

nous proposons une méthodologie générique pour formaliser un processus de conception amont suivant un principe de DfMMFAL. **Nous adressons donc des règles de conception axées sur la réutilisation d'ensembles de composants, des métriques de suivi de réutilisation et des solutions d'intégration de composants réutilisés à suivre lors du développement d'un nouveau produit, version ou mission afin de s'assurer de sa compatibilité avec la MMFAL identifiée.**

L'enjeu à présent est de les intégrer au fonctionnement local des différentes directions opérationnelles tout en tenant compte de leurs spécificités. Ce sont dès les phases de conception amont que notre méthode DfMMFAL sera utilisée. Comme il s'agit de recommandations techniques basées sur la formalisation pratiques ayant conduites à un assemblage en MMFAL, nos étapes peuvent être adressées dès la phase exploratoire du processus de développement d'un nouvel appareil. En fonction des phases d'avancement, les étapes de traitement seront utilisées différemment. En effet le niveau de détail d'un design se complexifie selon les phases de développement. À l'issue de notre travail d'expérimentations, nous sommes donc en mesure de proposer la Figure 81, qui pourrait représenter le nouveau processus de développement d'un produit, processus cette fois-ci compatible avec notre méthode DfMMFAL. Il s'agit d'un processus que nous pourrions mettre en place chez Airbus pour profiter pleinement de la méthode DfMMFAL. Ainsi le Tableau 30 résume l'utilisation des différentes étapes de la démarche en fonction des phases du développement d'un nouveau produit à assembler en MMFAL.

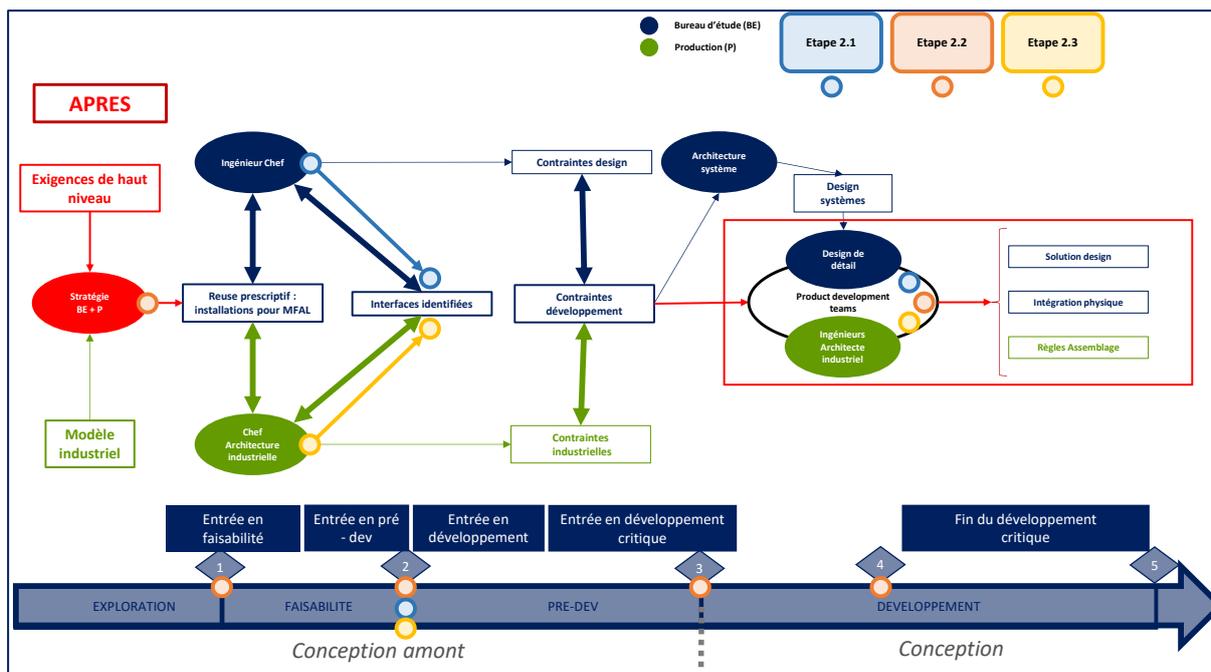


Figure 81 : Proposition du nouveau processus de développement d'un produit, compatible avec la méthode DfMMFAL

Tableau 30 : Résumé de l'utilisation des étapes de la méthode DfMMFAL

Étape	Exploration	Faisabilité	Pré-développement	Développement
Étape 2.1		L'équipe de l'architecture produit adresse les règles de réutilisation	Les règles définissent la réutilisation des différents systèmes	Les règles définissent la réutilisation des différents sous-systèmes
Étape 2.2	Lors de la définition de la stratégie du produit, une première métrique de réutilisation globale du produit déjà assemblé est adressée et oriente les équipes dans la répartition de la réutilisation.		Les métriques sont adressées en fonction des critères aux différentes équipes système et sous-système	Les métriques sont en place pour le suivi régulier de la réutilisation dans le cadre d'un assemblage en MMFAL
Étape 2.3		L'équipe de l'architecture industrielle adresse les solutions d'interfaces nécessaires à l'intégration de composants réutilisés	Les interfaces nécessaires à l'intégration des composants réutilisés sont identifiées	Les interfaces sont implémentées dans le design

## Limites

La méthode DfMMFAL a été élaborée en n'utilisant que les données de plusieurs hélicoptères. La nature de la thèse CIFRE explique donc pourquoi les étapes de la méthode sont centrées sur le modèle hélicoptériste. Ainsi, la difficulté de faire une analyse par installations fonctionnelles provient surtout de la mise en place et l'utilisation des différentes étapes au sein de l'entreprise et non sur le fonctionnement intrinsèque de la méthode développée. En effet, faire le lien entre les résultats de l'étape 2.0 (**AR**) et les installations fonctionnelles représentait une tâche supplémentaire qui nous a empêché d'appliquer la méthode sur plus de cas.

Aussi, dans certaines industries, le contenu de deux installations fonctionnelles équivalentes entre les appareils et de deux clients différents peut varier en fonction du choix des variantes désirées pour leurs produits. Cela ajoute une complexité supplémentaire pour construire un jeu de données basées sur une telle analyse.

L'expérimentation de la méthode DfMMFAL au sein d'Airbus Helicopters a permis de mettre en place des règles et recommandations techniques pour aider les équipes de développement à concevoir un appareil compatible avec une MMFAL. Cependant, comme mentionné dans le Chapitre 3 certaines limites ont pu être identifiées.

Dans un premier temps, les deux couples d'hélicoptères utilisés pour nos expérimentations ont été conçus et assemblés dans les bureaux d'études et les MMFAL du site de Marignane (13) d'Airbus Helicopters. D'autres appareils sont conçus et assemblés dans des sites différents comme Donauwörth (Allemagne) et Albacete (Espagne). L'organisation de conception et de production de ces sites sont différentes de celles de Marignane. Pour avoir d'autres résultats il aurait été intéressant de porter nos expérimentations sur des appareils provenant de ces sites. De plus, les H215 et H225 choisis pour le couple d'hélicoptères lourds sont des appareils configurés pour la même mission, le SAR alors qu'Airbus Helicopters produit des appareils capables de remplir plusieurs missions différentes impliquant une plus grande diversité de composants entre les appareils. Expérimenter notre méthode avec des hélicoptères de EMS, O&G ou VIP aurait pu nous apporter des règles supplémentaires ou différentes.

Chez Airbus Helicopters, de nombreux employés sont responsables de la conception et l'industrialisation de nouveaux produits. Ainsi, en ce qui concerne **l'étape 1 de notre méthode DfMMFAL**, il est probable qu'en ayant interrogé plus de participants, nous aurions pu trouver de nouvelles contraintes ou règles supplémentaires autour d'un assemblage en MMFAL.

Lors du développement de notre méthode DfMMFAL, nous avons prévu d'analyser les installations fonctionnelles pour modéliser nos règles et recommandations techniques. Cependant, la gestion de configuration des appareils chez Airbus ne nous permettait pas d'analyser la réutilisation de

composants au sein des installations fonctionnelles. Dès lors, lors de **l'expérimentation de l'étape 2.1**, nous avons opté pour les références commerciales pour tester notre démarche.

**Cette limite a également touché l'étape 2.2** de notre méthode. En effet, pendant le développement de sa démarche, il était prévu de chercher la répartition de la réutilisation portée aux installations fonctionnelles des appareils. Cette métrique n'a pu être modélisée à la suite de notre expérimentation. À l'issue de notre expérimentation, nous ne sommes donc pas en mesure de vérifier si cette démarche permet de modéliser une métrique sur la répartition des composants réutilisés au sein des différents systèmes fonctionnels. Aussi, nous avons cherché à répartir la réutilisation en fonction de certains critères. L'objectif était de mettre en avant un éventuel schéma d'orientation de la réutilisation en fonction de ces critères. À la suite de l'expérimentation de la démarche, un schéma s'observait. Comme nous avons testé notre démarche uniquement sur deux couples d'hélicoptères, les H125/130 et H215/H225, nous ne sommes pas en mesure d'avancer les aspects nécessaires ou suffisants du schéma. En fait, suivre ce schéma de répartition ne nous assure pas qu'un produit est assemblable en MMFAL.

**Aussi, une limitation de l'étape 2.3** est que les APP des hélicoptères analysés n'intègrent pas tous les composants des produits. En effet, si un fournisseur livre une base complète de fuselage d'un appareil, certaines interfaces d'assemblage ne sont pas incluses dans l'APP. Cela entraîne une perte d'interfaces d'assemblage potentielles identifiables. De plus, l'algorithme à base de règles a été développé pour identifier uniquement les interfaces contenues dans la même opération d'assemblage que les composants réutilisés. Il suffit qu'une interface soit contenue dans une autre opération pour que l'algorithme ne la détecte pas.

Compte tenu du contexte industriel spécifique au secteur hélicoptériste, il est possible que ces limites y soient liées. Il est donc nécessaire de tester la méthode DfMMFAL dans d'autres contextes industriels et d'autres secteurs d'activités pour vérifier si ces mêmes limites apparaissent. Plus d'expérimentations sont donc nécessaires dans différents contextes industriels pour pouvoir généraliser la méthode.





# Conclusion générale

## Conclusion générale

Réduire la variabilité et augmenter la flexibilité dans un système de production est au cœur des enjeux dans une industrie avec un marché concurrentiel qui évolue rapidement. Concevoir un produit compatible avec une MMFAL constitue une réponse à ces défis. Dans le passé, des produits ont déjà été assemblés sur des MMFAL mais aucune connaissance n'ont été remontées pour formaliser des recommandations de conception en vue d'un tel assemblage. Par ailleurs, les méthodologies et outils existants dédiés aux recommandations adoptent une approche centrée sur la CAO. Cette approche ne permet pas de traiter les cas existants dans la mesure où dans certaines industries, les produits ont été conçus avant la généralisation de tels outils informatiques. De plus, elle suppose une application des règles centrées sur le processus de conception plutôt qu'étendu au système de production.

C'est pourquoi, afin d'optimiser les interfaces entre les processus de conception amont et les systèmes de production, nous proposons une **méthodologie basée sur la formalisation des connaissances et des pratiques**. Ce manuscrit présente la construction et l'expérimentation de notre méthodologie. Il s'articule en quatre chapitres.

Dans l'**introduction**, nous présentons le contexte de notre étude. Nous constatons notamment la difficulté de produire rapidement et de manière flexible dans l'industrie manufacturière. Nous en déduisons la question de recherche à laquelle répondent nos travaux de recherche : **Comment aider les équipes de conception à concevoir un produit compatible avec une MMFAL ?**

Afin de formuler les hypothèses, nous identifions l'objet et les axes de notre recherche, présentés dans le **Chapitre 1**.

Nous explorons également le contexte industriel d'Airbus Helicopters, structure d'accueil de nos travaux de recherche et dans laquelle nous expérimentons les différentes démarches de notre méthode DfMMFAL. Puis nous analysons l'état de l'art autour de quatre axes, les systèmes de production pour découvrir les systèmes les plus adaptés aux problématiques de flexibilité. Nous parcourons la littérature autour des processus de conception amont pour découvrir les méthodes les plus adaptées pour concevoir un produit pour produire de manière plus flexible également. Les interfaces d'assemblage sont essentielles à l'intégration d'ensembles, sous-ensembles et composants dans un produit en FAL, nous tentons de déterminer s'il existe des approches permettant de les identifier d'un produit à un autre. Enfin, les meilleures pratiques de mises en place de règles de conception sont étudiées.

Dans le **Chapitre 2**, nous proposons une méthode DfMMFAL pour combler un manque identifié dans la littérature. En effet il n'existe pas à notre connaissance de pratiques de conception en vue d'un assemblage en MMFAL. Nous cherchons donc à formaliser des règles et recommandations à partir des connaissances et de développements passés, assemblés en MMFAL mais sans formalisation des activités de conception qui y conduit.

La méthode de DfMMFAL est ensuite expérimentée dans le **Chapitre 3** grâce aux cas d'étude proposé par la structure d'accueil de nos travaux de recherche, Airbus Helicopters. Nous formalisons les connaissances quant au développement d'un nouveau produit et ses contraintes. Le couple d'hélicoptères légers H125/H130 et le couple lourd H215/H225 nous permettent d'établir nos premières règles de réutilisation, métriques de suivi et identification d'interfaces d'assemblage. Les expérimentations permettent aussi d'ajuster la méthode DfMMFAL dans un contexte opérationnel.

Nos travaux de thèses proposent donc une méthode de DfMMFAL afin d'aider les équipes de développement à concevoir un produit compatible avec une MMFAL. Les étapes de traitement de cette méthode ont été expérimentés grâce aux cas d'études proposés par la structure d'accueil de cette thèse. Après ces tests, ces étapes ont été en mesure de nous fournir des règles et recommandations de conception en vue d'un assemblage en MMFAL.

## Perspectives

Ce travail de thèse est l'aboutissement de trois années de travail. **Il propose une méthode de DfMMFAL pour aider les équipes de développement à concevoir un produit compatible avec une MMFAL.** Cette étude nous permet d'envisager plusieurs perspectives **à court, moyen et long terme.**

### Perspectives à court terme

Au court terme il convient de tester la méthode et ses démarches sur l'ensemble de la gamme des hélicoptères d'Airbus. En plus d'élargir la gamme à tester sur la méthode, nous préconisons de tester un plus grand nombre de couples. Une plus large quantité de données et plus diversifiées permet de modéliser de nouvelles règles génériques lors de l'étape 2.1. Nos règles seront considérées comme génériques si elles se révèlent être appliquées en analysant les références commerciales contenues dans un plus grand nombre d'appareils. Dans cette étape, nous n'avons analysé que 23 références commerciales sur les 51 disponibles, il est alors possible, dans un premier temps d'analyser les références commerciales restantes pour confirmer, ou non la généralité des règles préalablement modélisées. Dans un second temps, nous pourrions analyser les autres couples d'appareils ainsi que ceux de gammes différentes. Tester les limites de notre méthode et sa capacité à modéliser des

recommandations techniques en la testant auprès d'appareils de gamme opposé fait également parti de nos perspectives à court terme.

Une autre préconisation consisterait à trouver comment lancer les étapes 2.1 et 2.2 avec les données provenant des installations fonctionnelles. Cela permettrait de porter les règles de réutilisation de l'étape 2.1, les métriques de suivi de réutilisation de l'étape 2.2 à ce niveau de découpage.

Tester la méthode DfMMFAL sur l'ensemble de la gamme d'hélicoptères nous permet d'augmenter le nombre de couples différents et donc d'apporter une diversité. Ainsi nous pourrions tester la condition nécessaire de l'orientation du découpage de la réutilisation de l'étape 2.2. Nous pourrions alors être en mesure d'affirmer le coté nécessaire si le même schéma est observé. En effet nous serions en mesure d'expliquer que si un produit n'est pas compatible avec une MMFAL c'est parce que les métriques associées en correspondent pas au schéma de répartition modélisé par la démarche de l'étape 2.2 de la méthode DfMMFAL.

#### *Catégorisation des interfaces d'assemblage*

Pour formaliser les résultats de l'étape 2.3, il est envisageable de mettre en place un classement des interfaces d'assemblage identifiée selon 3 niveaux de criticité (CR).

##### *CR1*

Le niveau de criticité 1 de l'interface est le niveau le plus impactant sur le travail en MMFAL qui consiste à assembler un composant identique sur deux appareils différents. Il est associé aux composants influençant l'architecture générale au niveau de l'appareil ou aux ensembles, sous-ensembles influençant l'architecture générale. Il est aussi désigné pour les interfaces de systèmes qui impactent le chemin critique du cycle de développement de l'appareil.

##### *CR2*

Le second niveau de criticité pour les interfaces d'assemblage est lié aux composants qui peuvent influencer l'architecture générale au niveau du système ou impliquant des systèmes qui impactent le chemin critique du développement des autres systèmes de l'appareil. Les interfaces d'assemblage CR2 exercent une influence significative sur l'intégration des systèmes et/ou sur l'architecture de ces systèmes. D'un point de vue industriel, le niveau CR2 exerce également une influence significative sur le modèle industriel au sein d'un MCA (par exemple un assemblage d'un composant et d'une nouvelle technologie).

##### *CR3*

Le dernier niveau de criticité de l'interface d'assemblage représente toutes les interfaces non couvertes par les niveaux CR1 et CR2. Ce niveau n'influence que légèrement l'assemblage des composants en MMFAL.

Cette formalisation permettrait d'adresser une recommandation technique autour de la quantité d'interfaces d'assemblage à assurer par niveau de criticité pour s'assurer que les deux produits soient compatibles avec une MMFAL.

Aussi, il est possible de caractériser les interfaces en différentes familles. Un tel regroupement permettrait de mettre en place une bibliothèque illustrée et générique des interfaces d'assemblage responsables de l'intégration des composants réutilisés dans l'entreprise. Cette bibliothèque représenterait un support à destination des équipes de développement lorsque celles-ci projettent de réutiliser un composant.

#### Perspectives à moyen terme

À moyen terme, l'industrialisation de la méthode de DfMMFAL est discutée. Cette industrialisation entre dans le cadre de la continuité digitale proposée par Airbus Group. Durant nos travaux de thèse, nous avons commencé à travailler avec une équipe dans le cadre du projet DDMS pour développer un programme Python. Le projet ayant suscité de l'intérêt chez Airbus Group, le programme fut développé comme cas pilote autour de la démarche de l'étape 2.2 et plus précisément sur la répartition du *reuse* de composants en fonction du critère de la zone de montage. Il convient, par la suite d'étendre le programme à tout le périmètre de cette démarche, ainsi qu'aux autres démarches de la formalisation des pratiques. Ainsi, un outil commun, mettant en pratique la méthode DfMMFAL sera à disposition de l'ensemble des équipes de développement lors de la conception d'un nouvel appareil. Nous préconisons que l'outil soit développé reprenne comme recommandations techniques une décomposition générique d'un hélicoptère. Cette décomposition générique peut se trouver sous la forme d'un graphe d'ontologie. Cela permet aux équipes du BE et BI d'avoir une vision commune lors de la conception d'un hélicoptère à assembler en MMFAL.

Dès lors que cet outil sera développé, il convient d'étendre son utilisation à un contexte industriel différent et provenant d'un autre secteur d'activité. L'objectif est de vérifier si les recommandations techniques modélisées au cours de nos expérimentations et portée à l'ensemble de la gamme sont également applicables.

#### Perspectives à long terme

Après plusieurs itérations de notre méthode chez Airbus Helicopters et dans d'autres secteurs d'activités, il convient désormais de travailler à développer une version générique de la décomposition d'un produit en vue d'un assemblage en MMFAL. Alors, nous préconisons de mettre à disposition une telle décomposition, en s'appuyant sur un graphe d'ontologie avec toutes les règles génériques, métriques de suivi, catégorisation des interfaces d'assemblage et processus de développement d'un produit.

Notre objectif à long terme consiste à mettre en pratique les résultats de notre thèse en utilisant notre méthode de décomposition générique pour développer deux nouveaux hélicoptères chez Airbus qui seront assemblés en MMFAL. Cela implique l'utilisation de règles génériques de réutilisation, de métriques de suivi et de résultats d'identification des interfaces tout au long des phases de développement des produits. Cette étape est cruciale car elle permet de répondre à la condition de suffisance de notre méthode DfMMFAL. Si nous réussissons à développer les deux hélicoptères en utilisant notre méthode, leur entrée en service et leur production dans l'usine d'Airbus constitueront un résultat significatif de notre recherche qui a débuté fin 2019. En outre, le modèle générique que nous avons développé sera mis à l'épreuve en l'appliquant à un secteur d'activité différent, tel que l'industrie spatiale, l'horlogerie ou toute autre industrie qui souhaite formaliser des recommandations techniques pour concevoir des produits compatibles avec une MMFAL.

L'assemblage en MMFAL de deux produits conçus à l'aide de notre méthode DfMMFAL marque la généralité de notre modèle. Nous sommes convaincus que notre approche offre une solution pratique et efficace pour aider les entreprises à concevoir des produits compatibles avec une MMFAL et à améliorer leur processus de développement de produits.

Notre principal objectif dans cette perspective est de trouver comment prouver la nécessité de notre méthode DfMMFAL, suivie par la recherche de preuves de suffisance. Pour démontrer la généralité de notre modèle, il est essentiel de le tester dans des secteurs d'activités diversifiés, où des entreprises souhaitent concevoir différents types de produits compatibles avec une MMFAL. Nous sommes conscients que notre méthode doit être testée dans divers contextes et secteurs d'activités pour évaluer sa pertinence et sa portée. Nous devons adapter notre approche à chaque situation spécifique pour garantir sa pertinence et son applicabilité à des cas différents. Cela nous permettra de démontrer la robustesse et la flexibilité de notre modèle, ainsi que sa capacité à fournir des solutions pratiques et efficaces pour concevoir des produits compatibles avec une MMFAL. En outre, en testant notre méthode dans des contextes divers, nous pourrions recueillir des données pour améliorer notre modèle et le rendre plus performant. Cette approche nous permettra de mieux comprendre les besoins des entreprises dans différents secteurs et de proposer des solutions adaptées pour améliorer leurs processus de développement de produits.

Finalement, notre objectif principal est de prouver la nécessité et la suffisance de notre méthode DfMMFAL, ainsi que sa généralité en la testant dans des secteurs d'activités différents. Cette approche nous permettra de démontrer la robustesse et la flexibilité de notre modèle, ainsi que sa capacité à fournir des solutions pratiques et efficaces pour concevoir des produits compatibles avec une MMFAL.





## Publications et communications

### Publications

#### **Confere**

Boyault E, Jean C, Bernier V, Aoussat A (2020) Développer un design modulaire compatible avec une ligne d'assemblage multi-modèle pour l'industrie aéronautique hélicoptériste. *Confere'20*.

#### **Journal of Engineering Design and Technology**

Boyault E, Jean C, Bernier V, Aoussat A (2023) DfMMFAL: A new Tool for Assembly Interface Identification based on Assembly Process Planning. *Journal of Engineering Design and Technology*. (Revision mineure, review en cours)

### Livrables industriels

#### **Airbus Helicopters**

Boyault E, Bernier V, Jean C, Aoussat A (2021) Méthodologie de thèse. Poster. *E-J2A*

#### **Airbus Helicopters**

Boyault E, Bernier, V (2021) Rapport des entretiens semi-directifs. Document de synthèse.

#### **Airbus Helicopters**

Boyault E, Bernier, V (2023) Règles et recommandations pour le développement et l'assemblage en MMFAL - Document issus d'application de la méthode DfMMFAL. Document interne Airbus Helicopters.

#### **Airbus Helicopters**

Boyault E, Bernier, V (2023) ICARRE - Interfaces d'assemblage de réutilisation. Document interne Airbus Helicopters.

## Bibliographie

- Ahmed, S. (2005). Encouraging reuse of design knowledge: A method to index knowledge. *Design Studies*, 26(6), 565–592. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2005.02.005>
- Airbus. (2014). *Final Assembly and Testing*. <http://www.airbus.com/company/aircraft-manufacture/how-is-an-aircraftbuilt/final-assembly-and-tests/>
- Asadi, N., Jackson, M., Augustsson, P., & Fundin, A. (2017). An assembly-oriented product design methodology to develop similar assembly operations in a mixed-product assembly line. *DS 87-5 Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED 17) Vol 5: Design for X, Design to X, Vancouver, Canada, 21-25.08.2017*, 131–140.
- Asadi, N., Jackson, M., & Fundin, A. (2019). Implications of realizing mix flexibility in assembly systems for product modularity—A case study. *Journal of Manufacturing Systems*, 52, 13–22. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.04.010>
- Bahubalendruni, M. V. A. R., Biswal, B. B., Kumar, M., & Nayak, R. (2015). Influence of Assembly Predicate Consideration on Optimal Assembly Sequence Generation. *Assembl. Autom.*, 35(4), 309–316. <https://doi.org/10.1108/AA-03-2015-022>
- Baldwin, C. Y., & Clark, K. B. (2000). *Design Rules, Volume 1: The Power of Modularity* [MIT Press Books]. The MIT Press. <https://econpapers.repec.org/bookchap/mtptitles/0262024667.htm>
- Barbosa, G. F., Carvalho, J., & Filho, E. V. G. (2014). A proper framework for design of aircraft production system based on lean manufacturing principles focusing to automated processes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 72(9), 1257–1273. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-5729-3>
- Barbosa, L. M., Lacerda, D. P., Piran, F. A. S., & Dresch, A. (2017). Exploratory analysis of the variables prevailing on the effects of product modularization on production volume and efficiency. *International Journal of Production Economics*, 193, 677–690. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.08.028>
- Baudin, M. (2002). *Lean Assembly: The Nuts and Bolts of Making Assembly Operations Flow* (1st ed.). Productivity Press. <https://doi.org/10.4324/9780367805142>
- Baudin, M. (2004). *Lean Logistics | The Nuts and Bolts of Delivering Materials and Goods*. Productivity Press. <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.4324/9780429299995/lean-logistics-michel-baudin>
- Baxter, D., Gao, J. X., Case, K., Harding, J., Young, B., Cochrane, S. D., & Dani, S. S. (2007). *An engineering design knowledge reuse methodology using process modelling*. <https://doi.org/10.1007/S00163-007-0028-8>
- Bayoumi, A. M. E. (2000). DESIGN FOR MANUFACTURE AND ASSEMBLY (DFMA): CONCEPTS, BENEFITS AND APPLICATIONS. In M. F. Hassan & S. M. Megahed (Eds.), *Current Advances in Mechanical Design and Production VII* (pp. 501–509). Pergamon. <https://doi.org/10.1016/B978-008043711-8/50051-9>
- Belkadi, F., Buerger, J., Gupta, R. K., Zhang, Y., Bernard, A., Lanza, G., Colledani, M., & Urgo, M. (2016). Co-Definition of Product Structure and Production Network for Frugal Innovation Perspectives: Towards a Modular-based Approach. *Procedia CIRP*, 50, 589–594. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.160>
- Blösch-Paidosh, A., & Shea, K. (2017). Design heuristics for additive manufacturing. *DS 87-5 Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED 17) Vol 5: Design for X, Design to X, Vancouver, Canada, 21-25.08.2017*, 091–100.
- Bodein, Y., Rose, B., & Caillaud, E. (2009). Improving CAD Performance: A Decisional Model for Knowledgeware Implementation. *DS 58-8: Proceedings of ICED 09, the 17th International Conference on Engineering Design, Vol. 8, Design Information and Knowledge, Palo Alto, CA, USA, 24.-27.08.2009*, 311–322.
- Bonino, B., Giannini, F., Monti, M., & Raffaelli, R. (2023). Shape and Context-Based Recognition of Standard Mechanical Parts in CAD Models. *Computer-Aided Design*, 155, 103438. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2022.103438>

- Bonvoisin, J., Halstenberg, F., Buchert, T., & Stark, R. (2016). A systematic literature review on modular product design. *Journal of Engineering Design*, 27(7), 488–514. <https://doi.org/10.1080/09544828.2016.1166482>
- Boothroyd, G., Dewhurst, P., & Knight, W. A. (2010). *Product Design for Manufacture and Assembly* (3rd ed.). CRC Press. <https://www.routledge.com/Product-Design-for-Manufacture-and-Assembly/Boothroyd-Dewhurst-Knight/p/book/9781420089271>
- Bouissiere, F., Cuiller, C., Dereux, P.-E., Malchair, C., Favi, C., & Formentini, G. (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. <https://doi.org/10.1017/dsi.2019.303>
- Boysen, N., Fliedner, M., & Scholl, A. (2007). A classification of assembly line balancing problems. *European Journal of Operational Research*, 183(2), 674–693. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.10.010>
- Bracewell, R., Gourtovaia, M., Moss, M., Knott, D., Wallace, K., & Clarkson, P. (2009). DRED 2.0: A method and tool for capture and communication of design knowledge deliberated in the creation of technical products. In *DS 58-6: Proceedings of ICED 09, the 17th International Conference on Engineering Design* (Vol. 6, p. 234).
- Bracewell, R. H., & Wallace, K. M. (2003). A TOOL FOR CAPTURING DESIGN RATIONALE. *DS 31: Proceedings of ICED 03, the 14th International Conference on Engineering Design, Stockholm*, 185-186 (exec.summ.), full paper no. DS31\_1437FPB.
- Brière-Côté, A., Rivest, L., & Desrochers, A. (2010). Adaptive generic product structure modelling for design reuse in engineer-to-order products. *Computers in Industry*, 61(1), 53–65. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2009.07.005>
- Bruun, H. P. L. (2015). *PLM support to architecture-based development: Contribution to computer-supported architecture modelling*. DTU Mechanical Engineering.
- Bruun, H. P. L., & Mortensen, N. H. (2012). Visual Product Architecture Modelling for Structuring Data in a PLM System. In L. Rivest, A. Bouras, & B. Louhichi (Eds.), *Product Lifecycle Management. Towards Knowledge-Rich Enterprises* (pp. 598–611). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-35758-9\\_54](https://doi.org/10.1007/978-3-642-35758-9_54)
- Buergin, J., Belkadi, F., Hupays, C., Gupta, R. K., Bitte, F., Lanza, G., & Bernard, A. (2018). A modular-based approach for Just-In-Time Specification of customer orders in the aircraft manufacturing industry. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 21, 61–74. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2018.01.003>
- Busby, J. S. (1999). The Problem with Design Reuse: An Investigation into Outcomes and Antecedents. *Journal of Engineering Design*, 10(3), 277–296. <https://doi.org/10.1080/095448299261335>
- Calkins, D. E., & Scholz, C. (2000). Knowledge-Based Engineering (KBE) Design Methodology at the Undergraduate and Graduate Levels\*. *International Journal of Engineering Education*, 16, 21–38.
- Cassier, A., Dubreuil, J. P., Fouques, B., Garcia, A., Hancart, M., Kuentzmann, P., Theron, G., Barthelemy, J. P., & Claveau, C. (2018). *Le transport de passagers par appareils à voilure tournante à l'horizon 2050* (Académie de l'Air et de l'Espace). AAE.
- Chen, M.-S., & Lan, C.-H. (2001). The maximal profit flow model in designing multiple-production-line system with obtainable resource capacity. *International Journal of Production Economics*, 70(2), 175–184.
- Chiu, M.-C., Lin, C.-Y., & Kremer, G. (2023). *An Investigation of the Applicability of DfX Tools during Design Concept Evolution*.
- Conklin, J., Selvin, A., Buckingham Shum, S., & Sierhuis, M. (2001). Facilitated hypertext for collective sensemaking: 15 years on from gIBIS. *Proceedings of the 12th ACM Conference on Hypertext and Hypermedia*, 123–124. <https://doi.org/10.1145/504216.504246>
- Debord, S., Segonds, F., Pinquié, R., Véron, P., & Croué, N. (2018, August 30). *Proposition of a design rules framework*.
- Demoly, F., Yan, X.-T., Eynard, B., Gomes, S., & Kiritsis, D. (2012). Integrated product relationships management: A model to enable concurrent product design and assembly sequence planning.

- Journal of Engineering Design*, 23(7), 544–561.  
<https://doi.org/10.1080/09544828.2011.629317>
- Dolgui, A., & Kovalev, S. (2012). Scenario based robust line balancing: Computational complexity. *Discrete Applied Mathematics*, 160(13), 1955–1963.  
<https://doi.org/10.1016/j.dam.2012.04.011>
- Du, X., Tseng, M. M., & Jiao, J. (2003). Product Families for Mass Customization. In M. M. Tseng & F. T. Piller (Eds.), *The Customer Centric Enterprise: Advances in Mass Customization and Personalization* (pp. 123–161). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-55460-5\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-642-55460-5_8)
- Duffy, A., & Ferns, A. (1998). *An analysis of design reuse benefits. Proceedings of the 12th International Conference on Engineering Design*, 799–804.
- ElMaraghy, H., & Abbas, M. (2015). Products-manufacturing systems Co-platforming. *CIRP Annals*, 64(1), 407–410. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2015.04.110>
- ElMaraghy, H., Schuh, G., ElMaraghy, W., Piller, F., Schönsleben, P., Tseng, M., & Bernard, A. (2013). Product variety management. *CIRP Annals*, 62(2), 629–652.  
<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2013.05.007>
- El-Nounu, A., Popov, A., & Ratchev, S. (2018). Redesign methodology for mechanical assembly. *Research in Engineering Design*, 29(1), 107–122. <https://doi.org/10.1007/s00163-017-0255-6>
- Emmatty, F. J., & Sarmah, S. P. (2012). Modular product development through platform-based design and DFMA. *Journal of Engineering Design*, 23(9), 696–714.  
<https://doi.org/10.1080/09544828.2011.653330>
- Erens, F., & Verhulst, K. (1997). Architectures for product families. *Computers in Industry*, 33(2), 165–178. [https://doi.org/10.1016/S0166-3615\(97\)00022-5](https://doi.org/10.1016/S0166-3615(97)00022-5)
- Erixon, G. (1998). *Modular Function Deployment: A Method for Product Modularisation*. The Royal Inst. of Technology, Dept. of Manufacturing Systems, Assembly Systems Division.
- Fan, W., Zheng, L., Ji, W., Xu, X., Wang, L., Lu, Y., & Zhao, X. (2020). Function block-based closed-loop adaptive machining for assembly interfaces of large-scale aircraft components. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 66, 101994.  
<https://doi.org/10.1016/j.rcim.2020.101994>
- Favi, C., & Germani, M. (2012). A method to optimize assemblability of industrial product in early design phase: From product architecture to assembly sequence. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 6(3), 155–169.  
<https://doi.org/10.1007/s12008-012-0147-y>
- Favi, C., Mandolini, M., Campi, F., & Germani, M. (2021). A CAD-based design for manufacturing method for casted components. *Procedia CIRP*, 100, 235–240.  
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.05.061>
- Fischer, X., & Nadeau, J.-P. (2011). *Research in Interactive Design Vol. 3*. Springer.  
<https://doi.org/10.1007/978-2-8178-0169-8>
- Fixson, S. (2007). Modularity and Commonality Research: Past Developments and Future Opportunities. *Concurrent Engineering Research and Applications*, 15, 85–111.  
<https://doi.org/10.1177/1063293X07078935>
- Formentini, G., Bouissiere, F., Cuiller, C., Dereux, P.-E., & Favi, C. (2022). Conceptual Design for Assembly methodology formalization: Systems installation analysis and manufacturing information integration in the design and development of aircraft architectures. *Journal of Industrial Information Integration*, 26, 100327. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2022.100327>
- Foucalt, G., & Leon, J.-C. (2010). Enriching Assembly CAD Models With Functional and Mechanical Informations to Ease CAE. *IDETC-CIE2010*, 341–351.  
<https://doi.org/10.1115/DETC2010-28805>
- Gatenby, D. A., & Foo, G. (1990). Design for X (DFX): Key to competitive, profitable products. *AT&T Technical Journal*, 69(3), 2–13. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1990.tb00332.x>
- Grabot, B. (2009). *Ordonnancement d'ateliers manufacturiers: Vol. Doc AG3*. <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/genie-industriel-th6/methodes-de-production-42521210/ordonnancement-d-ateliers-manufacturiers-ag3015/methodes-de-resolution-ag3015niv10003.html>
- Grandvallet, C., Pourroy, F., Prudhomme, G., & Vignat, F. (2017). From elicitation to structuring of additive manufacturing knowledge. *DS 87-6 Proceedings of the 21st International Conference*

- on *Engineering Design (ICED 17) Vol 6: Design Information and Knowledge, Vancouver, Canada, 21-25.08.2017*, 141–150.
- Grigoriev, S. N., Kutin, A. A., & Turkin, M. V. (2013). Modelling Complex Production Processes in Aerospace Industry based on Dimensional Analysis. *Procedia CIRP*, 7, 473–478. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.06.018>
- Hansen, C. T., & Andreasen, M. M. (2004). *A Mapping of Design Decision-Making*. 3, 1409–1418.
- Harlou, U. (2006). *Developing product families based on architectures, Contribution to a theory of product families*. Technical University of Denmark.
- Hu, K.-M., Wang, B., Yong, J.-H., & Paul, J.-C. (2013). Relaxed lightweight assembly retrieval using vector space model. *Computer-Aided Design*, 45(3), 739–750. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2012.10.005>
- Hu, S. J., Zhu, X., Wang, H., & Koren, Y. (2008). Product variety and manufacturing complexity in assembly systems and supply chains. *CIRP Annals*, 57(1), 45–48. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.03.138>
- Huang, G. Q., Lee, S. W., & Mak, K. L. (1999). Web-based product and process data modelling in concurrent “design for X”. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 15(1), 53–63. [https://doi.org/10.1016/S0736-5845\(98\)00028-3](https://doi.org/10.1016/S0736-5845(98)00028-3)
- Hubka, V., & Eder, W. E. (1988). *Theory of Technical Systems: A Total Concept Theory for Engineering Design*. Springer.
- Hummell, J., & Hause, M. (2015). Model-based Product Line Engineering—Enabling product families with variants. *2015 IEEE Aerospace Conference*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/AERO.2015.7119108>
- (INCOSE 2011b) INCOSE (2011b). (2008). *Survey of Model-Based Systems Engineering (MBSE) Methodologies: Vol. INCOSE-TD-2007-003-01*.
- (INCOSE 2011c) INCOSE (2011c), & System Engineering (SE) Handbook Working Group. (2003). *A Guide For System Life Cycle Processes And Activities: Vol. Version 3.2.1* (INCOSE TP 2003 002 03.2).
- Jack, H. (2013). Chapter 9—Universal Design Topics. In H. Jack (Ed.), *Engineering Design, Planning, and Management* (pp. 323–380). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-397158-6.00009-7>
- Jayanti, S., Kalyanaraman, Y., & Ramani, K. (2009). Shape-based clustering for 3D CAD objects: A comparative study of effectiveness. *Computer-Aided Design*, 41(12), 999–1007. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2009.07.003>
- Jelokhani-Niaraki, M. (2018). Knowledge sharing in Web-based collaborative multicriteria spatial decision analysis: An ontology-based multi-agent approach. *Computers, Environment and Urban Systems*, 72, 104–123. <https://doi.org/10.1016/j.compenurbsys.2018.05.012>
- Juuti, T. (2008). *Design Management of Products with Variability and Commonality—Contribution to the Design Science by elaborating the fit needed between Product Structure, Design Process, Design Goals, and Design Organisation for Improved R&D Efficiency*. Tampere University of Technology. <https://researchportal.tuni.fi/en/publications/design-management-of-products-with-variability-and-commonality-co>
- Karhu, K., Gustafsson, R., & Lyytinen, K. (2018). Exploiting and Defending Open Digital Platforms with Boundary Resources: Android’s Five Platform Forks. *Information Systems Research*, 29(2), 479–497. <https://doi.org/10.1287/isre.2018.0786>
- Kent, R. (2016). Chapter 8—Design quality management. In R. Kent (Ed.), *Quality Management in Plastics Processing* (pp. 227–262). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102082-1.50008-3>
- Klein, P., Luetzenberger, J., & Thoben, K.-D. (2015). A PROPOSAL FOR KNOWLEDGE FORMALIZATION IN PRODUCT DEVELOPMENT PROCESSES. *DS 80-10 Proceedings of the 20th International Conference on Engineering Design (ICED 15) Vol 10: Design Information and Knowledge Management Milan, Italy, 27-30.07.15*, 261–272.
- Kumar, G. A., Bahubalendruni, M. V. A. R., Vara Prasad, V. S. S., Ashok, D., & Sankaranarayanan, K. (2022). A novel Geometric feasibility method to perform assembly sequence planning through oblique orientations. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 26, 100994. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2021.04.013>

- Lehmann-Ortega, L., Leroy, L. F., Garrette, B., Dussauge, P., & Durand, R. (2013). *Strategor, toute la stratégie d'entreprise*. 6. [https://www.academia.edu/35031030/L\\_Lehmann\\_Ortega\\_F\\_Leroy\\_B\\_Garrette\\_P\\_Dussauge\\_R\\_Durand\\_eds\\_Strategor\\_Toute\\_la\\_strategie\\_dentreprise](https://www.academia.edu/35031030/L_Lehmann_Ortega_F_Leroy_B_Garrette_P_Dussauge_R_Durand_eds_Strategor_Toute_la_strategie_dentreprise)
- Li, L., Soskin, N. L., Jbara, A., Karpel, M., & Dori, D. (2019). Model-Based Systems Engineering for Aircraft Design With Dynamic Landing Constraints Using Object-Process Methodology. *IEEE Access*, 7, 61494–61511. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2915917>
- Li, T., & Lockett, H. (2017). An Investigation into the Interrelationship between Aircraft Systems and Final Assembly Process Design. *Procedia CIRP*, 60, 62–67. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.01.056>
- Li, Y., Liu, D., & Kucukkoc, I. (2022). Mixed-model assembly line balancing problem considering learning effect and uncertain demand. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 114823. <https://doi.org/10.1016/j.cam.2022.114823>
- Lima, M. B., & Kubota, F. I. (2022). A modular product design framework for the home appliance industry. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 120(3), 2311–2330. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-08896-9>
- Lin, Y.-K., & Chang, P.-C. (2013). Reliability-based performance indicator for a manufacturing network with multiple production lines in parallel. *Journal of Manufacturing Systems*, 32(1), 147–153. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2012.11.006>
- Liu, Z.-B., Bu, S.-H., Zhou, K., Gao, S.-M., Han, J.-W., & Wu, J. (2013). A Survey on Partial Retrieval of 3D Shapes. *Journal of Computer Science and Technology*, 28(5), 836–851. <https://doi.org/10.1007/s11390-013-1382-9>
- Lopez, P., & Roubelat, F. (2001). *Ordonnancement de la production—Broché—Pierre Lopez, François Roubelat—Achat Livre | fnac*. <https://livre.fnac.com/a1155389/Pierre-Lopez-Ordonnancement-de-la-production>
- Lupinetti, K., Pernot, J.-P., Monti, M., & Giannini, F. (2019). Content-based CAD assembly model retrieval: Survey and future challenges. *Computer-Aided Design*, 113, 62–81. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2019.03.005>
- Marian, R. M. (2003). *Optimisation of assembly sequences using genetic algorithms* [PhD Dissertation].
- Mas, F., Ríos, J., Menéndez, J. L., & Gómez, A. (2013). A process-oriented approach to modeling the conceptual design of aircraft assembly lines. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67(1), 771–784. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4521-5>
- Menéndez, J. L., Mas, F., Serván, J., & Ríos, J. (2012). Virtual verification of the AIRBUS A400M final assembly line industrialization. *AIP Conference Proceedings*, 1431(1), 641–648. <https://doi.org/10.1063/1.4707619>
- Meng, K., Tang, Q., Cheng, L., & Zhang, Z. (2022). Mixed-model assembly line balancing problem considering preventive maintenance scenarios: MILP model and cooperative co-evolutionary algorithm. *Applied Soft Computing*, 127, 109341. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.109341>
- Miller, T. D., & Elgård, P. (1988). Defining Modules, Modularity and Modularization Evolution of the Concept in a Historical Perspective. *Design for Integration in Manufacturing*. Proceedings of the 13th IPS Research Seminar.
- Moir, L., & Seabridge, A. (2011, August). *Aircraft Systems: Mechanical, Electrical, and Avionics Subsystems Integration, 3rd Edition | Wiley*. Wiley.Com. <https://www.wiley.com/en-us/Aircraft+Systems%3A+Mechanical%2C+Electrical%2C+and+Avionics+Subsystems+Integration%2C+3rd+Edition-p-9781119965206>
- Moon, S. K., Simpson, T. W., & Kumara, S. R. T. (2010). A methodology for knowledge discovery to support product family design. *Annals of Operations Research*, 174(1), 201–218. <https://doi.org/10.1007/s10479-008-0349-7>
- Mourtzis, D., Papathanasiou, P., & Fotia, S. (2016). Lean Rules Identification and Classification for Manufacturing Industry. *26th CIRP Design Conference*, 50, 198–203. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.097>
- Noorul Haq, A., Rengarajan, K., & Jayaprakash, J. (2006). A hybrid genetic algorithm approach to mixed-model assembly line balancing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 28(3), 337–341. <https://doi.org/10.1007/s00170-004-2373-3>

- Ogrodnik, P. (2020). Chapter 8—Design realisation/detailed design. In P. Ogrodnik (Ed.), *Medical Device Design (Second Edition)* (pp. 217–285). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814962-1.00008-9>
- Pahl, G., & Beitz, W. (1996). *Engineering Design: A systematic Approach* (2nd Edition, Vol. 21). Springer Verlag. <https://www.cambridge.org/core/journals/mrs-bulletin/article/library/274E0F9F9B502262341767FACE6FF181>
- Pakkanen, J., Huhtala, P., Juuti, T., & Lehtonen, T. (2016). Achieving Benefits with Design Reuse in Manufacturing Industry. *Procedia CIRP*, 50, 8–13. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.173>
- Pakkanen, J., Juuti, T., & Lehtonen, T. (2015). BROWNFIELD PROCESS FOR THE RATIONALISATION OF EXISTING PRODUCT VARIETY TOWARDS A MODULAR PRODUCT FAMILY. *DS 80-7 Proceedings of the 20th International Conference on Engineering Design (ICED 15) Vol 7: Product Modularisation, Product Architecture, Systems Engineering, Product Service Systems, Milan, Italy, 27-30.07.15*, 135–144.
- Pakkanen, J., Juuti, T., & Lehtonen, T. (2019). Identifying and addressing challenges in the engineering design of modular systems – case studies in the manufacturing industry. *Journal of Engineering Design*, 30(1), 32–61. <https://doi.org/10.1080/09544828.2018.1552779>
- Pakkanen, J., Juuti, T., Lehtonen, T., & Mämmelä, J. (2022). Why to design modular products? *Procedia CIRP*, 109, 31–36. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.210>
- Penn, M., & Raviv, T. (2009). An algorithm for the maximum revenue jobshop problem. *European Journal of Operational Research*, 193(2), 437–450. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.11.039>
- Pokojski, J., Oleksiński, K., & Pruszyński, J. (2019). Knowledge based processes in the context of conceptual design. *Journal of Industrial Information Integration*, 15, 219–238. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2018.07.002>
- Polacsek, T., Roussel, S., Bouissiere, F., Cuiller, C., Dereux, P.-E., & Kersuzan, S. (2017). Towards Thinking Manufacturing and Design Together: An Aeronautical Case Study. In H. C. Mayr, G. Guizzardi, H. Ma, & O. Pastor (Eds.), *Conceptual Modeling* (pp. 340–353). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-69904-2\\_27](https://doi.org/10.1007/978-3-319-69904-2_27)
- Prasad, V. S. S. V., Hymavathi, M., Rao, C. S. P., & Bahubalendruni, M. A. R. (2022). A novel computative strategic planning projections algorithm (CSPPA) to generate oblique directional interference matrix for different applications in computer-aided design. *Computers in Industry*, 141, 103703. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2022.103703>
- Pulkkinen, A. (2007). *Product configuration in projecting company: The meeting of configurable product families and sales-delivery process*. Tampere University of Technology. <https://trepo.tuni.fi/handle/10024/114862>
- Rahn, R. (2016). *Mixed Model Assembly in helicopter industry* [Journal of Assembly].
- Rekiek, B., De Lit, P., & Delchambre, A. (2000). Designing mixed-product assembly lines. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 16(3), 268–280. <https://doi.org/10.1109/70.850645>
- Rötzer, S., Le Bourgeois, M., Thoma, D., & Zimmermann, M. (2021). TWO-LEVEL OPTIMIZATION OF PRODUCT FAMILIES: APPLICATION TO A PRODUCT FAMILY OF WATER HOSE BOXES. *Proceedings of the Design Society*, 1, 3259–3268. Cambridge Core. <https://doi.org/10.1017/pds.2021.587>
- Salaets, R., Decraemer, B., Eyckens, P., Boudewyns, W., Houdt, W. V., & Beyers, K. (2022). A flexible approach for design rule formalization and evaluation. *Procedia CIRP*, 109, 556–561. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.294>
- Schlüter, M. J., & Ostermeier, F. F. (2022). Dynamic line balancing in unpaced mixed-model assembly lines: A problem classification. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 37, 134–142. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2022.01.012>
- Schuh, G., Rudolf, S., & Vogels, T. (2014). Development of Modular Product Architectures. *Procedia CIRP*, 20, 120–125. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.05.042>
- Shamsuzzoha, A., & Helo, P. (2017). Development of sustainable platform for modular product family: A case study. *Production Planning & Control*, 28(6–8), 512–523. <https://doi.org/10.1080/09537287.2017.1309715>

- Siddique, Z., & Repphun, B. (2001). Estimating Cost Savings when Implementing a Product Platform Approach. *Concurrent Engineering*, 9(4), 285–294. <https://doi.org/10.1177/1063293X0100900405>
- Sosa, M. E., Eppinger, S. D., & Rowles, C. M. (2004). The Misalignment of Product Architecture and Organizational Structure in Complex Product Development. *Management Science*, 50(12), 1674–1689.
- Swift, K. G., & Booker, J. D. (2003). 7—Joining processes. In K. G. Swift & J. D. Booker (Eds.), *Process Selection (Second Edition)* (pp. 189–248). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-075065437-1/50011-1>
- Swift, K. G., & Booker, J. D. (2013). Chapter 10—Assembly Systems. In K. G. Swift & J. D. Booker (Eds.), *Manufacturing Process Selection Handbook* (pp. 281–289). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-099360-7.00010-0>
- Takeishi, A., & Fujimoto, T. (2005). Modularization in the Car Industry: Interlinked Multiple Hierarchies of Product, Production, and Supplier Systems. In *The Business of Systems Integration*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199263233.003.0013>
- Thomas, E., Thomas, O., Bianconi, R., Crespo, M., & Dumas, J. (2015). *Towards Enhanced Process and Tools for Aircraft Systems Assessments during very Early Design Phase*. [https://ep.liu.se/en/conference-article.aspx?series=eec&issue=118&Article\\_No=90](https://ep.liu.se/en/conference-article.aspx?series=eec&issue=118&Article_No=90)
- Tranquillo, J., Goldberg, J., & Allen, R. (2023). Chapter 8—Detailed Design. In J. Tranquillo, J. Goldberg, & R. Allen (Eds.), *Biomedical Engineering Design* (pp. 235–285). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816444-0.00008-0>
- Tschirner, C., Dumitrescu, R., Bansmann, M., & Gausemeier, J. (2015). Tailoring Model-Based Systems Engineering concepts for industrial application. *2015 Annual IEEE Systems Conference (SysCon) Proceedings*, 69–76. <https://doi.org/10.1109/SYSCON.2015.7116731>
- Ulrich, K. (1995). The role of product architecture in the manufacturing firm. *Research Policy*, 24(3), 419–440. [https://doi.org/10.1016/0048-7333\(94\)00775-3](https://doi.org/10.1016/0048-7333(94)00775-3)
- Ulrich, K. T., & Eppinger, S. D. (2006). *Product Design and Development* (3rd Edition). McGraw-Hill.
- Ulrich, K. T., & Eppinger, S. D. (2012). *Product design and development* (5th ed). McGraw-Hill/Irwin.
- Vilarinho, P. M., & Simaria, A. S. (2002). A two-stage heuristic method for balancing mixed-model assembly lines with parallel workstations. *International Journal of Production Research*, 40(6), 1405–1420. <https://doi.org/10.1080/00207540110116273>
- Wang, C.-S. (2009). Web-based modular interface geometries with constraints in assembly models. *Computers & Industrial Engineering*, 56(4), 1675–1686. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2008.10.018>
- Wang, L., Keshavarzmanesh, S., Feng, H.-Y., & Buchal, R. O. (2008). Assembly process planning and its future in collaborative manufacturing: A review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 41(1), 132. <https://doi.org/10.1007/s00170-008-1458-9>
- White, R. E., & Prybutok, V. (2001). The relationship between JIT practices and type of production system. *Omega*, 29(2), 113–124. [https://doi.org/10.1016/S0305-0483\(00\)00033-5](https://doi.org/10.1016/S0305-0483(00)00033-5)
- Wymore, A. W. (1993). *Model-Based Systems Engineering*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203746936>
- Yang, D. Y., Im, Y. T., Yoo, Y. C., Park, J. J., Kim, J. H., Chun, M. S., Lee, C. H., Lee, Y. K., Park, C. H., Song, J. H., Kim, D. Y., Hong, K. K., Lee, M. C., & Kim, S. I. (2000). Development of Integrated and Intelligent Design and Analysis System for Forging Processes. *CIRP Annals*, 49(1), 177–180. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62923-0](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62923-0)
- Yu, J., Xu, L. D., Bi, Z., & Wang, C. (2014). Extended Interference Matrices for Exploded View of Assembly Planning. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 11(1), 279–286. <https://doi.org/10.1109/TASE.2012.2235144>
- Zanettin. (2018). *Formation Gestion Industrielle*. EIGSI, Ecole d'Ingénieur en Génie des Systèmes Industriels, MISI.
- Zhang, C., Jacobson, C., Zhang, Q., Biegler, L. T., Eslick, J. C., Zamarripa, M. A., Miller, D., Stinchfeld, G., Sirola, J. D., & Laird, C. D. (2022). Optimization-based Design of Product

- Families with Common Components. In Y. Yamashita & M. Kano (Eds.), *Computer Aided Chemical Engineering* (Vol. 49, pp. 91–96). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85159-6.50015-4>
- Zhong, D., Fan, J., Yang, G., Tian, B., & Zhang, Y. (2022). Knowledge management of product design: A requirements-oriented knowledge management framework based on Kansei engineering and knowledge map. *Advanced Engineering Informatics*, 52, 101541. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2022.101541>
- Zhu, X., Hu, S. J., Koren, Y., & Marin, S. P. (2006). Modeling of Manufacturing Complexity in Mixed-Model Assembly Lines. *MSEC2006*, 649–659. <https://doi.org/10.1115/MSEC2006-21078>

## Tables des annexes

Annexe 1 – Questionnaire des entretiens qualitatifs. ....	205
Annexe 2 – Extrait de la table de données prétraitée pour l'étape 2.1. ....	206
Annexe 3 – Extrait de la table de données prétraitée pour l'étape 2.2. ....	207
Annexe 4 – Présentation des zones de montage sur un hélicoptère. ....	208

## Annexe 1 – Questionnaire des entretiens qualitatifs.

### Entretien – Architecture Produit, bureau d'étude

#### A) Phase de développement

1. Quel est le rôle d'un ingénieur en chef dans les différentes phases de développement ?
2. À quelle phase le modèle industriel devient-il une influence (découpage en MCA/CA) ?
3. Existe-t-il un outil de capitalisation de l'expérience client sur les machines ? Ou du travail déjà effectué sur les installations des précédentes machines ?

#### B) Architecture Produit

1. Quelle méthode de design est privilégiée chez Airbus ? (Incrémental/rupture) pourquoi ?
2. En quoi le branch upwards/downwards poserait un problème s'il était appliqué dans le domaine hélicoptériste ?
3. Quand est défini l'architecture du produit ?
4. Qui définit l'architecture produit d'un nouvel appareil ?
5. Pourquoi trouvons-nous des architectures produits toutes différentes chez Airbus Helicopters ?
6. Quelle serait l'influence sur le design de 2 H/C différents partageant la même architecture produit ? Est-ce possible ?
7. En quoi la certification représente-t-elle une contrainte dans le développement d'un hélicoptère ?

### Entretien - Architecture industrielle

#### **A)** Phase de développement

1. Quel est le rôle d'un architecte industriel dans les différentes phases de développement ?
2. À quelle phase le modèle industriel devient-il une influence (découpage en MCA/CA) ?
3. Existe-t-il un outil de capitalisation de l'expérience utilisateur sur les séquences d'assemblage d'un hélicoptère ?
4. Quel sont les critères du découpage industriel d'un appareil pour l'assemblage en FAL ?

#### **B)** Architecture Industrielle

1. Quelle méthode de découpage industriel est privilégiée chez Airbus ?
2. Est-ce que le branch upwards/downwards faciliterait la mise en place d'une MFAL ?
3. Quand est défini l'architecture industrielle d'un produit ?
4. Qui définit l'architecture industrielle d'un nouvel appareil ?
5. Pourquoi trouvons-nous des architectures industrielles toutes différentes chez Airbus Helicopters ? (Ok pour H160/H175 car un en carbone et l'autre en métal)
6. Quelle serait l'influence sur le design de 2 H/C différents partageant la même architecture industrielle ? Est-ce possible ?

## Annexe 2 – Extrait de la table de données prétraitée pour l'étape 2.1.

N	Ty	Article	Désignation article	Parents	c	RefCom
1	AS	332A07262553A1	DEGAGEMENT SUR PORTE METRO	332A07262553A1	0	Compatible with standard upholstery Helicopter Emergency Egress Light
1	AS	332A07267531A1	DEPLACEMENT CLAPET AUTO-OBTURANT	332A07267531A1	0	Emergency floatation gear with automatic firing - Fixed parts
2	ST	1501316	ASN-A4017ADHESIF LOCTITE	332A07267531A1	1	Emergency floatation gear with automatic firing - Fixed parts
2	ST	759149	EN3628-0,8FIL A FREINER	332A07267531A1	1	Emergency floatation gear with automatic firing - Fixed parts
1	AS	332AEC1012YY00	MTG PM HARNAIS KIT TREUILLISTE	332AEC1012YY00	0	Dual Goodrich 115VAC Elec Hoist -RP1
2	EQ	704A41816099	HARNAIS TREUILLAGE (S/M)	332AEC1012YY00	0	Dual Goodrich 115VAC Elec Hoist -RP1
2	EQ	704A41816098	LONGE AJUSTABLE 25M	332AEC1012YY00	0	Dual Goodrich 115VAC Elec Hoist -RP1
2	EQ	704A41816097	CONNECTEUR DE LONGE	332AEC1012YY00	0	Dual Goodrich 115VAC Elec Hoist -RP1
1	AS	332AEC1017DX00	RTP MTG FERRURE RENF & TREUIL AR (X5295)	332AEC1017DX00	0	Dual Goodrich 115 VAC Elec Hoist-RP
2	EP	332A84155420	FERRURE ATTACHE TREUILLISTE	332AEC1017DX00	0	Dual Goodrich 115 VAC Elec Hoist-RP
2	EP	332A84155421	PROTECTION CADRE	332AEC1017DX00	0	Dual Goodrich 115 VAC Elec Hoist-RP
2	EP	332A22347920	CONTRE FERRURE X5295	332AEC1017DX00	0	Dual Goodrich 115 VAC Elec Hoist-RP
2	ST	739924	23111AG050LE/RONDELLE	332AEC1017DX00	1	Dual Goodrich 115 VAC Elec Hoist-RP
2	ST	4853	ASN52320B0H50MECROU HEXAGONAL FREINE	332AEC1017DX00	1	Dual Goodrich 115 VAC Elec Hoist-RP
2	ST	1105155	22201BE050009LVIS TETE HEXA	332AEC1017DX00	0	Dual Goodrich 115 VAC Elec Hoist-RP
2	ST	1234015	21215TB4014RIVET TETE RONDE APLATIE	332AEC1017DX00	1	Dual Goodrich 115 VAC Elec Hoist-RP
2	ST	1234017	21215TB4016RIVET TETE RONDE APLATIE	332AEC1017DX00	1	Dual Goodrich 115 VAC Elec Hoist-RP
2	ST	1234011	21215TB4010RIVET TETE RONDE APLATIE	332AEC1017DX00	1	Dual Goodrich 115 VAC Elec Hoist-RP
2	ST	1234020	21215TB4812RIVET TETE RONDE APLATIE	332AEC1017DX00	1	Dual Goodrich 115 VAC Elec Hoist-RP
2	ST	1306592	22201BE050013LVIS TETE HEXA	332AEC1017DX00	1	Dual Goodrich 115 VAC Elec Hoist-RP
2	ST	1232800	DHS172-17220ADHESIF KIT 1,6L	332AEC1017DX00	1	Dual Goodrich 115 VAC Elec Hoist-RP
1	AS	332AEC10174V00	CAPA CVFDR / HUMS DANS CARGO	332AEC10174V00	0	M'ARMS Health & Usage Monitoring System (HUMS) with L3COM CVFE
2	ST	1103912	ECS222810VERNIS	332AEC10174V00	1	M'ARMS Health & Usage Monitoring System (HUMS) with L3COM CVFE
2	ST	1531193	ECS224120PATE CONDUCTRICE	332AEC10174V00	1	M'ARMS Health & Usage Monitoring System (HUMS) with L3COM CVFE
2	ST	740674	52351CB0040MECROU A RIVER AUTOFREINE	332AEC10174V00	1	M'ARMS Health & Usage Monitoring System (HUMS) with L3COM CVFE
2	ST	811367	ASNA0078A042RIVET AVEUGLE	332AEC10174V00	1	M'ARMS Health & Usage Monitoring System (HUMS) with L3COM CVFE
2	ST	739368	21217DC2408JRIVET FRAISE 100	332AEC10174V00	1	M'ARMS Health & Usage Monitoring System (HUMS) with L3COM CVFE
2	EP	332A61770820	CORNIERE DE MASSES	332AEC10174V00	0	M'ARMS Health & Usage Monitoring System (HUMS) with L3COM CVFE
2	SA	332A6739110001	PLATINE EQUIPEE	332AEC10174V00	0	M'ARMS Health & Usage Monitoring System (HUMS) with L3COM CVFE
2	EP	332A67391121	CORNIERE	332AEC10174V00	0	M'ARMS Health & Usage Monitoring System (HUMS) with L3COM CVFE
2	ST	1531193	ECS224120PATE CONDUCTRICE	332AEC10174V00	1	M'ARMS Health & Usage Monitoring System (HUMS) with L3COM CVFE
2	SA	332A67391502	EQUERRE EQUIPEE	332AEC10174V00	0	M'ARMS Health & Usage Monitoring System (HUMS) with L3COM CVFE
2	SA	332A67391503	SUPPORT EQUIPE	332AEC10174V00	0	M'ARMS Health & Usage Monitoring System (HUMS) with L3COM CVFE
2	ST	811367	ASNA0078A042RIVET AVEUGLE	332AEC10174V00	1	M'ARMS Health & Usage Monitoring System (HUMS) with L3COM CVFE
2	ST	782840	ASNA0078A043RIVET AVEUGLE	332AEC10174V00	1	M'ARMS Health & Usage Monitoring System (HUMS) with L3COM CVFE
2	EP	332A67393621	PLATINE COMPL EQ CVFDR	332AEC10174V00	0	M'ARMS Health & Usage Monitoring System (HUMS) with L3COM CVFE
2	ST	739793	22272BC050012LVIS TETE BOMBEE	332AEC10174V00	1	M'ARMS Health & Usage Monitoring System (HUMS) with L3COM CVFE
2	ST	739924	23111AG050LE/RONDELLE	332AEC10174V00	1	M'ARMS Health & Usage Monitoring System (HUMS) with L3COM CVFE
1	AS	332AEC251T4P00	CHEMINEMENT CVFDR CARGO	332AEC251T4P00	0	M'ARMS Health & Usage Monitoring System (HUMS) with L3COM CVFE
1	AS	332AEC452T4D00	MONTAGE CONTACT A INERTIE DU CVFDR	332AEC452T4D00	0	M'ARMS Health & Usage Monitoring System (HUMS) with L3COM CVFE
2	EQ	706A37715000	CONTACT A INERTIE	332AEC452T4D00	1	M'ARMS Health & Usage Monitoring System (HUMS) with L3COM CVFE
2	ST	1126586	22272BC040040LVIS TETE BOMBEE	332AEC452T4D00	1	M'ARMS Health & Usage Monitoring System (HUMS) with L3COM CVFE
2	ST	739923	23111AG040LE/RONDELLE	332AEC452T4D00	1	M'ARMS Health & Usage Monitoring System (HUMS) with L3COM CVFE
2	ST	1531193	ECS224120PATE CONDUCTRICE	332AEC452T4D00	1	M'ARMS Health & Usage Monitoring System (HUMS) with L3COM CVFE
2	ST	1103912	ECS222810VERNIS	332AEC452T4D00	1	M'ARMS Health & Usage Monitoring System (HUMS) with L3COM CVFE
1	AS	332AEX10174D00	CAPA PRISE 263VC	332AEX10174D00	0	M'ARMS Health & Usage Monitoring System (HUMS) with L3COM CVFE
1	AS	332AEX10274V00	CAPA / MTGE SONDE IMMERSION	332AEX10274V00	0	M'ARMS Health & Usage Monitoring System (HUMS) with L3COM CVFE
2	EP	332A67394211	SUPPORT SONDE EQUIPEE	332AEX10274V00	0	M'ARMS Health & Usage Monitoring System (HUMS) with L3COM CVFE
2	EP	332A61305120	JOINT HITACK	332AEX10274V00	0	M'ARMS Health & Usage Monitoring System (HUMS) with L3COM CVFE
2	EP	332A61305121	JOINT HITACK	332AEX10274V00	0	M'ARMS Health & Usage Monitoring System (HUMS) with L3COM CVFE
2	ST	759149	EN3628-0,8FIL A FREINER	332AEX10274V00	1	M'ARMS Health & Usage Monitoring System (HUMS) with L3COM CVFE
2	ST	1843719	22209TK00014XVIS TETE HEXA	332AEX10274V00	0	M'ARMS Health & Usage Monitoring System (HUMS) with L3COM CVFE
2	ST	1126781	23111TK040X/RONDELLE PLATE	332AEX10274V00	0	M'ARMS Health & Usage Monitoring System (HUMS) with L3COM CVFE
2	ST	1005523	MBBN3406-7/PROFILE DE GARNITURE	332AEX10274V00	1	M'ARMS Health & Usage Monitoring System (HUMS) with L3COM CVFE
1	AS	332AEX4013RX00	MTGE POTENCE DBLE TREUIL RENFORCEE	332AEX4013RX00	0	Dual Goodrich 115 VAC Elec Hoist-RP
2	ST	1574111	DCSEA395/GRAISSE G-395	332AEX4013RX00	1	Dual Goodrich 115 VAC Elec Hoist-RP
2	ST	1643993	ECS2339-00/MASTIC	332AEX4013RX00	1	Dual Goodrich 115 VAC Elec Hoist-RP
2	ST	1103912	ECS222810VERNIS	332AEX4013RX00	1	Dual Goodrich 115 VAC Elec Hoist-RP
2	ST	1005507	EN3628-0,63FIL A FREINER	332AEX4013RX00	1	Dual Goodrich 115 VAC Elec Hoist-RP
2	ST	822236	ASNA0045BC120L/ECROU HEXAGONAL A CRENEA	332AEX4013RX00	1	Dual Goodrich 115 VAC Elec Hoist-RP
2	ST	750257	ASNA0045BC080L/ECROU HEXAGONAL A CRENEA	332AEX4013RX00	1	Dual Goodrich 115 VAC Elec Hoist-RP
2	ST	739993	23134CA100/RONDELLE PLATE	332AEX4013RX00	0	Dual Goodrich 115 VAC Elec Hoist-RP
2	ST	739992	23134CA080/RONDELLE PLATE	332AEX4013RX00	1	Dual Goodrich 115 VAC Elec Hoist-RP
2	ST	740029	23310CA020020/GOUPILLE FENDUE	332AEX4013RX00	1	Dual Goodrich 115 VAC Elec Hoist-RP
2	ST	1531193	ECS224120PATE CONDUCTRICE	332AEX4013RX00	1	Dual Goodrich 115 VAC Elec Hoist-RP
2	ST	1836089	ECS7009/MASTIC D'INTERPOSITION	332AEX4013RX00	1	Dual Goodrich 115 VAC Elec Hoist-RP
2	ST	686697	EN2139-10010/RONDELLE PLATE	332AEX4013RX00	0	Dual Goodrich 115 VAC Elec Hoist-RP
2	ST	82108	EN2139-08010/RONDELLE PLATE	332AEX4013RX00	0	Dual Goodrich 115 VAC Elec Hoist-RP
2	ST	683051	EN2139-12020/RONDELLE PLATE	332AEX4013RX00	0	Dual Goodrich 115 VAC Elec Hoist-RP
2	ST	1173595	23310CA025030/GOUPILLE FENDUE	332AEX4013RX00	0	Dual Goodrich 115 VAC Elec Hoist-RP
2	EP	332A84141521	AXE EPAULE SUP AV	332AEX4013RX00	0	Dual Goodrich 115 VAC Elec Hoist-RP
2	EP	332A84141721	AXE EPAULE INF REDUIT	332AEX4013RX00	0	Dual Goodrich 115 VAC Elec Hoist-RP
2	EP	332A84141620	AXE EPAULE SUP AR	332AEX4013RX00	0	Dual Goodrich 115 VAC Elec Hoist-RP
2	SA	332A84134004	POTENCE TREUIL CAPA BIELLE	332AEX4013RX00	0	Dual Goodrich 115 VAC Elec Hoist-RP
1	AS	332AEX5011W100	MONTAGE PROTECTEUR DE RALINGUE FLOTTA	332AEX5011W100	1	Emergency floatation gear with automatic firing - Removable parts
2	EQ	704A32696001	PROTECT RALINGUES FLOTTA AR	332AEX5011W100	1	Emergency floatation gear with automatic firing - Removable parts
2	ST	739037	23321/FIL A CASSER	332AEX5011W100	1	Emergency floatation gear with automatic firing - Removable parts
1	AS	332AEX5031GW00	DEPOSE OUTILLAGE PROTECTION FLOTTA	332AEX5031GW00	0	Emergency floatation gear with automatic firing - Removable parts
1	AS	332AEX50379E00	RELEVE JEUX SAUMON AILETTE	332AEX50379E00	0	Emergency floatation gear with automatic firing - Removable parts
1	AS	332ANE251T4P00	CHEMINEMENT CVFDR DANS NEZ	332ANE251T4P00	0	M'ARMS Health & Usage Monitoring System (HUMS) with L3COM CVFE
1	AS	332ANE452T4P00	MONT 403VT + 529VC CVFDR POINTE AVANT	332ANE452T4P00	0	M'ARMS Health & Usage Monitoring System (HUMS) with L3COM CVFE
2	ST	739774	22272BC030010LVIS TETE BOMBEE	332ANE452T4P00	1	M'ARMS Health & Usage Monitoring System (HUMS) with L3COM CVFE
2	ST	739782	22272BC040010LVIS TETE BOMBEE	332ANE452T4P00	1	M'ARMS Health & Usage Monitoring System (HUMS) with L3COM CVFE
2	ST	739923	23111AG040LE/RONDELLE	332ANE452T4P00	1	M'ARMS Health & Usage Monitoring System (HUMS) with L3COM CVFE
2	ST	739922	23111AG030LE/RONDELLE PLATE	332ANE452T4P00	1	M'ARMS Health & Usage Monitoring System (HUMS) with L3COM CVFE
2	ST	1157585	DHS737-11207/CONTRE-PLAQUE	332ANE452T4P00	0	M'ARMS Health & Usage Monitoring System (HUMS) with L3COM CVFE
1	AS	332APP10174P00	CAPA HUMS SUR PUPITRE	332APP10174P00	0	M'ARMS Health & Usage Monitoring System (HUMS) with L3COM CVFE
2	ST	740667	52350CB0040MECROU A RIVER AUTOFREINE	332APP10174P00	1	M'ARMS Health & Usage Monitoring System (HUMS) with L3COM CVFE
2	ST	740675	52351CB0050MECROU A RIVER AUTOFREINE	332APP10174P00	1	M'ARMS Health & Usage Monitoring System (HUMS) with L3COM CVFE
2	ST	739318	21215DC3206JRIVET TETE RONDE APLATIE	332APP10174P00	1	M'ARMS Health & Usage Monitoring System (HUMS) with L3COM CVFE
2	ST	739366	21217DC2406JRIVET FRAISE 100	332APP10174P00	1	M'ARMS Health & Usage Monitoring System (HUMS) with L3COM CVFE
2	ST	739368	21217DC2408JRIVET FRAISE 100	332APP10174P00	1	M'ARMS Health & Usage Monitoring System (HUMS) with L3COM CVFE
2	EP	332A76467820	SUPPORT DE PRISE	332APP10174P00	0	M'ARMS Health & Usage Monitoring System (HUMS) with L3COM CVFE
1	AS	332APP151T4D00	CHEMINEMENT CVFDR POSTE PILOTAGE	332APP151T4D00	0	M'ARMS Health & Usage Monitoring System (HUMS) with L3COM CVFE
1	AS	332APP451T4D00	MONT MASSES CVFDR 251VG POSTE PILOTAGE	332APP451T4D00	0	M'ARMS Health & Usage Monitoring System (HUMS) with L3COM CVFE
1	AS	332APQ451T4V00	DEBIT CVFDR 3L/C	332APQ451T4V00	0	M'ARMS Health & Usage Monitoring System (HUMS) with L3COM CVFE
2	EQ	7312920A1001	CVFDR FARM 1/3CPADE VIDEO	332APQ451T4V00	0	M'ARMS Health & Usage Monitoring System (HUMS) with L3COM CVFE

### Annexe 3 – Extrait de la table de données prétraitée pour l'étape 2.2.

Ni	Type	Article	Zone de montage	Désignation article	c
1	AS	350ABA452SCH01	BA	CHEM PC ELEC SOUS BARQUE AVANT	0
2	SA	350A61259801	BA	CABL.PRISE COLLECTIF B4	0
2	SA	350A61259804	BA	PRISE SHUNT CYCLIQUE 4G	0
1	AS	350ABA453SCH00	BA	DECAPAGE METAL MODULES DE MASSE	0
1	AS	350ABA4545RX01	BA	CHEM PC ELEC MILIEU SOUS BARQUE	0
1	AS	350ABADB15RU00	BA	DEBIT PATEAU CENTRAL AVANT NLR	0
2	SA	350A61303100	BA	PLATEAU AVANT ET RAILS	0
3	EP	350A61302800	BA	PLATEAU CENTRAL AVT EQUIPE	0
4	EP	350A61302820	BA	PLATEAU CENTRALE AVANT EQUIPE	0
3	EP	350A67607920	BA	PLATINE RELAIS	0
3	EP	350A61355721	BA	SUPPORT PRISE COUPURE	0
3	EP	350A61302332	BA	RAIL, SUPPORT, MODULE	1
3	EP	350A61302322	BA	RAIL LG.130	0
3	EP	350A61302327	BA	RAIL LG 100	0
3	EP	350A61302328	BA	RAIL LG 110	0
1	AS	350ABA408K5K00	BA	DECAPAGE METALLISATION MASSE ENS VENTIL	0
1	AS	350ABA409K5K00	BA	MTG FIL A CASSER	0
1	AS	350ABA452K5J01	BA	BRANCH FX CLIM SOUS BARQUE AVANT	0
1	AS	350ABA453K5J01	BA	BRANCH FX CLIM MILIEU MILIEU SOUS BARQUE	0
1	AS	350ABA454K5J01	BA	MTG MASSES 3910N SOUS BARQUE CENTRAL	0
1	AS	350ABA455K5J00	BA	EQUIP CLIM CLOISON AV DROITE	0
1	AS	350ABA457K5J00	BA	DECAPAGE METALLISATION MASSE 3910N	0
1	AS	350ABA458K5J00	BA	DECAPAGE MASSE 3505N SOUS BARQUE	0
1	AS	350ABA404K5K05	BA	MTG REPARTITEUR D'AIR SS BARQUE	0
2	EP	350A72452600	BA	COLLERETTE EXT Y400	0
3	EP	350A72452620	BA	COQUE	0
3	EP	350A72452621	BA	COLLERETTE	0
3	EP	350A72452622	BA	CLINQUANT	0
2	EP	350A72452700	BA	COLLERETTE INT Y400 C	0
2	EP	350A72449020	BA	SORTIE DESEMBUAGE DISTRI	0
2	SA	350A72458420	BA	BOA REPARTITEUR CONDUIT VERRIERE	0
2	EP	350A72453120	BA	JOINT COLLERETTE	0
2	EP	350A72453320	BA	BOA D86 D86 L325 ABS1114	0
2	EP	350A72451220	BA	MANCHON	0
2	EP	350A72453502	BA	COLLERETTE BARQUE THERMO	0
3	EP	350A72453524	BA	JOINT COLLERETTE	0
2	SA	350A72450003	BA	REPARTITEUR D'AIR	0
3	EP	350A72450003K1	BA	KIT THERMO ENS REPARTITEUR D'AIR	0
4	EP	350A72450224	BA	COQUE SUP NUE	0
4	EP	350A72448800	BA	CONNEXION ASS	0
5	EP	350A72448820	BA	COQUE SUP	0
5	EP	350A72448821	BA	COQUE INF	0
4	EP	350A72448900	BA	ENTREE D'AIR ASSEMBLEE	0
5	EP	350A72448920	BA	PARTIE SUP	0
5	EP	350A72448921	BA	PARTIE INF	0
4	EP	350A72450320	BA	COQUE INFERIEURE	0
3	EP	350A72441101	BA	SUPPORT ACTIONNEUR	0
4	EP	350A72441120	BA	SUPPORT NU	0
3	EP	350A72450700	BA	SUPPORT REPARTITEUR EQ.	0
4	EP	350A72450720	BA	SUPPORT NU	0
3	EP	350A72450123	BA	DISQUE NU	0
3	EP	350A72452021	BA	JOINT	0
3	EP	350A72452221	BA	JOINT PLAT	0
3	EP	M212A3201211	BA	FLAP AXIS GUIDE	0
3	EP	350A72440620	BA	AXE VOLET ROTATIF	0
3	EQ	M212A00T0001	BA	ACTIONNEUR 3 POSITIONS	0
3	EP	M212A3201214	BA	AXE VOLET	0
3	EP	M212A3201209	BA	FLAP AXIS GUIDE	0
3	EP	350A72452121	BA	JOINT PLAT	0
3	EP	350A72450800	BA	SUPPORT REPARTITEUR EQ.	0
4	EP	350A72450820	BA	SUPPORT NU	0
3	EP	350A72450063	BA	CLINQUANT DIAMETRE 80	0
3	EP	350A72450064	BA	CLINQUANT DIAMETRE 100	0
3	EP	M212A3201215	BA	BRIDE AXE GUIDE	0
3	EP	350A72450124	BA	PLAQUE AXE SUP	0
3		1978380	BA	TDS: 1978380 MARKING	0
1	AS	350ABA405K5K04	BA	MTG ENS EVAPO & TUYAU FREON SS BARQUE	0
2	EP	350A72437300	BA	CONDUIT ENTREE D'AIR C	0
3	EP	350A72437320	BA	COQUE	0

## Annexe 4 – Présentation des zones de montage sur un hélicoptère.

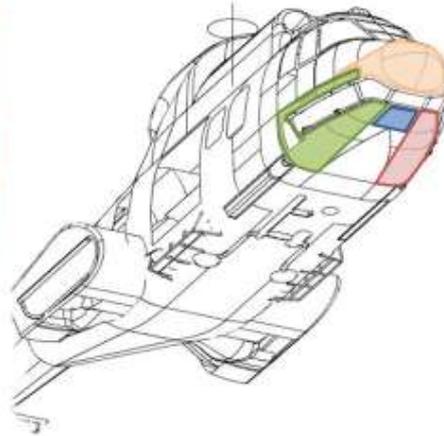
Objet : ZONING APPAREIL : Découpage **POINTE AVANT** (hors poste de pilotage)

332A<sup>NE</sup>...  
332P<sup>NE</sup>...

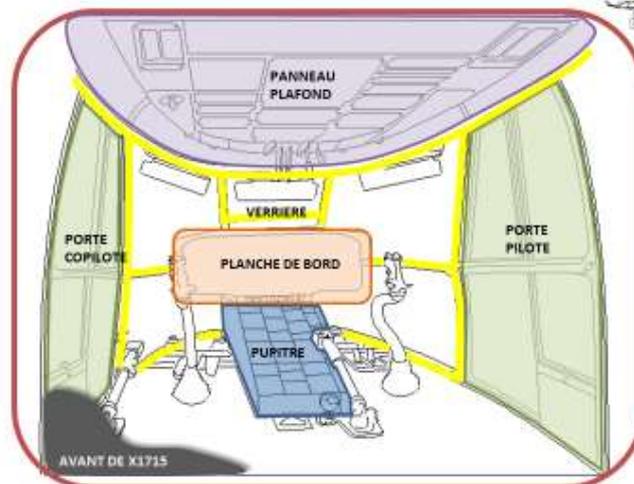
332A<sup>QD</sup>...  
332P<sup>QD</sup>...

332A<sup>TH</sup>...  
332P<sup>TH</sup>...

332A<sup>QG</sup>...  
332P<sup>QG</sup>...



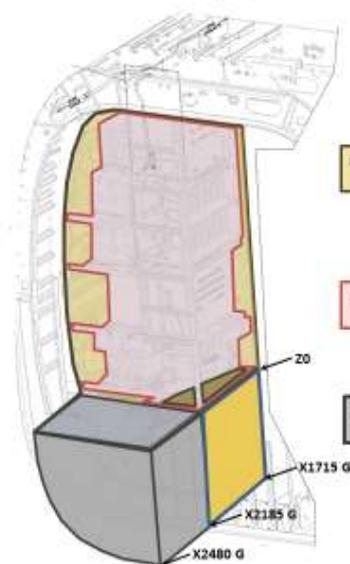
Objet : ZONING APPAREIL : Découpage **POSTE DE PILOTAGE**



10224-3-010-01 - 01

Objet: **ZONING APPAREIL : Découpage ARMOIRE ELECTRIQUE**

332AE...  
332PAE...



AVANT MONTAGE DE  
LA STRUCTURE AE

AU DESSUS DE Z0

SOUS Z0

APRES MONTAGE DE  
LA STRUCTURE AE

PLATEAU INCLINE

COMPARTIMENT SOUS Z0  
ENTRE X2185 ET X2480

SOUS DECOUPAGE  
DE LA ZONE

Objet: **ZONING APPAREIL : Découpage CARGO GAUCHE**

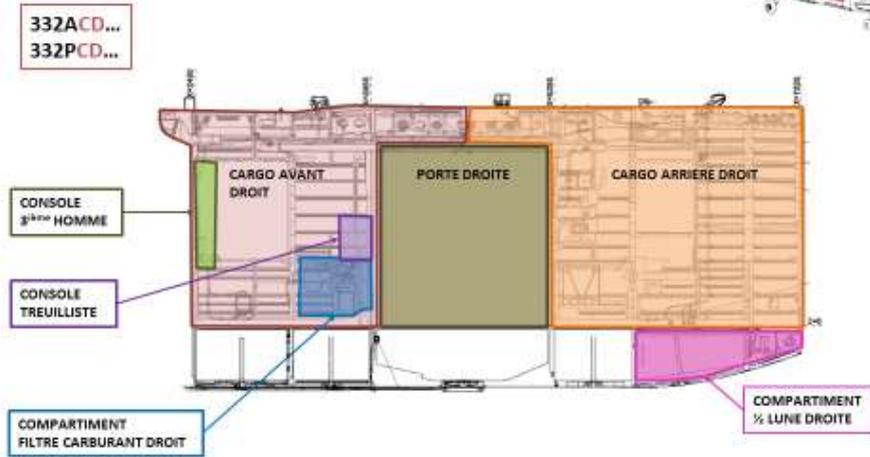
332ACG...  
332PCG...



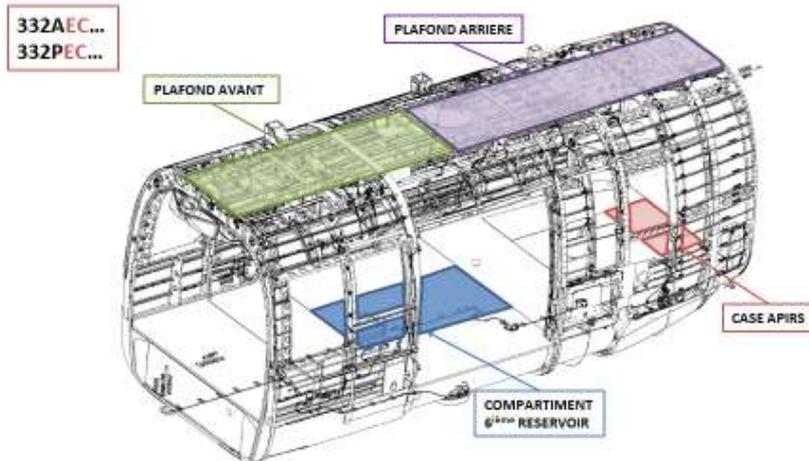
COMPARTIMENT  
FILTRE CARBURANT  
GAUCHE

COMPARTIMENT  
1/2 LUNE GAUCHE

Objet : ZONING APPAREIL : Découpage CARGO DROIT



Objet : ZONING APPAREIL : Découpage ENSEMBLE CARGO



Objet : ZONING APPAREIL : Découpage **PARTIE INTERMEDIAIRE - NAC**

ZONE ENTRE X7225 ET X9000 SUR K1  
ZONE ENTRE X7225 ET X9900 SUR K2

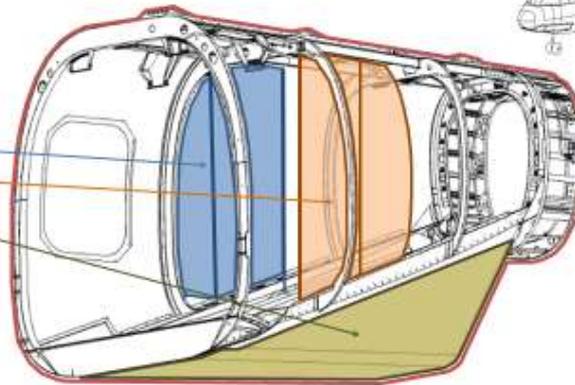
332APl...  
332PPl...

SOUS DECOUPAGE  
DE LA ZONE :

ETAGERES DROITES

ETAGERES GAUCHES

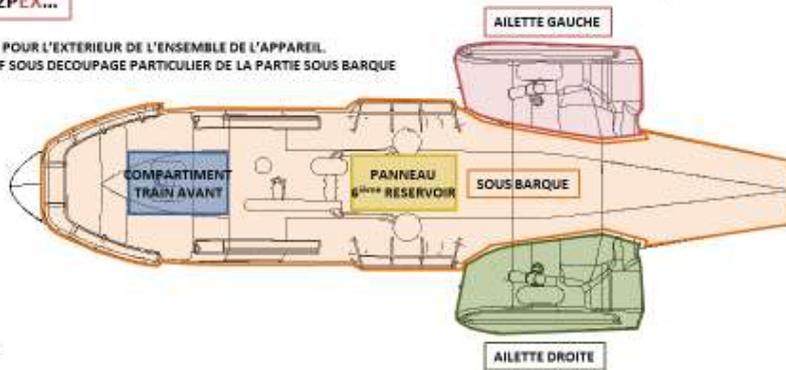
SOUTE



Objet : ZONING APPAREIL : Découpage **EXTERIEUR**

332AEX...  
332PEX...

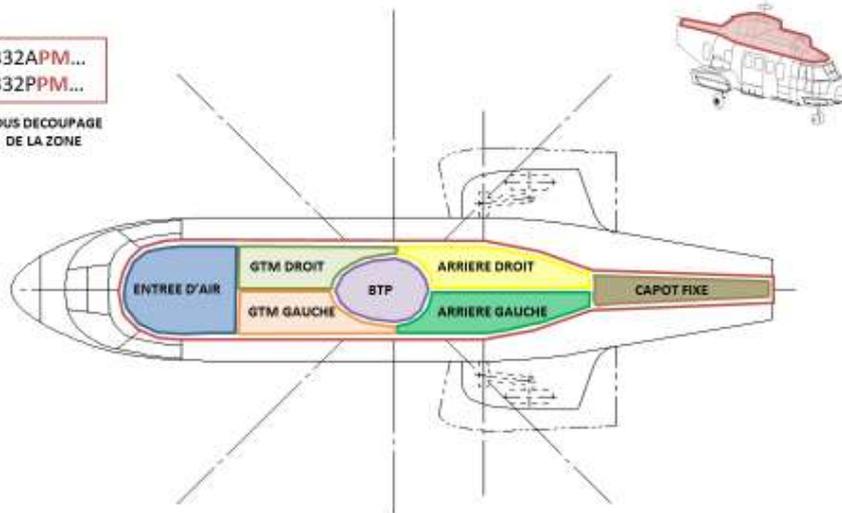
EX = POUR L'EXTERIEUR DE L'ENSEMBLE DE L'APPAREIL.  
SAUF SOUS DECOUPAGE PARTICULIER DE LA PARTIE SOUS BARQUE



Objet: **ZONING APPAREIL : Découpage PLANCHER MECANIQUE**

332APM...  
332PPM...

SOUS DECOUPAGE  
DE LA ZONE



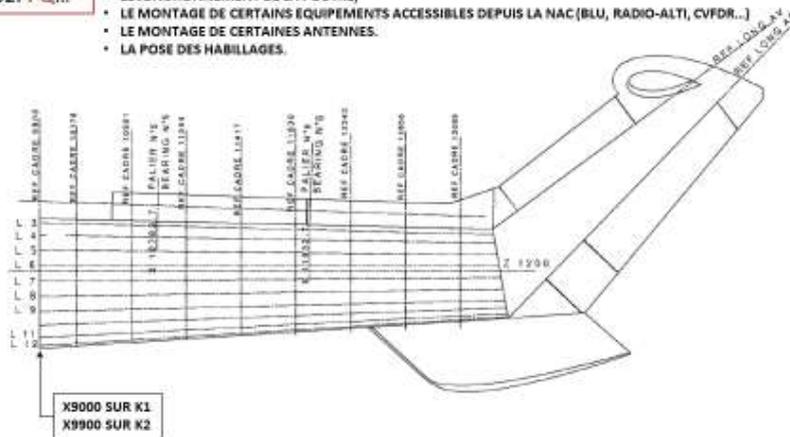
Objet: **ZONING APPAREIL : Découpage POUTRE DE QUEUE**

332APQ...  
332PPQ...

LA POUTRE DE QUEUE EST DE RESPONSABILITE ADU.

LA FAL EST CONCERNEE PAR :

- LE JONCTIONNEMENT DE LA POUTRE,
- LE MONTAGE DE CERTAINS EQUIPEMENTS ACCESSIBLES DEPUIS LA NAC (BLU, RADIO-ALTI, CVFDR...)
- LE MONTAGE DE CERTAINES ANTENNES.
- LA POSE DES HABILLAGES.



X9000 SUR K1  
X9900 SUR K2



## Table des figures

Figure 1 : Résumé de la démarche de résolution .....	18
Figure 2: Structure du premier chapitre .....	22
Figure 3 : Thèmes et axes de recherche du LCPI.....	27
Figure 4 : Évolution de l'entité 'hélicoptère' d'Airbus.....	28
Figure 5 : Gamme civile, militaire et des démonstrateurs d'Airbus Helicopters.....	30
Figure 6 : Les 4 piliers liés au déploiement de DDMS .....	32
Figure 7 : Une gamme des hélicoptères Leonardo à gauche (de gauche à droite, AW169, AW139 et AW189) et la gamme civile Airbus Helicopters à droite .....	34
Figure 8 : Construction de l'état de l'art .....	38
Figure 9 : Différentes méthodes de lignes d'assemblage.....	39
Figure 10 : Positionnement des industries selon l'organisation de production.....	40
Figure 11 : Assemblage en ilots (a) Assemblage en Flow Line (b) (T. Li & Lockett, 2017).....	41
Figure 12 : Structure du Design for « X »(Chiu et al., 2023).....	44
Figure 13 : Résumé de l'étude de l'état de l'art autour de la flexibilité d'un système de production.....	47
Figure 14 : Découpage modulaire d'un hélicoptère, le premier niveau de granularité est détaillé .....	50
Figure 15 : Définition du Design For Reuse et Design By Reuse.....	52
Figure 16 : Résumé des processus de conception amont .....	55
Figure 17 : Rôle de l'interface dans un assemblage de composants .....	58
Figure 18 : Résumé de la gestion des interfaces d'assemblage.....	63
Figure 19 : Résumé de l'état de l'art lié au manque de règles de DfMMFAL présentent dans la littérature .....	67
Figure 20 : Structure du deuxième chapitre .....	72
Figure 21 : Méthode DfMMFAL .....	76
Figure 22 : Schéma de suivi – étape 1.....	77
Figure 23 : Résumé de l'étape 1 .....	77
Figure 24 : Démarche de la conduite des entretiens qualitatifs.....	78
Figure 25 : Schéma de suivi – étape 2.....	81
Figure 26 : Schéma de suivi – étape 2.0.....	82
Figure 27 : Résumé de l'étape 2.0.....	82
Figure 28 : Démarche d'utilisation de l'AR.....	83

Figure 29 : Différents types d'éléments d'un APP .....	85
Figure 30 : Schéma de suivi – étape 2.1.....	86
Figure 31 : Résumé de l'étape 2.1 .....	86
Figure 32 : Démarche de l'utilisation de la modélisation des règles de réutilisation de composants.....	87
Figure 33 : Schéma de suivi – étape 2.2.....	88
Figure 34 : Résumé de l'étape 2.2.....	88
Figure 35 : Démarche de l'utilisation de la modélisation des métriques de suivi et de réutilisation de composants .....	89
Figure 36 : Schéma de suivi – étape 2.3.....	90
Figure 37 : Résumé de l'étape 2.3.....	90
Figure 38 : Démarche d'utilisation de l'outil ICARRE .....	91
Figure 39 : Algorigramme de l'algorithme ICARRE.....	92
Figure 40 : Résumé de la section 2.2.2 .....	94
Figure 41 : Protocole de test.....	95
Figure 42 : Résumé des constats de l'état de l'art, la problématique et les hypothèses de recherche .....	97
Figure 43 : Résumé de la formalisation des règles DfMMFAL.....	97
Figure 44 : Structure du troisième chapitre .....	100
Figure 45 : Schéma de suivi – étape 1.....	101
Figure 46 : Protocole expérimental de l'étape 1 .....	101
Figure 47 : Rappel de la démarche de l'étape 1 .....	104
Figure 48 : Métiers et fonctions .....	106
Figure 49 : Organigramme du plateau programme .....	108
Figure 50 : Processus de développement d'un nouvel appareil entre le Bureau d'étude et l'architecture industrielle.....	110
Figure 51 : Découpage modulaire indiquant les quatre états de modularité d'un produit .....	123
Figure 52 : Rappel de la méthode de formalisation des règles DfMMFAL.....	127
Figure 53 : Hélicoptères H125 à gauche et H130 à droite .....	128
Figure 54 : Hélicoptères H215 à gauche et H225 à droite .....	128
Figure 55 : Schéma de suivi – étape 2.0.....	129
Figure 56 : Protocole expérimental de l'étape 2.0 .....	129
Figure 57 : Rappel de la démarche de l'étape 2.0.....	130
Figure 58 : Schéma de suivi – étape 2.1.....	133

Figure 59 : Protocole expérimental de l'étape 2.1 .....	133
Figure 60 : Processus de transformation des données de la fiche client jusqu'à l'assemblage d'un appareil.....	134
Figure 61 : Rappel de la démarche de l'étape 2.1 .....	135
Figure 62 : Répartition de la réutilisation de composants en fonction de références commerciales.....	136
Figure 63 : Schéma de suivi – étape 2.2.....	147
Figure 64 : Protocole expérimental de l'étape 2.2 .....	147
Figure 65 : Rappel de la démarche de l'étape 2.2.....	148
Figure 66 : Commande Excel permettant d'afficher la zone de montage associée à chaque référence de l'APP .....	149
Figure 67 : Préparation des données pour l'étape 2.2 .....	150
Figure 68 : Découpage utilisé pour les critères granularité et modularité .....	151
Figure 69 : Exemple d'un découpage modulaire et granulométrique sur la poutre de queue d'un hélicoptère.....	152
Figure 70 : Résultats de l'étape 2.2 sur le couple H130/H125.....	154
Figure 71 : Résultats de l'étape de renforcement de l'étape 2.2 sur le couple H215/H225 selon les critères de modularité et granularité .....	156
Figure 72 : Schéma de suivi – étape 2.3.....	160
Figure 73 : Protocole expérimental de l'étape 2.3 .....	160
Figure 74 : Rappel de la démarche de l'étape 2.3.....	161
Figure 75 : Comparaison des deux fiches techniques du montage d'une antenne GPS.....	164
Figure 76 : Intégration du relai sans plaque d'interface sur le premier appareil.....	165
Figure 77 : Intégration du relai de disjoncteur avec une plaque d'interface pour le second appareil .....	165
Figure 78 : Equipement des réservoirs de l'appareil A à gauche et 2 à droite.....	166
Figure 79 : Structure du quatrième chapitre.....	178
Figure 80 : Méthode DfMMFAL .....	179
Figure 81 : Proposition du nouveau processus de développement d'un produit, compatible avec la méthode DfMMFAL.....	182



## Table des tableaux

Tableau 1 : Entités de recherche travaillant sur l'optimisation entre les processus de conception et les systèmes de production à l'international .....	25
Tableau 2 : Entités de recherche travaillant sur l'optimisation entre les processus de conception et les systèmes de production en France.....	26
Tableau 3 : Revue de littérature sur la gestion de connaissance de conception.....	54
Tableau 4 : Résumé des différentes approches existantes concernant les règles de conception .....	65
Tableau 5 : Différents éléments présents dans un Assembly Process Plan.....	84
Tableau 6 : Présentations des résultats attendus.....	96
Tableau 7 : Tableau des métiers interviewés .....	104
Tableau 8 : Positions et expériences des employés entretenus et durée de leurs entretiens ..	105
Tableau 9 : Présentation des états du découpage modulaire d'un produit .....	123
Tableau 10 : Contraintes issues de l'identification des métiers au sein d'Airbus Helicopters .....	125
Tableau 11 : Décomposition d'un APP issus de SAP .....	130
Tableau 12 : Extrait d'un APP avant l'étape de prétraitement des données .....	131
Tableau 13 : Extrait d'un APP après le calcul de l'Analyse Reuse sur le couple H215/H225 .....	131
Tableau 14 : Tranche [90% ; 100%[ (9,8% des références).....	138
Tableau 15 : Tranche [80% ; 90%[ (13,73% des références).....	138
Tableau 16 : Tranche ]70% ; 80%[ (25,49% des références).....	139
Tableau 17 : Règles de réutilisation liées aux références commerciales .....	143
Tableau 18 : Les différents critères de l'étape 2.2 .....	153
Tableau 19 : Résultats de l'étape 2.2 selon les critères de granularité et de modularité.....	154
Tableau 20 : Résultats de l'étape 2.2 selon les zones de montage .....	155
Tableau 21 : Résultats de l'étape 2.2 avec l'étape de renforcement .....	156
Tableau 22 : Résultats de l'étape de renforcement de l'étape 2.2 sur le couple H215/H225.	157
Tableau 23 : Indicateurs clés à suivre lors du développement d'un nouvel appareil à assembler en MMFAL .....	158
Tableau 24 : Extrait de l'opération du montage du FLIR avec les résultats de l'algorithme.	161
Tableau 25 : Résultats de l'algorithme après le premier déploiement .....	162
Tableau 26 : Exemple de mots figurant dans la liste d'interdiction.....	163

Tableau 27 : Résultats de l’algorithme après le second déploiement .....	163
Tableau 28 : Résultats de l’étape 2.3 après les deux itérations et l’étape de validation .....	166
Tableau 29 : Synthèse des expérimentations sur la méthode DfMMFAL .....	173
Tableau 30 : Résumé de l’utilisation des étapes de la méthode DfMMFAL .....	182

**Edouard BOYAULT**

**Optimisation des interfaces entre les processus de conception amonts et les systèmes de production : Application à l'élaboration d'une méthode de DfMMFAL pour l'industrie hélicoptériste**

**Résumé :** Certains industriels souhaitent tirer pleinement parti des opportunités offertes par l'Industrie du Futur afin de réduire les délais et les stocks intermédiaires, d'améliorer la productivité et de répondre rapidement aux fluctuations du marché. Pour y parvenir, les entreprises prévoient d'utiliser les nouvelles technologies du numériques pour optimiser leur processus de conception et de production de nouveaux produits. L'un des objectifs clés est de développer des produits avec une plus grande flexibilité de production, notamment en permettant l'assemblage de modèles différents sur une même chaîne de production (MMFAL), à l'image de l'industrie automobile.

La littérature présente des méthodes de conception et d'industrialisation qui ne sont pas toujours en phase pour optimiser la production sur une MMFAL. De plus, bien qu'il arrive que certains modèles différents soient assemblés sur de telles chaînes de production, les pratiques de conception y ayant conduit n'ont pas été formalisées. Enfin, les compétences nécessaires à l'époque ne sont pas toujours disponibles compte tenu de la longue période entre deux développements d'un même segment du marché.

Ainsi, l'objectif de ces travaux de thèse est de proposer un processus de conception amont facilitant l'assemblage d'un nouveau produit en MMFAL. Cet objectif permet de répondre à la problématique de recherche suivante : Comment aider les équipes de développement à concevoir de manière optimisée des nouveaux produits compatibles avec une MMFAL ? En se basant sur les contributions existantes concernant les processus de conception amont, notre proposition de réponse à cette problématique porte sur l'élaboration de recommandations techniques pour la conception en vue d'un assemblage en MMFAL.

L'apport principal de cette thèse est la formalisation de recommandations techniques de conception pour MMFAL : la méthode DfMMFAL. Une démarche recherche-action a été adoptée pour développer cette méthode structurée en deux grands axes : la formalisation des connaissances, permettant de récupérer les spécificités de l'industrie autour de la MMFAL, et la formalisation des pratiques, pour mettre au point des règles et métriques à partir de l'analyse de produits existants. Les apports de ces travaux de recherche sont démontrés au travers de l'expérimentation de la méthode DfMMFAL réalisée chez un industriel, dans le cadre d'un projet industriel concret pour la mise en place d'une MMFAL.

**Mots-clés :** Processus de conception amont, système de production, optimisation, MMFAL, Design for MMFAL,

**Abstract:** Some industrialists aim to fully capitalize on the opportunities offered by the Industry of the Future to reduce lead times and intermediate stocks, improve productivity, and respond quickly to market fluctuations. To achieve this, companies plan to leverage new digital technologies to optimize their design and production processes for new products. One of the key objectives is to develop products with greater production flexibility, particularly by enabling the assembly of different models on the same production line (MMFAL), like the automotive industry.

Existing literature presents design and industrialization methods that are not always aligned to optimize production in an MMFAL. Furthermore, while it happens that different models are assembled on such production lines, the design practices leading to this have not been formalized. Lastly, the required skills are not always available given the long period between two developments in the same market segment.

Therefore, the objective of this thesis work is to propose an upstream design process that facilitates the assembly of a new product in an MMFAL. This objective addresses the following research question: How can development teams be assisted in designing new products compatible with an MMFAL in an optimized manner? Building upon existing contributions regarding upstream design processes, our proposed answer to this question focuses on developing technical recommendations for design with a view towards MMFAL assembly.

The main contribution of this thesis is the formalization of technical design recommendations for MMFAL: the DfMMFAL method. A research-action approach has been adopted to develop this method, structured into two main axes: the formalization of knowledge, enabling the capture of industry-specific aspects related to MMFAL, and the formalization of practices, to establish rules and metrics based on the analysis of existing products. The contributions of this research work are demonstrated through the experimentation of the DfMMFAL method at an industrial site, within the context of a concrete industrial project for the implementation of an MMFAL.

**Keywords:** Upstream design process, production system, optimization, MMFAL, Design for MMFAL, DfMMFAL.