



Université du Québec
à Rimouski

L'influence de l'implantation des nouvelles technologies sur les indicateurs de performance des projets d'ingénierie dans les domaines manufacturiers aéronautique et aérospatial

Mémoire présenté

dans le cadre du programme de maîtrise en gestion de projet
en vue de l'obtention du grade de maître ès sciences (M. Sc)

PAR

© Florent NOGUEIRA

Novembre 2025

Composition du jury :

Hamid Nach, président du jury, UQAR

Erika Souza de Melo, directeur de recherche, Université de Sherbrooke

Tian Zeng, codirecteur de recherche, UQAR

Caroline Blais, examinateur externe, Université de Sherbrooke

Dépôt initial le 22 août 2025

Dépôt final le 26 novembre 2025

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI
Service de la bibliothèque

Avertissement

La diffusion de ce mémoire ou de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « *Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse* ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de son travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, l'auteur autorise l'Université du Québec à Rimouski à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de son travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits moraux ni à ses droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, l'auteur conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont il possède un exemplaire.

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à mes deux directrices de recherche, Erika Souza de Melo et Tian Zeng, pour leur accompagnement, leur rigueur scientifique et leurs précieux conseils tout au long de ce projet. Leur soutien et leur disponibilité ont été essentiels à l'avancement de ce mémoire.

Je remercie également l'ensemble des professeurs, assistants et membres du personnel de soutien que j'ai eu la chance de côtoyer durant mon parcours universitaire. Leur engagement et leur professionnalisme ont grandement contribué à la richesse de cette expérience.

Je souhaite également remercier chaleureusement mon employeur, Marc-Antoine Brouillette, pour son soutien constant au cours des trois dernières années. Sa compréhension et sa confiance ont été déterminantes pour me permettre de concilier travail et études.

Un grand merci à ma sœur, Coline, pour ses conseils avisés en rédaction et son aide précieuse dans la relecture et la correction du mémoire.

Enfin, je tiens à remercier du fond du cœur ma conjointe Dominique, ainsi que mes deux filles, Rosie et Emma, pour leur patience, leur encouragement et leur amour. Leur présence bienveillante a été une source d'énergie indispensable à chaque étape de ce parcours.

AVANT-PROPOS

Au-delà de l'intérêt académique et professionnel que représente cette thématique, ce sujet de recherche s'inscrit également dans une démarche personnelle. Passionné depuis toujours par l'aviation et l'aérospatiale, le chercheur a orienté son parcours afin de concilier cet intérêt avec les principes et les pratiques de la gestion de projet. Cette convergence naturelle entre deux domaines d'expertise, l'ingénierie aérospatiale et le management, confère à cette étude une dimension profondément motivante. Explorer l'impact des nouvelles technologies sur la performance des projets complexes dans ce secteur ne relève donc pas seulement d'un enjeu scientifique, mais aussi d'une véritable vocation professionnelle.

RÉSUMÉ

De nos jours, réussir un projet stratégique permet de garantir la survie de l'organisation. Il en est ainsi pour la majorité des entreprises qui ont pour but la pérennité de leur activité et le développement de leur marché. Le secteur de l'aéronautique et de l'aérospatiale est d'autant plus concerné que l'évolution rapide de la technologie réduit les monopoles anciens et permet l'émergence de nouveaux acteurs. L'implantation de l'impression 3D, de la simulation par ordinateur ou de l'IA sont des exemples de technologies qui permettent de réduire les besoins en ressources humaines et en capitaux, et augmentent par le fait même l'efficacité de la conception. Cette recherche se focalise sur la relation entre l'utilisation de technologies diverses en gestion de projet (particulièrement des projets de R&D, conception/design et amélioration continue) et les indicateurs de performances qui mesurent et contrôlent les éléments qui qualifient le succès du projet.

Cette recherche adopte une approche qualitative, basée sur des entrevues semi-structurées menées auprès de 25 professionnels du secteur aérospatial et aéronautique répartis au Canada, aux États-Unis et en France. Les répondants incluent des chefs de projet, des ingénieurs et des spécialistes de la transformation numérique, issus d'organisations majeures en aviation civile, de grandes firmes aérospatiales et d'intégrateurs de systèmes clés. Les données ont été analysées par codification thématique afin d'identifier des tendances et des éléments récurrents. Les discussions ont principalement porté sur l'usage des technologies numériques, l'application de méthodologies de gestion de projet (traditionnelle, agile ou hybride) et la perception de leur impact sur la performance des projets. Ces thématiques ont constitué la base analytique de l'étude et ont guidé l'interprétation des résultats.

Les résultats obtenus indiquent que l'adoption d'outils numériques sont associés à l'amélioration de la performance des projets, particulièrement en ce qui concerne le respect des échéanciers, la maîtrise des coûts et la réduction des risques, et lorsqu'ils sont intégrés dans une structure de gouvernance cohérente. Des indicateurs tels que le SPI (*Schedule Performance Index*) et le CPI (*Cost Performance Index*) sont couramment utilisés pour suivre l'avancement. Toutefois, les technologies avancées comme la réalité virtuelle et les jumeaux numériques ne sont pas encore largement déployées dans le secteur. En revanche, des solutions telles que l'impression 3D, la simulation informatique et les logiciels de gestion de projet sont plus largement adoptées et intégrées dans les opérations quotidiennes. L'intelligence artificielle (IA) constitue une tendance émergente, avec un fort potentiel, mais son adoption reste limitée en raison de la sensibilité des données et d'un recours fréquent au développement interne.

Par ailleurs, l'étude révèle que les meilleurs résultats sont obtenus lorsque les organisations adoptent une méthodologie hybride - combinant les approches agiles et traditionnelles - alliée à des outils numériques simples et bien intégrés au contexte du projet.

Cette étude contribue à une meilleure compréhension de l'interaction entre la transformation numérique et la performance des projets d'ingénierie. Elle souligne l'importance d'adopter une perspective systémique et stratégique lors de l'implantation de solutions numériques. Les résultats offrent des pistes concrètes aux décideurs souhaitant aligner leurs investissements technologiques avec les objectifs de performance. En mettant en lumière les conditions favorables et les freins à l'intégration numérique, cette recherche contribue à réduire l'écart entre les promesses technologiques et leur impact réel dans l'environnement des projets aérospatiaux.

Mot-clés : Gestion de projets complexes, Ingénierie aérospatiale, Transformation numérique, Indicateurs de performance, Méthodologie hybride de gestion de projet.

ABSTRACT

Nowadays, successfully completing a strategic project is essential to ensuring an organization's survival. This holds true for most companies whose goal is to sustain their operations and expand their market. The aerospace and aeronautical manufacturing sectors are undergoing a profound transformation driven by the accelerated integration of digital tools and innovative technologies. The implementation of 3D printing, computer simulation, and AI are examples of technologies that reduce human and capital resource requirements, thereby increasing design efficiency. This research focuses on the relationship between the use of various technologies in project management (especially R&D, design, and continuous improvement projects), the methodologies employed, and the performance indicators that measure and control the factors defining project success.

This research adopts a qualitative approach based on semi-structured interviews with 25 professionals from the aerospace and aeronautical sectors across Canada, the United States, and France. The participants include project managers, engineers, and digital transformation specialists from leading organizations in civil aviation, major aerospace firms, and key systems integrators. The data were analyzed using thematic coding to identify recurring patterns and insights. Core topics of the discussions included the use of digital technologies, the application of project management methodologies (traditional, agile, or hybrid), and the perceived impact of these elements on project performance. These themes served as the analytical backbone of the study and guided the interpretation of results.

The findings indicate that the adoption of digital tools is associated with improved project performance, particularly regarding schedule adherence, cost control, and risk mitigation, when these tools are integrated within a coherent project governance structure.

Metrics such as the Schedule Performance Index (SPI) and Cost Performance Index (CPI) were commonly used to monitor progress. However, advanced technologies like virtual reality and digital twins are not yet widely deployed across the sector. In contrast, solutions such as 3D printing, computational simulation, and project management software are more broadly adopted and integrated into daily operations. Artificial intelligence (AI) is an emerging trend, showing strong potential, yet its adoption remains constrained due to concerns over data sensitivity and a frequent reliance on in-house development. Moreover, the study reveals that the most effective outcomes are observed when organizations adopt a hybrid project management methodology - blending agile and traditional approaches - combined with simple, well-integrated digital tools tailored to the project context.

This study contributes to a better understanding of the interplay between digital transformation and engineering project performance. It underscores the importance of adopting a systemic and strategic perspective when implementing digital solutions. The results offer actionable insights for decision-makers aiming to align technology investments with performance objectives. By shedding light on the enabling and limiting conditions of digital integration, this research helps bridge the gap between technological promise and practical impact in aerospace project environments.

Keywords: Complex Project Management, Aerospace Engineering, Digital Transformation, Performance Metrics, Hybrid Project Methodology.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	vii
AVANT-PROPOS	ix
RÉSUMÉ	xi
ABSTRACT.....	xiii
TABLE DES MATIÈRES.....	xv
LISTE DES TABLEAUX	xix
LISTE DES FIGURES	xxi
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES	xxiii
CHAPITRE 1 PARTIE INTRODUCTIVE.....	1
1.1 CONVERSATION	1
1.2 PERSPECTIVES ET DEBATS.....	4
1.3 PROBLEMATIQUE SPECIFIQUE	10
1.4 LOCALISATION DE LA RECHERCHE	15
1.5 OBJECTIFS DE LA RECHERCHE ET QUESTIONS DE RECHERCHE	16
1.6 PERIMETRE DE LA RECHERCHE.....	17
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	19
2.1 SOLUTIONS ET OUTILS TECHNOLOGIQUES.....	19
2.1.1 Technologies de l'information et de la communication.....	20
2.1.2 Solutions d'ingénierie numérique	24
2.1.3 Intelligence Artificielle (IA).....	29
2.2 METHODOLOGIE EN GESTION DE PROJET	31
2.2.1 Gestion de projet traditionnelle (dans le secteur aérospatial).....	32

2.2.2 Méthodologie Agile.....	34
2.2.3 Modèles alternatifs	37
2.3 PROJETS D'INGENIERIE COMPLEXES	40
2.3.1 Développement de produits complexes.....	40
2.3.2 Le secteur de l'aéronautique et de l'aérospatial.....	42
2.3.3 Contexte organisationnel spécifique	43
2.4 INDICATEUR DE PERFORMANCE.....	46
2.4.1 Notion de performance.....	46
2.4.2 La notion de risque comme indicateur de performance	49
2.4.3 Limites et liens avec les critères de réussite et le concept de succès	50
2.4.4 La théorie de la contingence	51
2.4.5 Environnement économique, opportunité et profitabilité des entreprises	54
2.5 CADRE CONCEPTUEL DE LA RECHERCHE.....	56
2.5.1 Relation entre l'utilisation de solutions et outils technologiques, et performance de projet.....	57
2.5.2 Relation entre méthodologie en gestion de projet et performance.....	57
2.5.3 Résumé des questions de recherche, propositions formulées et variables étudiées	58
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE	61
3.1 VUE D'ENSEMBLE DE LA METHODOLOGIE.....	61
3.2 POSITIONNEMENT DE LA RECHERCHE	62
3.3 PERSPECTIVES DE RECHERCHE	63
3.4 LES NIVEAUX ET UNITES D'ANALYSE.....	63
3.5 APPROCHE DE RECHERCHE.....	64
3.6 RECHERCHE PROPOSEE : RECHERCHE QUALITATIVE	64
3.7 METHODES MOBILISEES.....	65
3.8 L'HORIZON DE TEMPS	65
3.9 TECHNIQUES, PLAN ET PROCEDURES DE COLLECTE ET TRAITEMENT DE DONNEES	65
3.9.1 Définition de la population et de l'échantillon	65

3.9.2 Techniques de collecte de données	66
3.9.3 Plan de collecte de données	67
3.9.4 Traitement, analyse, sécurisation et interprétation des données	68
3.10 RESUME DE LA METHODOLOGIE	70
CHAPITRE 4 PRÉSENTATION ET DISCUSSION DES RÉSULTATS	71
4.1 INTRODUCTION	71
4.2 PRESENTATION DES PARTICIPANTS.....	72
4.3 PRESENTATION DES RESULTATS	76
4.3.1 Outils et solutions technologiques	77
4.3.2 Méthodologies en gestion de projet	89
4.3.3 Performance des projets	102
4.3.4 Liens avec les propositions du cadre conceptuel	111
4.4 DISCUSSION DES RESULTATS.....	120
4.4.1 Mise en évidence des similarités et divergences dans les données.....	121
4.4.4 Mise en relation des résultats avec la littérature existante	125
4.4.5 Analyse des résultats à la lumière des objectifs de recherche et du cadre théorique.....	126
4.4.6 Recommandations	129
4.4.7 Limites.....	131
4.4.8 Pistes de recherche futures	132
4.4.9 Diffusion des résultats	132
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	133
ANNEXE I.....	135
ANNEXE II	139
ANNEXE III	143
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	145

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 - Technologies utilisées par les leaders du domaine de l'A&D (2023).....	11
Tableau 2 - Présentation des objectifs et questions de recherche	16
Tableau 3 - Liste non exhaustive des ERPs utilisés dans l'industrie aéronautique et aérospatiale	22
Tableau 4 - Liste des 7 principales technologies de fabrication additive.....	26
Tableau 5 - Répartition des profits des opérateurs de transports aériens dans le monde.	55
Tableau 6 - Résumé des questions de recherche, propositions et variables	58
Tableau 7 - Vue d'ensemble de la méthodologie	70
Tableau 8 - Données statistiques des participants à l'étude	73
Tableau 9 - Autres statistiques de la population	74
Tableau 10 - Cadre de codification et nombres de référence par sous-thèmes.....	76
Tableau 11 - Liste des ERP utilisés dans les organisations	80
Tableau 12 - Liste de solutions d'ingénierie numériques	81
Tableau 13 - Liste des IA observées	82
Tableau 14 - Indicateurs lors des activités de suivi.....	91
Tableau 15 - Différences culturelles impactant la performance des projets.....	105
Tableau 16 - Autres exemples d'indicateurs utilisés par les équipes projets	110
Tableau 17 - Études de la revue de littérature, en lien avec les résultats de la recherche.....	125

LISTE DES FIGURES

Figure 1 - Dépense en Millions de dollars pour la production de véhicule pour l'aérospatiale dans les pays du G7 et de l'Organisation de coopération et de développement économique (OCDE).	1
Figure 2 - Indice de maturité de l'implémentation de solutions technologiques à travers la chaîne de valeur aéronautique pour l'année 2021 (en %)..	2
Figure 3 - Technologies qui offrent de fort potentiel pour augmenter la valeur future.	4
Figure 4 - Les technologies utilisées dans l'industrie de l'A&D 4.0.	5
Figure 5 - Carte des différentes études citées dans l'introduction.....	8
Figure 6 - Budget d'investissement en R&D (2022).	10
Figure 7 - Liste non-exhaustive des technologies disponibles en fonction des phases du projet.....	12
Figure 8 - Cadre conceptuel préliminaire.....	14
Figure 9 - Diagramme de Venn.....	15
Figure 10 - Illustration des jumeaux numériques intégrés à un modèle de conception d'aéronefs.	25
Figure 11 - Pilote d'essai utilisant la technologie RV/AR pour une simulation en vol du F-35.....	27
Figure 12 - Illustration d'une analyse CFD utilisée par la NASA.....	28
Figure 13 - Phases typiques d'un projet aérospatial et son cycle de vie.....	33
Figure 14 - Illustration de la norme DO-178C.....	35
Figure 15 - Illustration du modèle en V.	38
Figure 16 - Classification des risques.....	42
Figure 17 - Définition de la signification des indicateurs de performance	47
Figure 18 - Illustration de la méthode Prince2, en lien avec la performance.	50

Figure 19 - Revenu du secteur de l’A&D de 2019 à 2023 (en Million de \$ US). 54

Figure 20 - Cadre conceptuel final..... 59

Figure 21 - *Research onion*..... 61

Figure 22 - Logiciels utilisés par les entreprises pour gérer les projets 78

Figure 23 - Lien entre les différents outils technologiques 84

Figure 24 - *M14 Milestone Concept*..... 95

Figure 25 - *System Engineering Process* 98

Figure 26 - Concept de TRL utilisé par l'ESA..... 100

Figure 27 - Combinaison d’outils et de méthodologies favorisant l’amélioration de la
performance des projets..... 118

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

A&D : Aerospace and Defense

AESA : Agence Européenne de Sécurité Aérienne

AM : Additive Manufacturing

CAO : Conception Assistée par Ordinateur

CDR : Critical Design Review

CPI : Cost Performance Index

DAO : Dessin Assisté par Ordinateur

DMAIC : Define, Measure, Analyze, Improve, and Control

ERP : Enterprise Resource Planning

ESA : European Space Agency

EVM : Earned Value Management

FAA : Federal Aviation Administration

IA : Intelligence Artificielle

IT : Information Technology

KPI : Key Performance Indicator

NASA : National Aeronautics and Space Administration

PDR : Preliminary Design Review

PLM : Product Lifecycle Management

PMBOK : Project Management Body of Knowledge

PMI : Project Management Institute

PMP : Project Management Professionnal

PMO : Project Management Office

R&D : Recherche et Développement

SPI : Schedule Performance Index

TIC : Technologies de l'Information et de la Communication

TRL : Technology Readiness Level

UQAR : Université du Québec à Rimouski

VR : Virtual Reality

CHAPITRE 1

PARTIE INTRODUCTIVE

1.1 CONVERSATION

L'industrie aéronautique est au cœur des réalisations d'ingénierie les plus abouties et les plus avancées que l'Homme ait été en mesure de concevoir. Les prouesses techniques qu'il a fallu maîtriser pour rendre possibles les voyages dans l'air et l'espace sont probablement les plus complexes de l'histoire de l'Humanité. Les barrières physiques et technologiques ont été franchies et ont permis à une industrie de pointe de prospérer. À l'aube du XXIème siècle, la croissance du secteur est en plein essor. La Figure 1 ci-dessous détaille la tendance lors du passage à l'an 2000. On remarque que les pays du G7 (Allemagne, Canada, États-Unis, France, Italie, Japon et Royaume-Uni) totalisent la majorité des dépenses et que la croissance s'accélère rapidement.

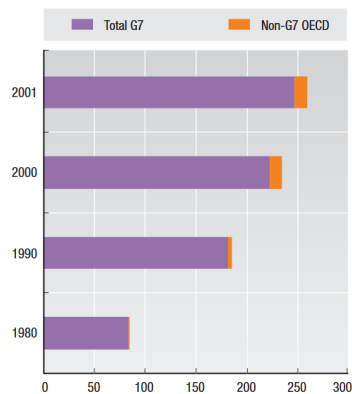


Figure 1 - Dépense en Millions de dollars pour la production de véhicule pour l'aérospatiale dans les pays du G7 et de l'Organisation de coopération et de développement économique (OCDE). Tiré de *THE SPACE ECONOMY AT A GLANCE* – © OCDE 2007. Reproduit avec permission.

De plus, depuis l'essor du numérique au début des années 2000, les solutions technologiques permettent aux organisations de faire des gains importants dans les processus quotidiens. Du point de vue des manufacturiers du secteur aéronautique et aérospatial, ce constat est encore plus vrai. En effet, ils sont les premiers utilisateurs des concepts d'efficacité opérationnelle liés au numérique et sont à l'avant-garde des évolutions technologiques, dans certains cas même, les instigateurs (Attaran, 2020).

Le passage au numérique a déjà entraîné des répercussions considérables sur de nombreux secteurs, remettant profondément en question les modèles d'entreprises existants. À titre d'exemple, en moins de 15 ans, SpaceX, créé par l'entrepreneur Elon Musk, est devenu un leader du lancement de satellites commerciaux. En se concentrant sur la simplicité, la fiabilité et la modularité, à l'instar de l'industrie du logiciel, SpaceX a prouvé qu'elle pouvait changer la donne dans l'industrie spatiale (Dupont, 2017).

En tant que secteur, l'industrie de l'aérospatial et de la défense (A&D) en est aux premiers stades de l'exploitation de la valeur du numérique dans tous les éléments de la chaîne opérationnelle (Doucette, 2021), comme le démontre la Figure 2 :

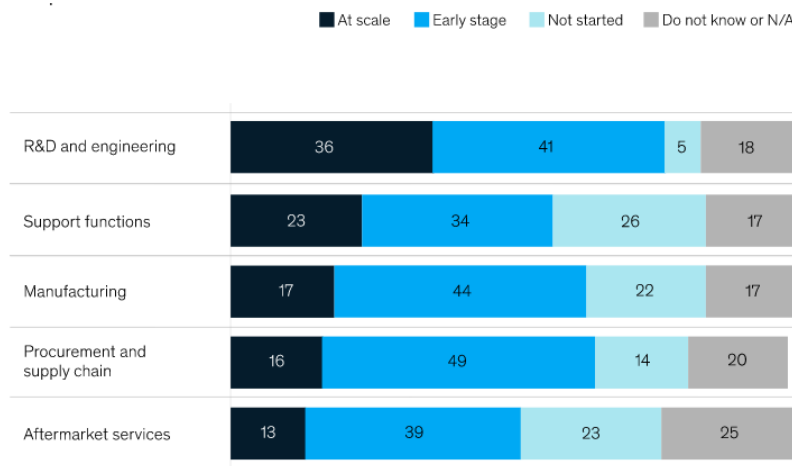


Figure 2 - Indice de maturité de l'implémentation de solutions technologiques à travers la chaîne de valeur aéronautique pour l'année 2021 (en %). Tiré de *Digital : The next horizon for global aerospace and defense* - © McKinsey 2021. <https://www.mckinsey.com/industries/aerospace-and-defense/our-insights/digital-the-next-horizon-for-global-aerospace-and-defense/>. Reproduit avec permission.

On remarque ici que le secteur de la R&D et de l'ingénierie est en avance sur les autres départements (support, approvisionnement, fabrication) quant à l'utilisation des outils numériques et technologiques.

Également, selon l'étude Global Resilience (Deloitte, 2021), aujourd'hui, 66 % des dirigeants interrogés dans les secteurs de la fabrication, des produits industriels et de la construction estiment que les changements massifs, tels que le COVID-19, seront désormais une expérience occasionnelle ou régulière, ce qui suggère que les organisations doivent être préparées à faire preuve d'agilité et de résilience continuellement à l'avenir.

Appliquées plus particulièrement aux processus de gestion des entreprises manufacturières, les solutions technologiques peuvent ainsi apporter un avantage concurrentiel pour réaliser les projets qui bâtiront sa pérennité.

L'intégration de technologies comme modèle de gestion peut amener des défis et des enjeux. En effet, les organisations en général sont enclines à utiliser de nombreux outils pour optimiser leur performance, sans vraiment mesurer le lien avec les facteurs clés de succès (Jiang & Liu, 2015).

Également, le secteur du manufacturier aéronautique et aérospatial est soumis aux limites qui freinent actuellement le déploiement à grande échelle. Le bassin de main-d'œuvre compétent (les talents digitaux) ne suffit pas aux besoins des compagnies (Athanasakopoulos, 2021).

Les coûts d'implantation et l'évolution rapide des performances en empêchent certains d'investir. Les failles de cybersécurité aggravent les conséquences d'une implantation inadéquate et peuvent créer des conséquences graves sur la compétitivité des sociétés où la concurrence technologique est une variable de réussite (Loukaka & S. M. Rahman, 2017).

1.2 PERSPECTIVES ET DEBATS

Les techniques maîtrisées telles que l'automatisation et la collecte de données via des objets connectés (IoT) participent grandement à la réussite de projets d'envergure. Également, les technologies plus récentes sont considérées par les équipes pour ajouter de la valeur à leur réalisation. Pour référence, à la Figure 3, on peut citer l'intelligence artificielle, la réalité augmentée ou l'utilisation de techniques de fabrication additive plastique ou métal (Schlotterbeck, 2021).

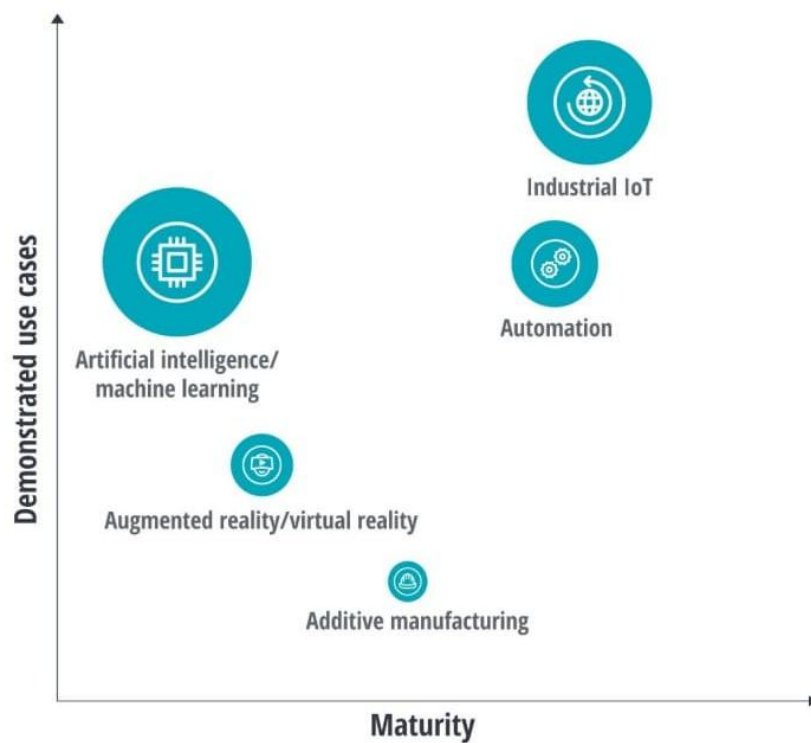


Figure 3 - Technologies qui offrent de fort potentiel pour augmenter la valeur future. Tiré de *Using the Network Effect* - © Deloitte 2021. <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/industry/aerospace-defense/advanced-manufacturing-aerospace.html>. Reproduit avec permission.

L'intégration de ces différentes technologies dans un système complet est théorisée autour du concept d'*Advanced Manufacturing Technology* (AMT) et fait partie intégrante de la structure organisationnelle des manufacturiers du secteur de l'A&D (Wellener, 2020). Ce concept est illustré dans la Figure 4 ci-dessous :

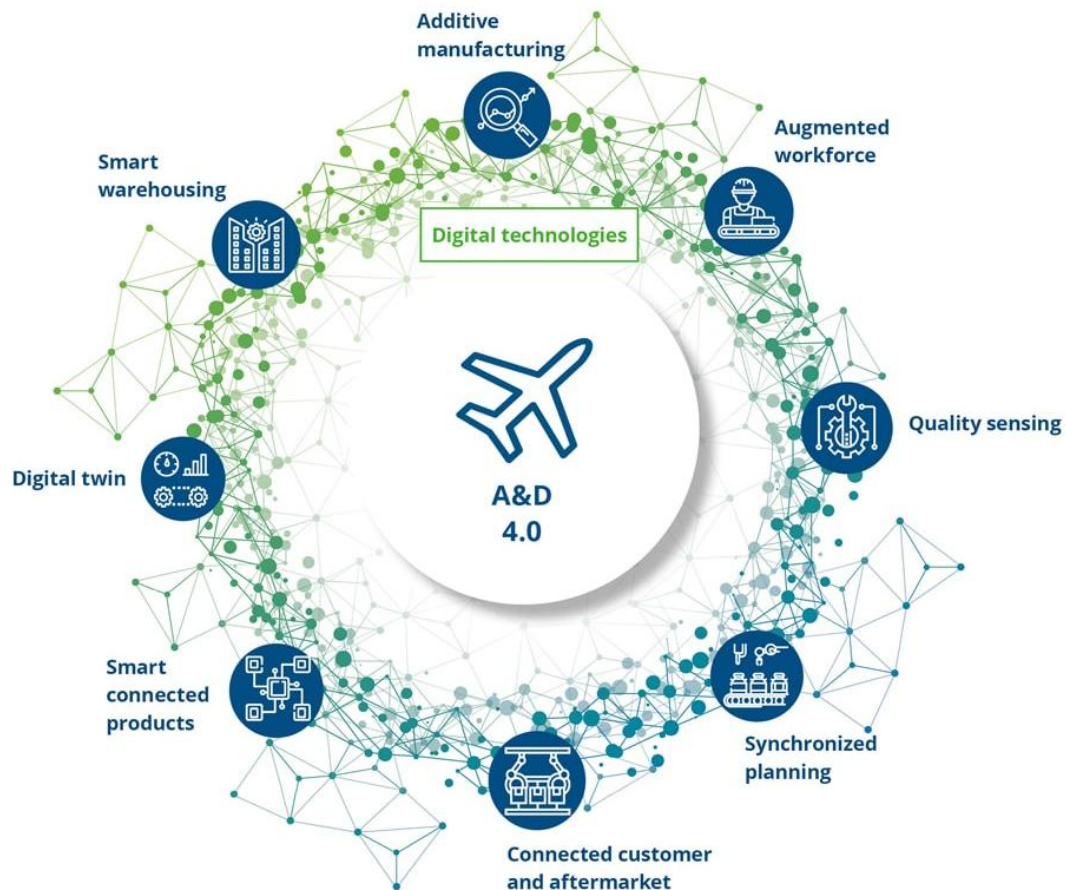


Figure 4 - Les technologies utilisées dans l'industrie de l'A&D 4.0. Tiré de *Aerospace and defense ecosystem playbook* - © Deloitte 2020.

<https://www2.deloitte.com/us/en/pages/manufacturing/articles/aerospace-defense-ecosystem-approach.html>. Reproduit avec permission.

Cependant, selon cette même étude menée par Deloitte (Wellener, 2020) certains éléments sont à considérer pour réussir le passage à l'échelle, et profiter des gains visés par l'implantation d'une ou plusieurs technologies digitales :

- La stratégie : plus de la moitié des entreprises d'A&D ont une vision claire et audacieuse de la manière dont le numérique va transformer leur activité. Cependant, ces structures ont du mal à relier leur vision à des analyses de rentabilité concrètes, à l'affectation des ressources et à la gestion des performances.
- La culture Agile : La mise en place d'une méthodologie et d'une culture de livraison agile est essentielle à la maturité numérique d'une entreprise. Néanmoins, l'adaptation d'un modèle agile peut sembler étrangère à une industrie dans laquelle le développement de produits prend des années et les cycles de vie durent des dizaines d'années. L'accent sera mis sur l'amélioration de la collaboration interfonctionnelle et sur la rapidité d'exécution.
- La gestion des données : Les entreprises d'A&D ne sont pas étrangères aux données. Cependant, seulement 28 % d'entre elles ont déclaré avoir une vision ou une stratégie pour l'utilisation des données qui s'alignent sur les objectifs de l'entreprise. En outre, les données, bien que conservées en toute sécurité, ne sont pas faciles à utiliser : seuls 22% des entreprises d'A&D ont déclaré disposer de données propres et structurées, stockées dans un référentiel central et prêtes à être analysées.
- Intégration et passage à l'échelle : Les entreprises qui tentent d'étendre l'adoption du numérique se heurtent généralement à trois faux pas. D'une part, elles s'attaquent à trop de domaines pour être réalisables et cohérentes. D'autre part, elles se concentrent essentiellement à démontrer l'impact opérationnel. Enfin, elles n'impliquent pas le personnel de première ligne dans l'élaboration des solutions.

Du côté des modèles de gestion de projet, on observe que le modèle Agile est privilégié dans le secteur de l'A&D, ainsi que dans le secteur de l'aéronautique commercial (Vanderleest & Buter, 2009). Les pratiques Agile qui ont émergées du monde de l'informatique offrent un large éventail de techniques, méthodologies et processus qui favorisent le développement de produit dans un contexte de haute complexité (Huang et al., 2012).

Particulièrement dans les missions d'exploration spatiale, ou de conception d'aéronefs à destination du transport de passagers, il y a peu de marge de manœuvre et un défaut de conception peut être fatal. Également, les échéanciers sont peu malléables et les coûts de conception doivent être maîtrisés.

Dans ce paradoxe, Carpenter et Dagnino (2014) explore la performance du modèle Agile et identifie les pratiques qui sont adaptées et compatibles avec un projet d'ingénierie aérospatiale. Il indique par ailleurs que certaines pratiques doivent être délaissées au profit de modèles hybrides, permettant la combinaison de techniques, en fonction de la tâche ou de la phase du projet. Également, il met en avant la possibilité d'utiliser des méthodologies basées sur l'alliance de la technologie et la méthodologie, tel que SCRUM ou *Extreme Programming* (XP). De plus, Anatolyevich et al. (2021) confirme que le modèle Agile doit être adapté aux contraintes spécifiques au domaine, afin d'augmenter les performances du projet et contenir les risques de failles. En effet, étant donné que les pratiques Agile sont basées sur des approches collaboratives, la gestion des risques reliés à la sécurité, la confidentialité et aux cyberattaques doit être adaptée.

L'implantation d'une méthodologie n'est en rien une garantie de succès. Peu importe le modèle, la capacité d'une organisation à intégrer une nouvelle approche en management de projet est une condition indispensable à sa pérennité. Shi (2011) explore les enjeux des entreprises à réussir l'intégration d'une gouvernance en gestion de projet à travers une approche nommée *Value Adding Path Map* (VAPM). Elle en conclut que l'effort doit être concentré sur la synchronisation entre les concepts théoriques (intégrées en premier) et leur utilisation concrètes via les outils pratiques (intégrées plus tard).

Le lien est établi que les pratiques en gestion de projet sont influencées par l'utilisation des technologies récentes. Selon Vieira et Romero-Torres (2016), ce changement requiert une transformation profonde du modèle économique de l'entreprise, affectant soit les activités principales, soit les activités de soutien.

Dans la pratique courante, l'utilisation d'outils informatique, pour la planification ou le suivi des tâches par exemple, change l'approche et demande aux équipes d'être en mesure de s'adapter à la nouvelle structure. Brandao et Wynn (2009) documente également le rôle des systèmes d'informations et de communications dans le développement de produit appliqué au secteur de l'aérospatiale.

Néanmoins, l'évolution rapide des technologies, plus particulièrement l'IA, et les nouveaux enjeux du domaine, par exemple le développement du lancement spatial abordable ou les nouvelles conceptions d'avions moins polluants, ouvrent la voie à de nouveaux défis.

La Figure 5 ci-dessous compile les différentes études, articles et résumés de conférence cités dans l'introduction, et les relations bibliométriques (mots-clés et sujet) qui les unissent :

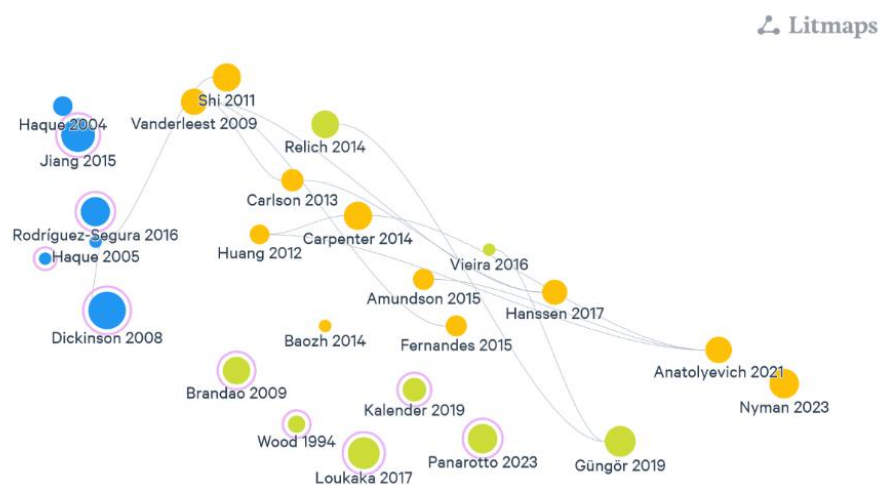


Figure 5 - Carte des différentes études citées dans l'introduction. Figure générée par l'auteur du mémoire, Florent NOGUEIRA, en août 2024, à l'aide de la plateforme Web Litmaps.
<https://app.litmaps.com/>

Les mots-clés et concepts utilisés pour réaliser la Figure 5 sont : méthodologie en gestion de projet, technologie et performance.

Dans ces études, on peut identifier un courant de pensée (rond en orange dans la Figure 5) autour d'auteurs intéressés à la méthodologie applicable à des projets d'ingénierie dans le domaine de l'A&D.

En effet, Carpenter et Dagnino (2014) examine si le modèle Agile peut être utilisé et observe que dans un contexte critique, la diffusion de pratiques non traditionnelles peut augmenter les risques d'échec majeur. Parallèlement, Anatolyevich et al. (2021) met en avant le besoin des organisations à améliorer l'efficacité de la gestion de projet de l'industrie aérospatiale. Baozh (2014) fait le lien entre projets aérospatiaux et projet de haute technologie. Ici, l'exploitation de données, l'utilisation de technologie avancée et de procédé complexe augmente l'incertitude dans la réalisation des objectifs.

L'aspect technologique (rond en vert dans la Figure 5) est également abordé par Relich et Muszyński (2014), qui étudie l'impact des systèmes intelligents dans la planification de projet de développement de produit. Ici, le changement récurrent force les organisations à utiliser des technologies rapides et efficaces pour faire face à l'échéancier. Les outils récents, tels que l'impression 3D, sont étudiés par Vieira et Romero-Torres (2016), qui démontrent comment cette technologie transforme l'industrie en réduisant les erreurs, les reprises et les dépassements de coût et de délai.

Du point de vue de la performance (rond en bleu dans la Figure 5), Rodriguez-Segura et al. (2016) détermine que la méthodologie et la qualité de gestionnaire de projet est un des critères les plus déterminant dans le succès d'un projet dans le domaine de l'A&D. Haque et James-Moore (2005) démontre que l'utilisation du Lean dans l'introduction de nouveaux produits améliore les indicateurs de performance et aide les gestionnaires de projets à atteindre les objectifs corporatifs. Briard et al. (2020) étudie la performance de projets de développement de produit et identifie que les qualités interpersonnelles des gestionnaires, telles que la communication, l'expertise, l'excellence et la synergie d'équipe restent des critères de réussite à ne pas négliger, et ce, malgré l'utilisation de technologies de pointe.

1.3 PROBLEMATIQUE SPECIFIQUE

Les différentes nouvelles technologies précédemment détaillées et illustrées dans la Figure 4 sont adaptées aux besoins des entreprises manufacturières qui œuvrent dans le domaine du développement de produit. Également, certaines de ces entreprises possèdent des budgets d'investissement en R&D important qui permettent l'intégration de nouveaux concepts technologiques, comme le montre la Figure 6 ci-dessous :

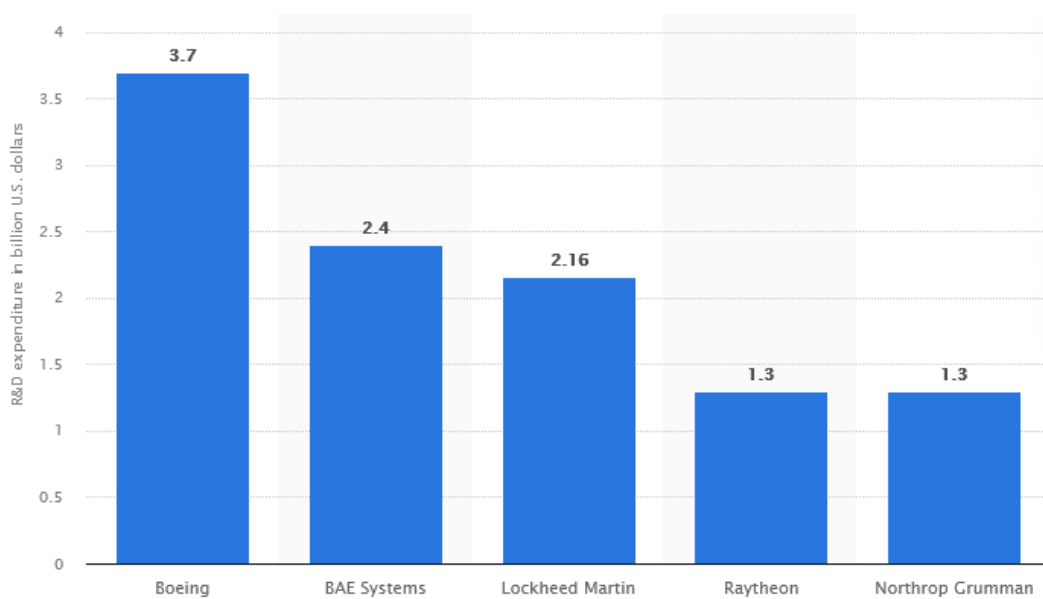


Figure 6 - Budget d'investissement en R&D (2022). Tiré de *Aerospace and defense companies with the highest spending on R&D 2022* - © Statista 2022.
<https://www.statista.com/statistics/1102967/global-research-and-development-top-aerospace-defense-spenders/>

Le Tableau 1 ci-dessous regroupe les principales organisations dans le domaine de l’A&D et des exemples de pratiques innovantes ou de nouvelles technologies utilisés dans l’exécution de leurs projets :

Tableau 1 - Technologies utilisées par les leaders du domaine de l'A&D (2023). Les sites webs des compagnies Lockheed Martin, Raytheon Technologies, Boeing, Northrop Grumman, Airbus Defence & Space, SpaceX, Virgin Galactic et BAE ont été consultés.

Compagnie leader en 2023	Domaine d’activités	Exemple d’utilisation de nouvelle technologie dans le développement de projet de conception / ingénierie
Lockheed Martin	Sécurité, aéronautique militaire, aérospatiale, défense, système technologique de pointe	Implantation d’un cadre de gestion de projet intelligent, technologie de fabrication de pointe, usine numérique, outil de simulation, etc.
Raytheon Technologies	Aérospatiale, défense	Utilisation de l’intelligence artificielle, machine Learning, ingénierie numérique basée sur des modèles prédictifs, etc.
Boeing	Aéronautique civil, militaire, aérospatiale, défense	Intégration de Smart Factory, développement logiciel, système de qualité intégré, impression 3D, etc.
Northrop Grumman	Aérospatiale, aéronautique, défense et cyberspace	Utilisation d’écosystème digital intégré, utilisation de data, utilisation de simulation en clone digital, etc.
Airbus Space & Defense	Aviation militaire, aérospatiale (lanceur), satellites, armement	Industrie 4.0, Intelligence artificielle, analyse avancée de donnée, utilisation d’outils de design digitaux, utilisation d’informatique quantique, etc.
SpaceX	Aérospatiale (lanceur), satellites, véhicules spatiaux	Approche disruptive en gestion de projet, utilisation d’outil technologique de pointe, compétence des gestionnaires en informatique avancée, utilisation d’IA pour la gestion des risques, etc.
Virgin Galactic	Aérospatiale commercial	Approche de développement basée sur l’utilisateur, utilisation de concept simulé en 3D, etc.
BAE Systems	Aérospatiale, défense,	Utilisation de modèle prédictif, utilisation massive de données, gestion collaborative (Agile), etc.

À l'instar des solutions potentielles listées dans la Figure 7 ci-dessous, la multitude des options conduisent à complexifier le choix, l'intégration et l'utilisation efficace de ces outils (Michael et al., 1994).

	Development activities	Serial production			Aftermarket and Operations
Potential solutions	Realistic human ergonomic analysis	Self-reconfiguring machines	Logistics automation 4.0	Modularized production	Remote monitoring
	Enhanced collaborative environments	Smart storage bin	Autonomous vehicles	Interactive robotics	Predictive maintenance
	Simulative design/ CAD+	Intelligent rush/new order management	Cobotics	Flexibility/ mass customization	Advanced analytics
	Virtual prototyping and testing	Customer triggered lot-size 1 production	Demand driven provision of material and tools	Predictive quality/ Enhanced Throughput	Shared data services
	Simulation of first flight/ certification	Centralized machinery planning	Self-learning robots	Unitary, RFID-based parts tracking	On demand spare parts production
Cross-functional base technologies	Virtual process optimization			Self-diagnosing machines	
	Virtual work preparation			Mobile device based machine control	
	Augmented Reality				
	Self-optimizing system				
	Smart handbooks and process documentation				
	Additive Manufacturing				

Figure 7 - Liste non-exhaustive des technologies disponibles en fonction des phases du projet. Tiré de *Digitization and Industry 4.0 in Aerospace and Defense: boosting the transformation* - © AIAC 2017. https://aiac.ca/blog_posts/digitization-industry-4-0-aerospace-defense-boosting-transformation/#_ftnref1. Reproduit avec permission.

En outre, la maturité dans la gestion opérationnelle varie selon les compagnies. On a cité plus haut l'exemple de la capacité de SpaceX à réaliser un projet que de nombreuses entités n'ont pas réussi à mener, malgré des moyens technologiques et humains bien plus importants. On peut alors remettre en question le lien entre l'utilisation de solutions digitales et la réussite du projet. En effet, la structure de gestion de projet des compagnies historiques (Boeing, Airbus, Lockheed Martin, etc.) est à l'opposé des méthodes Agiles utilisées par les compagnies émergentes telle que SpaceX, Astranis ou DroneUp (Ansar, 2022).

Ainsi, malgré une culture organisationnelle forte, un historique de projet réalisé au cours du XXème siècle et la mise à disposition de technologies efficaces et accessibles, une proportion importante de projets ne parviennent pas à rencontrer les critères de performance attendus par les promoteurs. Rodríguez-Segura et al. (2016) démontre qu'à travers 29 projets d'ingénierie complexe dans le secteur de l'A&D, il est possible d'identifier 5 facteurs critiques de succès : le management de projet, les outils (incluant la technologie), les procédures, l'implication de l'utilisateur final et l'environnement extérieur.

Il met en évidence le lien entre gestion de projet et proximité avec l'utilisateur final comme une condition indispensable au succès.

Michael et al. (1994) développe aussi l'importance de bien sélectionner le type de technologie applicable à l'environnement, et qui peut apporter de la valeur ajoutée. Il montre que faire le mauvais choix peut impacter négativement les performances du projet et des gestionnaires de projet eux-mêmes.

Également, Briard et al. (2020) discute des particularités du domaine de l'A&D et met en avant le fait que les cycles de vies sont courts et les risques élevés, dû à l'importante complexité des activités. Il indique que malgré le fait que le domaine soit mature en termes de technologies, l'ampleur des objectifs et des mandats ajoute des contraintes qui ne sont pas atténuables avec des outils numériques. De plus, l'utilisation de méthodologie efficace, tel que démontré par Nyman et Öörni (2023), peut-être une variable déterminante dans le succès d'un projet. Toutefois, on peut se demander si les systèmes technologiques sont associés à la performance et si la méthodologie utilisée a un impact sur les objectifs attendus.

Dans cette optique, la rareté des travaux recensés dans la littérature susceptible d'apporter une réponse à ces questions justifie la pertinence d'entreprendre cette recherche afin de contribuer à combler cette lacune.

Problématique spécifique :

En fonction de ce qui précède, il paraît important et pertinent d'analyser comment l'implantation de technologies et de la méthodologie dans la réalisation de projets d'ingénierie complexes dans le domaine de l'aéronautique (civil et défense) et de l'aérospatiale sont associés aux indicateurs de performance de ces mêmes projets.

La Figure 8 ci-dessous illustre le cadre conceptuel préliminaire et les facteurs clés de l'étude.

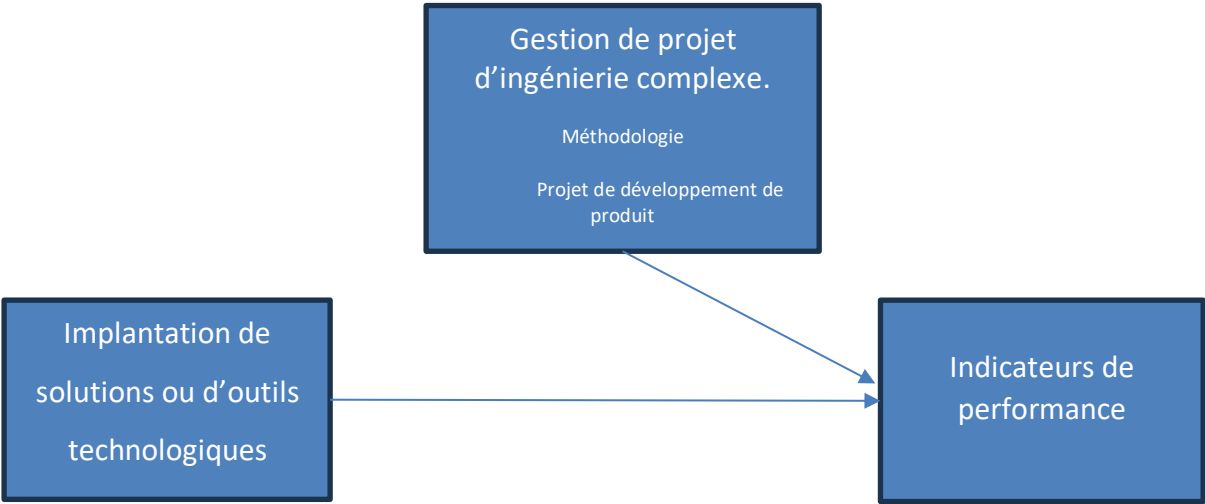


Figure 8 - Cadre conceptuel préliminaire

1.4 LOCALISATION DE LA RECHERCHE

Dans l'optique d'étudier le lien entre les différents domaines touchés par l'étude, la Figure 9 ci-dessous illustre de quelle manière ils sont reliés et précise ainsi le champ de la recherche. Ces domaines d'étude sont les outils technologiques, la méthodologie en gestion de projet et la gestion des indicateurs de performance des projets.

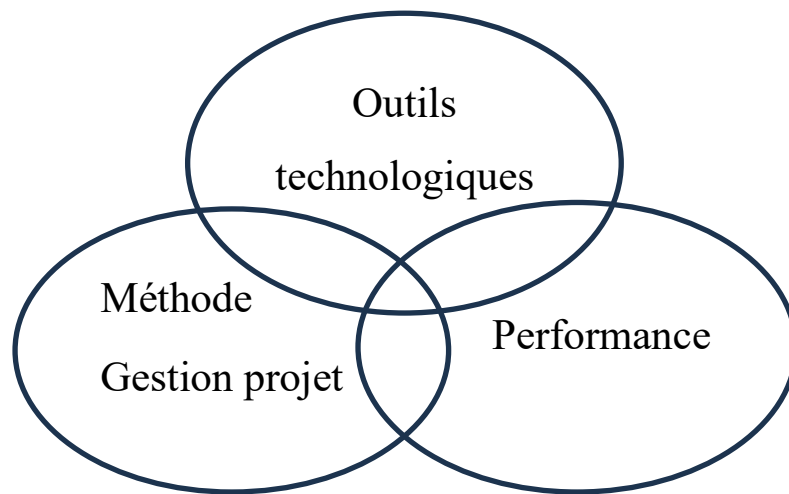


Figure 9 - Diagramme de Venn

L'analyse pour cette recherche se focalise sur l'ensemble des technologies numériques et/ou digitales, qui ont un lien dans le développement de projet d'ingénierie. En particulier, le focus sera porté sur des projets de conception, de recherche et développement (R&D) et de développement de produit.

L'ensemble de ces notions et concepts sera étudié, le but étant de comprendre les relations entre les différents facteurs tels que présentés dans le cadre conceptuel préliminaire.

La contribution attendue est d'identifier une tendance, qui pourrait esquisser une combinaison de bonnes pratiques permettant l'atteinte d'objectifs ambitieux, dans un contexte de réalisation de projets complexes. Au-delà du domaine de l'A&D qui est mis en avant dans ce mémoire, les notions développées pourraient être transférables dans d'autres domaines connexes.

1.5 OBJECTIFS DE LA RECHERCHE ET QUESTIONS DE RECHERCHE

Tableau 2 - Présentation des objectifs et questions de recherche

Objectifs	Questions de recherche
Identifier et définir les facteurs	
Solutions et outils technologiques	
Méthodologie en gestion de projet	
Projet d'ingénierie complexe	
Indicateur de performance	
Analyser et comprendre l'interactions entre les différents facteurs	
P1 Techno > Performance	QR1 Comment l'utilisation et l'implémentation d'outils et de solutions technologiques contribue à l'évolution des indicateurs de performance des projets ?
P2 Méthodologie + Ingénierie > Performance	QR2 Comment la méthodologie en gestion de projet d'ingénierie complexe peut être associé à l'atteinte des objectifs de performance ?

1.6 PERIMETRE DE LA RECHERCHE

L'étude se concentre sur l'industrie de l'aéronautique et de l'aérospatiale. De nombreuses données proviennent de sources de l'industrie de la défense, qui sont bien souvent intégrées à ce domaine. Dans certains contextes, il sera possible d'inclure des références à ce domaine spécifique.

La collecte de données couvrira le secteur privé et public, et portera principalement sur l'étude des organisations et des pratiques entourant la conception (R&D) et la fabrication d'aéronefs ou de pièces entrant dans la liste d'assemblage de ceux-ci.

Dans le but de garder un périmètre restreint, l'étude couvrira les projets à but commerciaux et exclura les concepts ou projets à but non lucratifs. L'idée de conduire cette recherche est de comprendre le lien concret entre les technologies et le succès.

Le secteur manufacturier sera privilégié dans le but de couvrir les particularités d'une organisation verticale. Ainsi, les bureaux d'études, les consultants ou les spécialistes ne seront pas couverts.

CHAPITRE 2

REVUE DE LITTÉRATURE

Dans la poursuite de cette étude, la revue de la littérature identifie et clarifie les facteurs et concepts essentiels mis en avant par la recherche. La compréhension de ces éléments permet de les relier entre eux et de formuler des propositions. Ces propositions répondent aux questions de recherche posées et conduisent à la proposition d'un cadre conceptuel final.

2.1 SOLUTIONS ET OUTILS TECHNOLOGIQUES

Depuis l'émergence de la révolution numérique, et la diffusion de masse des avancées technologiques dans les organisations, la technologie est devenue un domaine de compétence indispensable pour exécuter les tâches quotidiennes (Linden et al., 2011).

La transformation numérique des entreprises s'est accélérée dans le but de maintenir leur compétitivité sur leurs marchés. Engager ce virage technologique est inévitable pour rester performant, quel que soit le secteur d'activité.

Aujourd'hui, avec l'avènement des technologies cognitives, la conception du travail et de la performance est profondément bouleversée. Les avantages de ces technologies se manifestent désormais de manière plus tangible, notamment en matière d'augmentation de la productivité et de stimulation de la créativité (Schwartz, 2015).

Alors que le secteur de l'aéronautique et de l'aérospatiale évolue progressivement, les outils et solutions technologiques jouent un rôle déterminant dans l'efficacité, l'inventivité et la réussite globale de tout projet de conception.

Pour limiter les solutions technologiques pertinentes pour étayer cette étude, nous nous concentrerons à la revue de trois solutions ou outils technologiques en particulier :

- Les technologies d'information et de communication (TIC)
- Les solutions numériques d'ingénierie
- L'intelligence artificielle (IA)

2.1.1 Technologies de l'information et de la communication

Les travaux d'ingénierie, notamment dans les domaines de l'aéronautique et de l'aérospatiale, ont connu une transformation grâce à l'utilisation des technologies de l'information et de la communication (TIC). Ces ensembles d'outils et de ressources technologiques permettant de transmettre, enregistrer, créer, partager ou échanger des informations, notamment les ordinateurs, l'internet (sites Web, blogues et messagerie électronique), les technologies et appareils de diffusion en direct (radio, télévision et diffusion sur l'internet) et en différé (podcast, lecteurs audio et vidéo et supports d'enregistrement) et la téléphonie (fixe ou mobile, satellite, visioconférence, etc.). (Définition de l'UNESCO, Institut de statistique¹).

Ces systèmes permettent également de connecter les différents membres d'une équipe qui se trouvent à des endroits différents pour permettre l'échange et la mise en commun d'informations. Le secteur aérospatial utilise des systèmes de planification des ressources de l'entreprise (ERP) pour gérer des projets d'ingénierie complexes (Sharma & Gupta, 2014).

¹ Site web de l'UNESCO : <https://uis.unesco.org/fr/glossary-term/technologies-de-linformation-et-de-la-communication-tic?wbdisable=true>

Par conséquent, ces systèmes intègrent plusieurs fonctions commerciales dans un seul système intégré, notamment la gestion de projet, la gestion de la chaîne d'approvisionnement et la gestion financière, entre autres (Betia et al., 2023). Par exemple, Boeing a utilisé le système ERP de SAP pour rationaliser et centraliser ses activités, dans le but d'optimiser le contrôle des stocks et réduire les délais d'exécution.

Les ERP sont le cœur de la structure informatique qu'utilisent les compagnies pour s'organiser au quotidien. Les acteurs majeurs de cette industrie sont détaillés dans le Tableau 3 ci-dessous :

Tableau 3 - Liste non exhaustive des ERPs utilisés dans l'industrie aéronautique et aérospatiale. Les sites webs des compagnies d'Infor, Epicor, IFS, Microsoft Dynamics, SAP, Oracle, RootStock et DelmiaWorks ont été consultés.

Nom et description du ERP
<u><i>Infor CloudSuite LN</i></u> Logiciel tout-en-un, orienté pour les manufacturiers, et comportant des outils intégrés de gestion de projet, de qualité et d'analyse de données.
<u><i>Epicor Kinetic</i></u> Solution possédant une adaptabilité complète au secteur de l'A&D (certification, norme, fabrication, planification, stratégie LEAN, etc.)
<u><i>IFS</i></u> Logiciel de gestion unique, regroupant les besoins des organisations en gestion des achats, de la production, de qualité, etc.
<u><i>Microsoft Dynamics 365</i></u> Solution proposée par Microsoft, basée sur l'environnement Windows. Intégration de l'application TEAMS pour une gestion collaborative des projets.
<u><i>SAP S/4 HANA</i></u> C'est la version de SAP pour les grandes entreprises, qui comprend le plus d'outils, incluant des outils marketing et des modules de gestion avancés.
<u><i>Oracle Cloud ERP</i></u> Oracle ERP Cloud gère les fonctions de l'entreprise, notamment la comptabilité, la gestion financière, la gestion de projet et l'approvisionnement.
<u><i>Sage X3</i></u> Orienté vers les petites et moyennes entreprises, spécialisé en manufacturier, il permet aussi d'intégrer des modules externes.
<u><i>Rootstock</i></u> Plus accessible que les autres joueurs du marché, cet ERP est adapté pour le monde du manufacturier et offre des solutions technologiques de pointe.
<u><i>IOMS/DELMIAWorks</i></u> Une solution basée sur l'architecture de la suite de conception de Dassault Systems. Couplé à Solidworks, c'est un ERP intégré pour les équipes de design mécaniques, électroniques ou électriques.

Le *cloud computing* (prestation de services informatiques hébergés sur Internet) offre une infrastructure capable de collaborer en temps réel entre les équipes de projet tout en stockant d'énormes volumes de données brutes produits par les projets aérospatiaux (Attaran, 2020). Par exemple, Airbus utilise la technologie cloud pour gérer sa chaîne d'approvisionnement mondiale et nouer des partenariats avec d'autres entreprises à l'échelle mondiale (Attaran, 2020). Cela a considérablement augmenté la capacité de l'entreprise à coordonner des projets complexes sur de nombreux sites. Lockheed Martin, de son côté, utilise des plateformes collaboratives avancées pour gérer son programme d'avions de combat F-35 Lightning, ce qui favorise une coordination efficace entre les centaines de parties prenantes, intervenants, consultants et sous-traitants (Charles Pickar, 2021).

L'utilisation des TIC dans les projets aérospatiaux a eu un impact positif considérable sur l'efficacité et la productivité (Sharma & Gupta, 2014). Cependant, elle n'est pas sans poser de problèmes.

La sécurité des données sensibles de conception et d'exploitation est devenue un défi majeur à mesure que les projets continuent de s'intégrer numériquement. Les fournisseurs se sont ainsi adaptés et offrent maintenant des solutions de cybersécurité qui ont été créées spécifiquement pour répondre aux exigences uniques de l'industrie aéronautique et aérospatiale.

Également, l'implantation de ces solutions informatiques a un taux d'échec élevé, ce qui rend les organisations dépendantes d'un intégrateur de qualité et d'équipes de maintenance performantes. Selon le Standish Group International, 90% des projets d'implantation d'ERP sont en retard, par rapport à l'échéancier initial. Une étude portant sur 7400 projets d'implantations a montré qu'à la fin du projet, 34 % des projets étaient en retard, 31 % étaient abandonnés, modifiés ou redimensionnés, et 24% seulement ont été menés à bien dans les limites du budget initialement prévu (*Chaos Report*, 2015).

2.1.2 Solutions d'ingénierie numérique

Les solutions d'ingénierie numérique ont radicalement transformé la conception, les tests et la fabrication de systèmes permettant l'activité aéronautique (aviation civile et militaire) et l'exploration aérospatiale. Ces outils permettent aux ingénieurs de générer des prototypes virtuels, limiter les risques de défaillances et optimiser les conceptions avant même de construire le prototype.

L'ingénierie numérique consiste à utiliser des technologies de pointe pour recueillir des données et élaborer des conceptions dans un environnement digitalisé. Cette approche permet aux ingénieurs de tester des options et de concevoir des solutions dans un espace virtuel, sans avoir recours à des prototypes physiques. En outre, l'ingénierie numérique facilite une collaboration accrue entre les membres de l'équipe et avec les clients.

Les ingénieurs aéronautiques peuvent alors générer des modèles 3D détaillés de composants et de systèmes d'aéronefs à l'aide de logiciels de conception assistés par ordinateur (CAO) et d'ingénierie assistée par ordinateur (IAO). Ces outils aident les équipes de conception à comprendre, dès le début du processus de développement, des éléments tels que l'intégrité structurelle ou l'aérodynamique, entre autres aspects critiques. Par exemple, la plateforme de Dassault Systèmes est largement utilisée par l'industrie aérospatiale pour la conception et la simulation intégrées (Suydam & Pyles, 2020).

Également, la technologie des jumeaux numériques est de plus en plus considérée comme un outil indispensable dans l'ingénierie aérospatiale (Panarotto et al., 2023).

En effet, les jumeaux numériques sont des répliques virtuelles de produits ou de systèmes physiques qui peuvent être utilisées pour simuler les performances, prédire les problèmes et optimiser les actions préventives. Dans l'industrie aéronautique, les jumeaux numériques sont utilisés tout au long du cycle de vie du produit, de la conception et de la fabrication, à la maintenance et aux opérations.

GE Aviation utilise par exemple cette technologie pour surveiller et analyser les performances de ces moteurs d'avion (Li et al., 2022). Grâce à cette méthode de collecte, d'analyse et de compilation de données, le temps nécessaire pour couvrir les potentiels risques de défauts a diminué drastiquement.

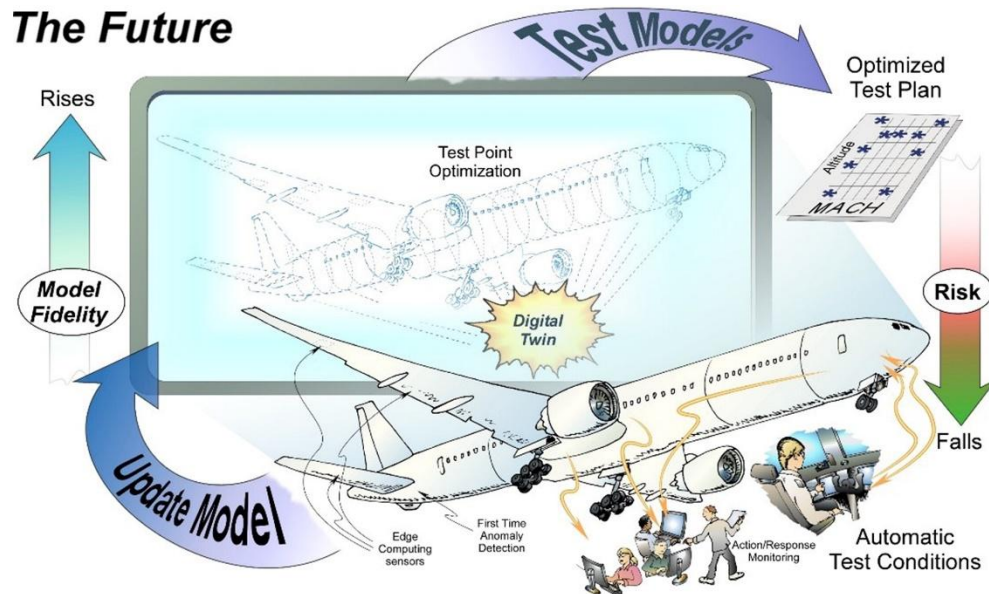


Figure 10 - Illustration des jumeaux numériques intégrés à un modèle de conception d'aéronefs. Steven L. Brunton et al., *Data-Driven Aerospace Engineering: Reframing the Industry with Machine Learning* - © AIAAJ, 2021. <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/1.J060131>. Reproduit avec permission.

La Figure 10 illustre la boucle de rétroaction qui permet aux équipes de conception d'exploiter les résultats des tests et des simulations pour affiner le modèle et réduire les risques. Concrètement, plutôt que de mobiliser des ressources physiques pour valider la fiabilité des conceptions, le jumeau numérique réalise les essais. En ajustant les conditions pour reproduire fidèlement l'environnement réel, il devient ainsi possible de confirmer ou d'infirmer une hypothèse tout en multipliant les scénarios d'analyse.

La fabrication additive (AM), communément appelée impression 3D, a également ouvert de nouvelles possibilités en matière de conception et de production de composants dans le secteur aérospatial (Vieira & Romero-Torres, 2016).

Cette technologie permet de créer des pièces en utilisant l'ajout et la superposition de matière. Contrairement à l'usinage traditionnel, ou le moulage, cette technologie nécessite peu de matière première et des machines-outils abordables et peu encombrantes. Avec l'apparition des imprimantes 3D métal, les ingénieurs peuvent également créer des géométries de pièces qui étaient autrefois impensables en raison de problèmes de coût ou de faisabilité avec les méthodes conventionnelles (Najmon et al., 2019).

Il existe plusieurs types de technologies pour fabriquer une pièce en fabrication additive. Le Tableau 4 ci-dessous regroupe les 7 principales options :

Tableau 4 - Liste des 7 principales technologies de fabrication additive. Informations compilées par Rebecca Linke, et illustré sur le site web du *MIT Management School*, 2017.
<https://mitsloan.mit.edu/ideas-made-to-matter/additive-manufacturing-explained>

Sigle	Signification	Description
BJT	Binder Jetting	La BJT est un processus dans lequel un agent de liaison liquide est déposé de manière sélective pour assembler des matériaux en poudre.
DED	Directed Energy Deposit	Le DED permet de fusionner des matériaux (généralement des métaux) en les faisant fondre au moment où ils sont déposés.
MEX/FDM	Material Extrusion Fused Deposition Modelling	C'est un processus dans lequel le matériau est distribué de manière sélective à travers une buse ou un orifice.
MJT	Material Jetting	Le MJT est un procédé dans lequel des gouttelettes de matière première sont déposées de manière sélective.
PBF	Powder Bed Fusion	Le PBF est un processus dans lequel l'énergie thermique fusionne sélectivement des zones d'un lit de poudre.
SHL	Sheet Lamination	Le SHL est un processus dans lequel des feuilles de matériau sont collées pour former une pièce.
VPP	Vat Photopolymerization	La VPP est un procédé dans lequel un photopolymère liquide placé dans une cuve est sélectivement durci par polymérisation activée par la lumière.

Vieira et Romero-Torres (2016) démontre également que l'utilisation de ces techniques de fabrication additive modifie la gestion de projet d'ingénierie en éliminant les limites physiques de fabrication et d'assemblage, en améliorant la conception des produits et en réduisant les délais de développement, de production et de maintenance des aéronefs.

Les technologies de réalité virtuelle et augmentée (RV/AR) sont de plus en plus utilisées dans l'ingénierie aérospatiale pour visualiser les conceptions, planifier les processus d'assemblage, ou établir un plan de formation. La RV permet aux ingénieurs d'interagir avec des prototypes virtuels et simuler les étapes d'assemblage avant le début de la production en série (Wirth et al., 2020).

Lors du développement du projet F-35 Lightning, Lockheed Martin démontre avoir réalisé des gains significatifs grâce à cette technologie. Par exemple, la phase de conception de l'avion de combat a été significativement réduite, tandis que la durée de planification de l'assemblage a été optimisée de trois semaines à deux jours (Wirth et al., 2020).



Figure 11 - Pilote d'essai utilisant la technologie RV/AR pour une simulation en vol du F-35. Image sous Licence CC.

L'analyse de la dynamique des fluides (CFD) et l'analyse par éléments finis (FEA) sont devenues des outils essentiels dans la conception aérospatiale. L'astronautique et l'aéronautique peuvent désormais être simulées, et leur fonctionnement dans différentes conditions peut être prédit et amélioré, évitant ainsi le recours à des modèles physiques et à des tests coûteux (Wirth et al., 2020).

Dans ses conceptions de véhicules spatiaux, tels que le Space Launch System, la NASA a largement utilisé la simulation CFD, comme l'illustre la Figure 12 ci-dessous :

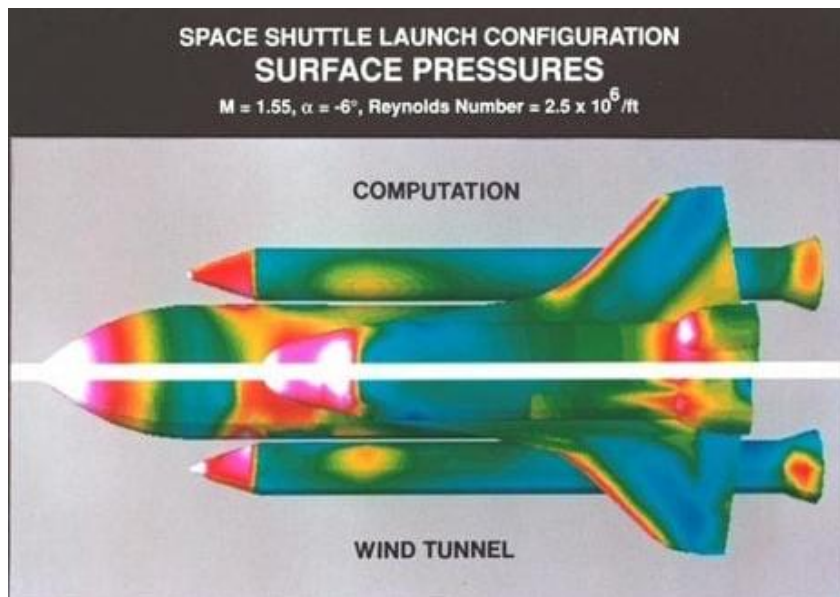


Figure 12 - Illustration d'une analyse CFD utilisée par la NASA. Image sous Licence CC.

Les produits complexes à longue durée de vie, courants dans l'industrie aéronautique et aérospatiale, ont nécessité l'utilisation de systèmes de gestion du cycle de vie des produits (PLM). Ces systèmes fournissent des données de base uniques et des informations sur les produits à chaque étape, de la conception à la mise hors service (Cantamessa et al., 2012). Par exemple, Airbus utilise des systèmes PLM pour gérer les volumes de données générés pendant le cycle de vie de ses avions, garantissant ainsi la cohérence et la traçabilité pour les utilisateurs, autant pendant la conception, la fabrication ou la maintenance des aéronefs (Cantamessa et al., 2012).

2.1.3 Intelligence Artificielle (IA)

Plusieurs domaines de l'ingénierie et de la fabrication manufacturière connaissent des transformations disruptives grâce à l'intelligence artificielle (IA), notamment l'optimisation de la conception, la maintenance prédictive, et les systèmes autonomes. Afin d'optimiser la conception des avions à l'aide d'une grande quantité de données issues de la simulation, couplés à une analyse des performances du monde réel, des algorithmes d'apprentissage automatique sont aujourd'hui utilisés à grande échelle.

L'utilisation de l'intelligence artificielle dans le domaine de l'ingénierie se sépare en quatre sous-sections (Yüksel et al., 2023) :

- La maintenance prédictive
- L'optimisation de design
- La fonctionnalité des systèmes autonomes
- L'automation des tâches (incluant la robotique)

Ces algorithmes peuvent rapidement analyser de nombreuses variantes de conception et mettre en avant les meilleures solutions, même si naturellement, l'humain ne les aurait pas forcément pris en compte. Actuellement, pour la construction des composants des avions, Airbus utilise des outils de conception générative développés à l'aide de l'IA, ce qui se traduit par une efficacité accrue et des économies de carburants, et donc des performances améliorées (Saadi & Yang, 2023).

Les applications de traitement du langage naturel (NLP) ont gagné en popularité dans le domaine des projets d'ingénierie aérospatiale, améliorant la capacité à gérer les exigences complexes des projets. Ces solutions, qui utilisent l'intelligence artificielle, peuvent analyser et classer un grand volume de documents de nature technique afin que les chefs de projets soient en mesure d'évaluer la conformité réglementaire et d'identifier les conflits ou les incohérences dans les différentes exigences du projet (Rose et al., 2020).

Dans ce contexte, Boeing a adopté des approches de traitement du langage naturel (NLP), à travers l'outil BLUE, pour gérer l'évolution des exigences, ce qui permet de diminuer les erreurs de projet tout en augmentant la productivité et la qualité des résultats (Clark & Harrison, 2008).

Dans le domaine de la fabrication aéronautique, le contrôle qualité au cours des processus de production a évolué, et l'intégration d'unités de vision par ordinateur, couplée à l'intelligence artificielle, a entraîné d'autres transformations. Ces systèmes surpassent l'œil humain et sont conçus pour localiser les déviations du processus de fabrication avec une très grande répétabilité. Par exemple, Rolls-Royce a pu accélérer ce processus de fabrication en série de ces moteurs en utilisant des systèmes d'inspection visuelle alimentés par l'IA, ce qui augmente les taux de détection des défauts et réduit les temps d'inspection (Govindarajan, 2024).

Pour de nombreuses entreprises aéronautiques, la pratique courante de maintenance et d'entretien est en train d'être transformée par l'intégration de la maintenance prédictive pilotée par des algorithmes d'IA. En utilisant les paramètres obtenus par les différents capteurs placés dans l'aéronef, ainsi que les données des dossiers de maintenance internes, ces systèmes peuvent prévoir la probabilité de défaillance d'une pièce en particulier. Cette approche de maintenance prédictive aide les compagnies aériennes et les entreprises du secteur de l'A&D à mieux planifier leurs programmes de maintenance, à réduire les temps d'arrêt et à améliorer la fiabilité de la flotte.

On peut citer la plateforme AVIATAR², gérée par Lufthansa Technik, qui utilise des algorithmes d'IA pour organiser la gestion interactive de la maintenance d'une flotte commerciale.

Le développement d'avions et de drones autonomes dépend aussi fortement de l'IA.

² AVIATAR, Digital solutions focus on the entire value chain, from predictive maintenance to automated fulfillment. <https://www.aviatar.com/en>

L'utilisation d'algorithmes d'apprentissage automatique permet la création de systèmes de contrôle sophistiqués capables de naviguer dans des environnements complexes et de prendre des décisions en temps réel (Govindarajan, 2024).

Par exemple, la NASA adoptera l'IA pour la navigation et la prise de décision autonome dans un environnement inconnu grâce à sa mission DragonFly vers Titan, la lune de Saturne (Anderson, 2020).

L'IA est utilisée pour optimiser les itinéraires de vol, prévoir les encombrements, les alléger et améliorer le fonctionnement global du système dans la gestion du trafic aérien (Rose et al., 2020). Le programme SESAR³, qui comprend le projet de recherche du ciel unique européen, vise à utiliser l'IA afin d'améliorer la gestion des flux du trafic aérien dans l'espace européen.

2.2 METHODOLOGIE EN GESTION DE PROJET

La méthodologie en gestion de projet désigne l'ensemble des principes, processus, outils et techniques utilisés pour planifier, organiser, exécuter et évaluer un projet. Elle fournit un cadre structuré permettant d'assurer la clarté des objectifs, la coordination des équipes et l'efficacité des ressources. En adoptant une méthodologie adaptée, les organisations peuvent anticiper les risques, respecter les délais, maîtriser les budgets et garantir la qualité des livrables, tel qu'illustrée dans le PMBOK 6^{ème} édition (PMI, 2017).

Les principales méthodologies utilisées par les organisations sont détaillées dans les sous-sections suivantes.

³ SESAR, Delivering the digital European Sky. <https://www.sesarju.eu/ai>

2.2.1 Gestion de projet traditionnelle (dans le secteur aérospatial)

Depuis des décennies, le modèle classique de gestion de projet, également appelé modèle en cascade, est très présent dans l'industrie aéronautique et aérospatiale. À l'instar des projets d'ampleur, comparable à des projets du domaine de la construction, des hautes technologies ou de l'infrastructure publique, le modèle traditionnel offre une structure fiable qui a fait ses preuves (PMI, 2017).

Cette approche suit la définition de base de la gestion de projet dans son format linéaire et incrémental. Elle comprend un certain nombre de phases, composant le cycle de vie du projet, principalement le lancement, la planification, l'exécution, le suivi et la clôture (Khayyat, 2022). En raison du risque entourant la conception et la fabrication d'aéronefs civils ou militaires, cette stratégie méthodique est préférée dans le domaine de la construction aéronautique et aérospatiale.

La méthodologie traditionnelle est également adaptée lorsque les projets sont intégrés à des programmes ou sont considérés comme des projets de grande ampleur (Altfeld, 1991).

La gestion de projets aérospatiaux classiques présente quelques caractéristiques notables. Tout d'abord, les variables de bases sont documentées avec précision et doivent être en lien avec des données d'entrées claires, des études de marché et des analyses de faisabilité réaliste. Ainsi, la portée du projet, le budget et l'échéancier sont clairement définis. La gestion du changement, en particulier dans la phase de conception, est primordiale, car tout changement qui surviendra dans la dernière partie du processus de développement risque d'être très coûteux et engendre d'importants retards (Altfeld, 1991).

Dans le cas de la conception du 787 de Boeing, il fut nécessaire d'analyser et de planifier tous les détails pertinents de la nouvelle structure, de l'aérodynamique aux dispositifs électromagnétiques (Tang et al., 2015).

Nguyen (2000) illustre la complexité du cycle de vie des projets aérospatiaux dans la Figure 13 ci-dessous :

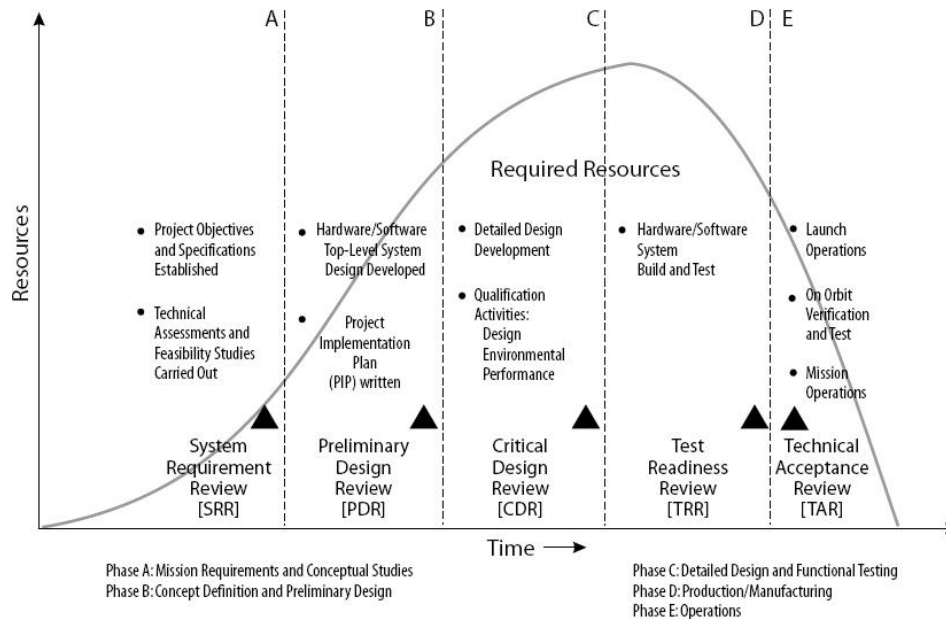


Figure 13 - Phases typiques d'un projet aérospatial et son cycle de vie. Tiré de *Effective space project management* - © PMI 2020. <https://www.pmi.org/learning/library/effective-space-project-management-560>. Reproduit avec permission.

Les principales caractéristiques des pratiques classiques de gestion de projets comprennent la création de périmètres détaillés, l'absence de redondances et l'intégration de techniques de documentation exhaustives et précises.

La documentation relative à la conformité, à la sécurité, aux normes et à la traçabilité des processus, permet aux organismes comme l'Agence européenne de la sécurité aérienne (AESA) et la Federal Aviation Administration (FAA), de certifier les aéronefs en vue de leur commercialisation. La rigueur de la méthodologie traditionnelle offre une structure adéquate pour gérer cette étape cruciale (Cardoso et al., 2022).

Également, du point de vue de la gestion des risques, la gestion de projet dans le domaine aéronautique et aérospatial est une compétence critique qui permet aux constructeurs de conduire une rigoureuse identification, analyse et implantation de stratégies diverses, afin de minimiser les impacts de ces risques (Manuela & Ilinca, 2018).

De son côté, la NASA a par exemple suivi le même chemin avec ses programmes spatiaux en intégrant des procédures de gestion de risques, autant dans la phase de développement que dans la phase d'exécution (Sapountzoglou, 2023).

2.2.2 Méthodologie Agile

En raison des limites du modèle traditionnel, la plupart des entreprises aérospatiales ont commencé à mettre en œuvre de nouvelles méthodologies, communément appelées méthodes Agiles. Ces techniques ont d'abord été développées dans le domaine du développement logiciel, en soulignant la nécessité d'un repositionnement, d'une approche plus proche des livrables et des parties prenantes (Ozdenizci Kose, 2021).

Pour l'industrie aérospatiale, l'adoption de la gestion de projet Agile répond à un changement majeur apporté à la vision des équipes projets : réduire les délais, rendre l'approche plus flexible, en particulier dans le but de soutenir les stratégies commerciales des entreprises du secteur.

La méthodologie Agile est introduite en 2001 par un groupe de 17 ingénieurs, regroupés dans l'Alliance Agile. Ils regroupent leur pensée autour du manifeste Agile (Beck, 2001) qui se concentre autour de quatre axes :

- Les individus et les interactions, plutôt que les processus et les outils
- Un logiciel fonctionnel, plutôt qu'une documentation complète
- La collaboration avec les clients, plutôt que la négociation de contrats
- Répondre au changement, plutôt que suivre un plan.

Les méthodes agiles utilisées dans l'aérospatiale reposent sur certains principes fondamentaux. Le développement itératif et incrémental constitue, en premier lieu, le cœur du processus Agile. Vanderleest et Buter (2009) explorent la transition du modèle en cascade vers la méthodologie Agile et démontrent que l'approche est efficace dans un environnement de conception et de développement logiciel.

De son côté, Hanssen et al. (2017) suggèrent que l'adoption des méthodes agiles favorise la livraison régulière de logiciels opérationnels et accroît la réactivité face aux changements, contribuant ainsi à minimiser les risques de dépassement de budget et de délai.

En particulier dans le développement logiciel, bien adapté à l'Agile, la méthode SCRUM permet également de construire un *framework* capable de rencontrer les exigences particulières liées au secteur. En effet, dans l'aviation commerciale, les logiciels doivent répondre à des exigences de qualité particulières, appelées norme DO-178C.

Fernandes et França (2015) démontrent que la méthodologie Agile, couplée au SCRUM, permet aux équipes de conception d'optimiser leurs processus de travail et orienter les résultats pour garantir une qualité permettant de qualifier aux exigences de la norme DO-178C, illustrée dans la Figure 14 ci-dessous :

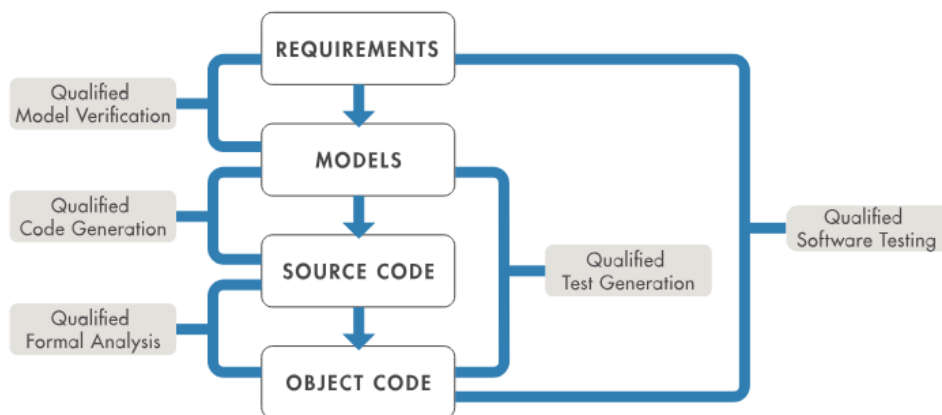


Figure 14 - Illustration de la norme DO-178C. Licence CC.

Une autre particularité de la méthodologie SCRUM est liée au découpage des projets. En effet, à l'inverse du modèle en cascade, SCRUM divise le projet en tâches plus petites et plus faciles à terminer rapidement. Le *Sprint*, habituellement d'une durée de 2 à 4 semaines, regroupe toutes ces petites tâches ensemble et permet à terme de livrer des sous-sections. Ce processus facilite les mises à jour sur l'avancement, les changements du cahier des charges et permet l'optimisation des ressources ainsi que la détection rapide des problématiques.

Bart (2024) explore par exemple comment SpaceX a complété le développement du lanceur Falcon9. Il révèle comment les équipes de conception ont mis l'accent sur le prototypage rapide, la conception itérative, la collaboration interfonctionnelle et la gestion quotidienne du changement.

D'autre part, l'engagement constant des parties prenantes est également une caractéristique importante de la méthodologie Agile. Ce principe garantit que les besoins et les attentes de l'utilisateur seront satisfaits tout au long du cycle de vie du projet. Dans le cadre d'un projet complexe, au sein du domaine de l'aéronautique et de l'aérospatiale, les parties prenantes sont nombreuses et incluent non seulement les utilisateurs finaux, mais aussi les autorités de contrôle, les sous-traitants et les entités gouvernementales.

La planification est également une caractéristique fondamentale d'Agile. Ozdenizci Kose (2021) rappelle que cette méthodologie permet de réduire la rigidité dans les structures de gestion et offre plus de flexibilité dans l'organisation du périmètre du projet.

D'un autre côté, certaines études remettent en question la pertinence du modèle Agile pour des projets hautement risqués. Carpenter et Dagnino (2014) explorent les enjeux autour de la sécurité, de la gestion du risque ou des fonctionnalités, et concluent qu'une approche hybride peut contrebalancer, dans certains cas, une méthodologie trop permissive.

Dans le même sens, Anatolyevich et al. (2021) suggère que, malgré le fait que les pratiques Agiles soient totalement compatibles avec un projet complexe à haut risque, un modèle hybride combinant l'approche traditionnelle et itérative doit être considéré.

2.2.3 Modèles alternatifs

Plusieurs modèles alternatifs de gestion de projets, qui intègrent à la fois des approches traditionnelles (modèle en cascade) et Agile, ont fait leur apparition. Ces modèles hybrides tentent de concilier le besoin de planification et documentation en amont, généralement déterminé par les données complexes du projet, et la flexibilité dans la réalisation et l'exécution, grâce aux méthodes Agiles. La gestion de projet hybride associe des méthodes prédictives et adaptatives, au sein d'un modèle de gestion intégrée (Parvez Alam & Toppur, 2019).

Parmi ces modèles, Garzaniti et al. (2019) mettent en avant une combinaison d'Agile et de modèles en cascade. Les itérations Agiles sont insérées à plusieurs reprises dans des phases sélectionnées du cycle de vie du projet pour fournir un retour d'information rapide tout en conservant les points forts des méthodes traditionnelles (stabilité, planification rigoureuse). L'étude souligne que dans de nombreux projets de développement de produits complexes, l'utilisation exclusive d'une approche agnostique, qu'elle soit agile ou traditionnelle, peut ne pas être idéale. Une approche hybride permettrait de surmonter ces limitations en combinant les meilleurs éléments des deux.

Toujours dans le domaine du développement de produit, on peut également citer le modèle *Metagility* (Bishop, 2017). Il explore l'idée que, dans les environnements de développement de nouveaux produits (NPD), l'agilité traditionnelle (souvent associée aux méthodes agiles) n'est plus suffisante pour rester compétitif. Le cadre du modèle met l'accent sur la gestion adaptative, qui permet aux organisations de modifier leur niveau d'agilité en fonction du niveau d'innovation technologique et des conditions du marché.

La métaphore du vortex est utilisée, car les cercles intérieurs se déplacent plus rapidement que les cercles extérieurs. Le concept de vortex guide la taille des lots de travail et le calendrier de mise en œuvre des tâches, en priorisant les actions pour atteindre les objectifs du projet.

Un autre modèle influant, mis en avant dans la littérature et particulièrement utilisé dans le domaine aérospatial, est le *V-Model*, illustré dans la Figure 15. Il est souvent utilisé dans le développement logiciel ainsi que dans d'autres domaines nécessitant un haut niveau de contrôle et de validation, comme l'ingénierie, les systèmes embarqués, et les projets critiques (Anitha et al., 2013).

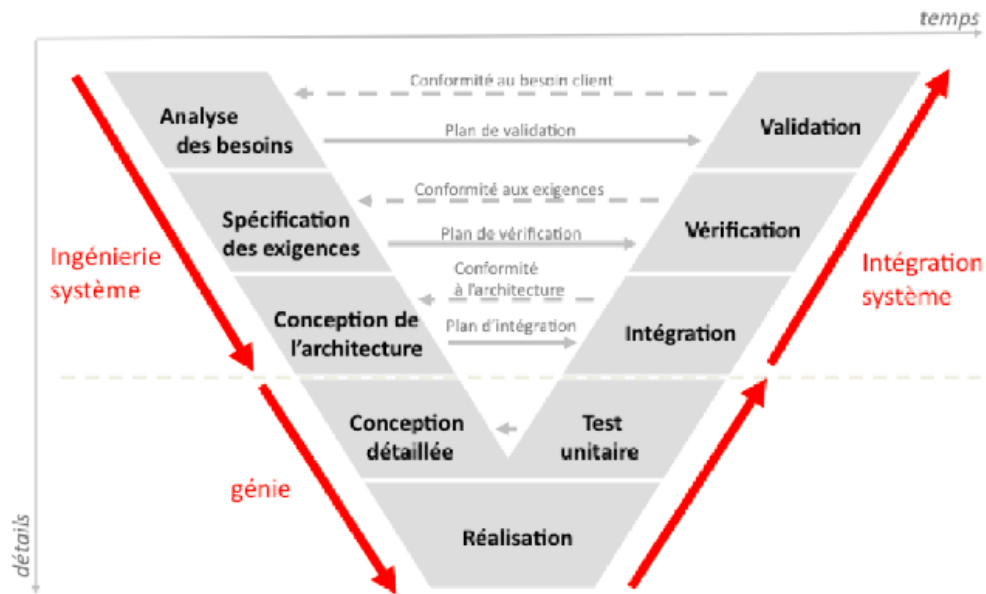


Figure 15 - Illustration du modèle en V. Tiré de *Modèle de conception à base de réseau de contradictions : Le cas de la conception des microsattellites au CNES* - Belleval, C & Filipas Deniaud, Ioana & Lerch, Christophe. (2010). https://www.researchgate.net/publication/228539191_MODELE_DE_CONCEPTION_A_BASE_DE_RESEAU_DE_CONTRADICTIONS_LE_CAS_DE_LA_CONCEPTION_DES_MICROSATELLITES_AU_CNES. Reproduit avec permission.

Le *V-Model* est une version modifiée du modèle en cascade, mettant davantage l'accent sur la validation et la vérification à chaque étape du cycle de développement. Il tire son nom de la forme en "V" qui le représente, symbolisant la correspondance entre les phases de spécification et de conception (situées sur la branche gauche du V) et les phases de test et de validation (sur la branche droite).

La gestion du risque est une compétence importante dans les projets d'ingénierie complexes, qui nécessitent une redondance des systèmes informatiques et des performances particulièrement fiables.

Geras et al. (2006) mettent en avant le modèle *Extended Risk Approach* qui combine les paramètres de la gestion du risque selon Boehm et Turner (2003) et les pratiques Agile spécifiques aux logiciels comme XP, par exemple.

Ils introduisent une approche basée sur les risques pour déterminer l'équilibre optimal entre agilité et planification. En combinant la réactivité des approches agiles avec la planification rigoureuse des méthodes traditionnelles, ces processus permettent une gestion plus complète et adaptable des risques tout au long du cycle de développement.

Dans une moindre mesure, on peut également citer plusieurs autres méthodologies hybrides, combinant des concepts Agile et des pratiques plus traditionnelles (Krupa & Hajek, 2022) :

- Xprince : une combinaison de XP et de la méthodologie Prince2
- IVP2 : une combinaison de Scrum, Kanban et une optimisation des jalons (appelée *Stage-Gate*)
- *Hybrid Process Mode* : un modèle orienté sur les processus qui comprend l'utilisation de pratiques Agile dans un environnement projets traditionnels.

2.3 PROJETS D'INGENIERIE COMPLEXES

Les projets d'ingénierie complexes concernent la conception, le développement, la mise en œuvre et la gestion de systèmes ou de produits comportant un haut niveau de complexité technologique, organisationnelle ou opérationnelle (Hass, 2008). Ces projets impliquent souvent des interdépendances multiples, des incertitudes élevées ou des besoins en ressources importants. On peut mettre en avant plusieurs particularités autour de ces projets, entre autres :

- Gestion d'équipes multi et interdisciplinaires
- Innovation technologique émergente
- Cahier des charges lourd et encadré par des normes et des standards imposants
- Risque d'échec élevé.

Néanmoins, dans certains domaines comme la construction, l'énergie, l'adaptation aux changements climatiques, ou l'exploration aérospatiale, ces projets de développement mènent bien souvent à une utilisation future dans le quotidien des populations à travers le monde (Lee & Trimi, 2018).

Les prochaines sections de la revue de littérature se concentrent plus en profondeur sur le développement de produits complexes, en particulier dans le domaine de l'aéronautique et de l'aérospatiale, et les singularités reliées à ce secteur atypique.

2.3.1 Développement de produits complexes

Newman (2011) indique qu'un système complexe est un système composé de nombreuses parties en interaction et qui présente un comportement collectif qui ne découle pas naturellement des comportements de chaque partie, pris individuellement.

Le développement de produits complexes est un processus qui, par définition, organise la conception d'un produit impliquant des centaines de parties prenantes, en interaction sociale, technique et organisationnelle ne permettant pas l'addition de l'ensemble des comportements individuels pour atteindre l'objectif final (Eppinger, 2002).

Bloebaum et McGowan (2010) expliquent que les processus sont tellement interdisciplinaires que l'imbrication des différentes tâches peut potentiellement aboutir à un résultat totalement irrationnel.

Les produits complexes sont généralement développés dans la sphère technique, principalement en aérospatiale, mais aussi dans le domaine de la santé, les appareils médicaux, l'architecture navale ou encore la construction (Bloebaum & McGowan, 2010).

D'un point de vue méthodologique, le développement de produits complexes s'appuie généralement sur une relation étroite entre l'ingénierie des systèmes, une méthodologie structurée (Agile ou Hybride) et une conception itérative par simulation (*Model-Based Systems Engineering, MBSE*). Le modèle en V et le Toyota Production Système, par exemple, sont généralement cités comme des méthodes de développement de produits complexes combinant ces différents aspects (Meluso et al., 2022).

Une autre caractéristique du développement de produits complexes est la forte dépendance à la gestion du changement. En effet, Nadia et al. (2006) met en avant la nécessité pour les organisations d'avoir une gestion des demandes de changement efficace, en particulier lors de la phase de mise en production. Elle suggère de regrouper les demandes ensemble, au lieu de les intégrer au fur et à mesure et ainsi, optimiser l'impact lors des revues de conception.

L'importance critique de la gestion du risque est également une particularité à prendre en considération tout au long du développement de produit. En effet, Chauhan et al. (2018) mettent en perspective que les initiatives de conception complexe sont rarement un succès, et peuvent consommer énormément de ressources pour finalement échouer.

L'utilisation adéquate des techniques d'identification, de classification et de mitigation des risques est alors indispensable, et ce, le plus tôt possible (Thamhain, 2013).

La Figure 16 ci-dessous illustre une méthode pour classer le risque selon 3 critères : le degré d'incertitude, la complexité et l'impact.

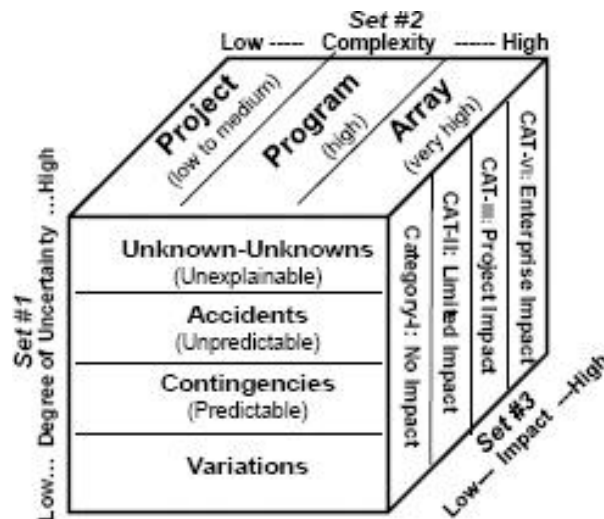


Figure 16 - Classification des risques. Tiré de *Managing risks in complex projects* - © PMI 2013.
<https://www.pmi.org/learning/library/managing-risks-complex-projects-5946>. Reproduit avec permission.

2.3.2 Le secteur de l'aéronautique et de l'aérospatial

En tant que secteur bien spécifique, le domaine de l'aéronautique et de l'aérospatiale possède des particularités, reliées principalement aux risques technologiques, à l'ampleur des ressources impliquées et aux différents impacts en cas d'échec.

Au cours de l'histoire, plusieurs projets de développement ont échoué, causant dans certains cas des pertes financières importantes ou pire, la perte de vies humaines (Findlay & Harrison, 2002). On peut citer les désastres de certaines missions Apollo, ceux des navettes spatiales américaines (Challenger et Columbia), les défauts liés à conception de l'*International Space Station* (ISS) ou lors du développement de l'avion XB-70 Valkyrie (Ryan, 1996). Du côté russe, européen ou chinois, on trouve également des projets qui ont échoué comme la fusée Vega-C, les débuts du véhicule Soyuz ou le lanceur Lijian 1 Y6.

Kazemzadeh et al. (2021) explique que l'incertitude et l'ambiguïté sont les principaux défis auxquels sont confrontées les organisations qui développent des produits complexes dans le domaine aérospatial. Les défis identifiés sont liés à une connaissance et une expérience limitée dans la reconnaissance des complexités croissantes des produits ainsi que dans la compréhension de l'interaction entre ces phénomènes.

De plus, le défi technique et technologique peut dans certains cas frôler les limites physiques connues. Dans le cas du lanceur Falcon de SpaceX, certains scientifiques étaient alors persuadés de l'impossibilité et l'inefficacité de la réutilisation de fusées (Dreyer, 2009).

Également, la gestion des changements d'ingénierie complexifie la conception itérative, qui, par nature, génère une multitude d'ajustements suite aux simulations, tests et prototypes. Ces changements apparaissent tout au long du cycle de vie du projet, mais tout particulièrement lors des premières fabrications et mises en fonction (Ahmed & Kanike, 2007).

Le développement de projets aérospatiaux s'inscrit dans le cadre d'un système de gestion de la qualité réglementé et extrêmement exigeant, visant non seulement à répondre aux exigences du cahier des charges, mais aussi les exigences implicites reliées aux différents risques (Manuela & Ilinca, 2018).

2.3.3 Contexte organisationnel spécifique

Le contexte organisationnel des entreprises aéronautiques et aérospatiales est influencé par le caractère multisectoriel de leurs activités et les particularités du secteur. Ces organisations doivent concilier le besoin de créativité, d'innovation avec les défis environnementaux, sécuritaires, d'approvisionnement et de conformité légale.

En raison de la complexité des projets et de l'expertise des équipes, de nombreuses entreprises utilisent des structures matricielles afin d'avoir des systèmes orientés projet et fonctionnel en même temps (Briard et al., 2020).

La nécessité de travailler en équipes intégrant plusieurs disciplines est une caractéristique propre à cette industrie, en lien avec le contexte organisationnel. Ainsi, les départements techniques doivent s'allier aux finances, au droit et au marketing pour mener à bien les activités du projet, et en synchronisant les tâches en fonction des jalons (Manuela & Ilinca, 2018).

Comme les produits aérospatiaux et aéronautiques continuent d'exister et d'être utilisés bien après la fin du projet, la gestion des connaissances devient essentielle pour les entreprises, qui doivent préserver l'intégrité de la documentation en vue des activités de maintenance et de retour d'expérience (Harvey & Holdsworth, 2005).

Également, la question environnementale devient une contrainte importante pour les entreprises du secteur. En effet, les différents accords internationaux imposent des défis majeurs en matière de réduction des émissions de gaz à effet de serre, en particulier pour les activités commerciales de masse. Gangi et al. (2021) démontrent que les principales organisations adaptent leur structure organisationnelle pour faire face aux nouvelles réalités réglementaires, sans perdre leur compétitivité et sans mettre en danger la rentabilité de leur modèle économique.

En raison du maillage et du lien étroit avec leurs sous-traitants et du caractère mondial des réseaux, les compagnies du domaine de l'A&D, de l'aérospatiale ou de l'aéronautique civile doivent également maintenir une gestion des approvisionnements efficaces. Couplées à une stratégie intelligente des risques, les structures doivent supporter une multitude de partenaires, sous-traitants et firmes d'ingénierie, qui font partie intégrante des parties prenantes (Bales et al., 2004). Les entreprises de ce secteur disposent généralement d'une gestion des risques distincte, ainsi que de processus de gestion intégrés à tous les niveaux de prise de décision.

Il convient de noter qu'une dimension importante de la culture des entreprises aérospatiales est la gestion de talents (Briard et al., 2020). S'agissant d'une industrie aussi spécialisée, l'acquisition et la rétention des talents sont très compétitives.

Un certain nombre d'entreprises ont également développé une offre variée en matière de formation et de développement de leur personnel, et cultivent des liens étroits avec des collèges/universités pour former une relève qualifiée.

Il existe des exemples tels que le programme universitaire de Northrop Grumman, les programmes de formations dédiés à Embry-Riddle (Daytona Beach) et au Massachusetts Institute of Technology (Boston) ou encore la plateforme *AirbusProtect*.

2.4 INDICATEUR DE PERFORMANCE

Les indicateurs de performance constituent un élément important dans le paysage complexe caractérisé par les projets d'ingénierie aéronautique et spatiale, qui visent à suivre et à rendre compte des progrès, à atteindre la qualité et la conformité, et à faciliter une gestion intégrée entre les différents acteurs et parties prenantes.

Cette section vise à clarifier la signification des différents termes, leurs limites et leurs liens avec les mesures de performance relatives aux projets réalisés, ainsi que les raisons de leur dépendance au contexte d'affaires, de concurrence et aux objectifs de rentabilité au sein du domaine aérospatial.

2.4.1 Notion de performance

Selon Pereira et Lima (2018), le suivi et le contrôle de l'avancement des activités d'un projet sont des processus essentiels pour les gestionnaires. Ils permettent d'identifier les obstacles susceptibles de freiner la progression du projet, en comparant l'état actuel à la planification initiale. Ces outils aident ainsi les gestionnaires à réajuster les activités pour qu'elles soient en adéquation avec le plan prévu, et ainsi, mettre en place des processus pour atteindre le niveau de performance visé (Blais & Agbodoh-Falschau, 2023).

Il n'existe pas de consensus sur la définition de la performance en gestion de projet. Le PMI (*Project Management Institute*) définit la performance autour d'indicateurs reliés aux coûts, à l'échéancier et à la qualité.

Il fournit un ensemble de processus décrits dans le PMBOK 6^{ème} édition (*Project Management Body of Knowledge*) qui aident les gestionnaires dans le suivi et l'analyse de ces indicateurs.

La Figure 17 ci-dessous illustre l'interprétation du CPI (*Cost Performance Index*) et du SPI (*Schedule Performance Index*).

CPI & SPI	SPI < 1	SPI = 0	SPI > 1
CPI < 1.0	Over Budget, Behind Schedule	Over Budget, On Schedule	Over Budget, Ahead of Schedule
CPI = 1.0	On Budget, Behind Schedule	On Budget, On Schedule	On Budget, Ahead of Schedule
CPI > 1.0	Under Budget, Behind Schedule	Under Budget, On Schedule	Under Budget, Ahead of Schedule

Figure 17 - Définition de la signification des indicateurs de performance. Tiré du PMBOK 6^{ème} édition.
© PMI 2017. Reproduit avec permission.

On parle alors d'indicateurs mesurant l'écart entre l'avancement du projet et la planification initiale. Des indicateurs performants indiquent alors que les gestionnaires maîtrisent l'ordonnancement des tâches, optimisent les processus d'achats et contrôlent la qualité des livrables (Krol et al., 2020). Néanmoins, d'autres indicateurs sont exclus de la notion de performance, comme : l'implication des parties prenantes, la cohérence du cahier des charges et des besoins des utilisateurs, ou encore l'impact du projet sur la population. On pourrait donc avoir un projet performant, mais qui est un échec du point de vue des conséquences sur l'environnement ou la fonctionnalité (Trinh & Feng, 2020).

Selon Kerzner (2011), avec la croissance des projets complexes, l'implication des parties prenantes et les progrès de la technologie visuelle, les mesures et les indicateurs clés de performance (ICP) sont des facteurs déterminants dans l'évaluation de la performance des projets. La notion d'ICP est mise en avant par l'IPMA (*International Project Management Association*) et couvre l'ensemble des indicateurs applicables à la gestion efficace d'un projet. Ces indicateurs englobent donc les indicateurs financiers, l'environnement humain, la stratégie marketing ou encore l'impact environnemental.

Atkinson (1999) souligne l'importance de distinguer deux grandes catégories d'indicateurs dans l'évaluation des projets.

D'une part, les indicateurs dits « durs » (*hard criteria*), qui sont mesurables à l'aide de valeurs objectives telles que les coûts, les délais, la portée ou la qualité. Ces critères permettent une évaluation précise et quantifiable de la performance opérationnelle du projet. D'autre part, il distingue les indicateurs « mous » (*soft criteria*), qui relèvent davantage d'appréciations qualitatives, comme la satisfaction des parties prenantes, les bénéfices organisationnels ou la contribution stratégique du projet. Ces dimensions, plus difficiles à quantifier, offrent toutefois une compréhension essentielle de la valeur globale et de la réussite perçue du projet.

Dans l'histoire, on observe plusieurs concepts reliés à la notion de performance en gestion de projet. Le plus connu est sans nul doute le concept du triangle de Barnes appelé aussi le triangle de fer ou la triple contrainte (Pollack et al., 2018). Ainsi, depuis les années 1970, la représentation du triangle de fer, articulé autour du temps, du coût et de la qualité, s'est imposée comme un modèle de référence pour évaluer la performance des projets. Ce concept illustre un triangle à trois sommets, où la performance résulte d'un équilibre entre ses trois côtés, chacun représentant l'une des contraintes du projet. Ainsi, on peut considérer qu'un projet est performant lorsque ces trois côtés sont en équilibre.

Toutefois, dès les années 1980-1990, la littérature en gestion de projet a progressivement élargi sa vision de la performance en intégrant des dimensions plus humaines et contextuelles, telles que la satisfaction des parties prenantes, la complexité et l'incertitude, tout en remettant en question la simplicité du modèle initial (Atkinson, 1999). À partir des années 2000, les recherches ont enrichi cette perspective en y ajoutant des notions de bénéfices organisationnels, de création de valeur, de satisfaction client et d'agilité, faisant du triangle de fer un outil toujours pertinent, mais désormais considéré comme partiel et applicable surtout dans des contextes traditionnels ou bien définis.

Ainsi, on peut définir la performance d'un projet comme la mesure dans laquelle les extrants et les résultats du projet satisfont aux objectifs budgétaires, aux objectifs calendaires, aux spécifications opérationnelles et techniques et, en fin de compte, aux besoins commerciaux du client (Ahmed, 2023).

2.4.2 La notion de risque comme indicateur de performance

Considérant que cette étude se concentre sur la gestion de projet complexe dans un domaine d'ingénierie où le risque est élevé, il est important de lier ces deux concepts. Ainsi, selon le PMI, un risque de projet est un événement ou une condition incertaine qui, s'il se produit, peut avoir un effet positif ou négatif sur l'un ou plusieurs des objectifs du projet (PMI, 2017).

Il est relié au concept du triangle de Barnes précédemment détaillé car l'impact de la réalisation d'un risque influence directement le coût, la livraison et la qualité du projet.

Il convient également de souligner que, quelle que soit la méthodologie de gestion de projet adoptée, l'évaluation, la pondération et la mise en œuvre de stratégies de mitigation des risques demeurent des activités essentielles pour assurer le contrôle de la performance (Oehmen et al., 2020).

Dans son étude empirique, Rabechini Junior & Monteiro de Carvalho (2013) mettent en avant que la mise en place de pratiques structurées de gestion des risques, soutenues par des compétences relationnelles et organisationnelles, exerce une influence positive sur la performance globale des projets.

Il faut également distinguer deux états d'un risque, soit les *soft* et *hard criteria*. En effet, les risques *hard* sont généralement associés à des éléments techniques, financiers ou temporels, dont les impacts peuvent être quantifiés de manière objective. Ils concernent par exemple les dépassements de coûts, les retards de livraison ou les non-conformités de qualité. À l'inverse, les risques *soft* renvoient à des dimensions plus intangibles et humaines, telles que la communication, la résistance au changement, la motivation des équipes ou la coordination entre parties prenantes. Ces derniers, bien que plus difficiles à mesurer, peuvent avoir une influence déterminante sur la performance globale du projet (Crawford & Pollack, 2004).

2.4.3 Limites et liens avec les critères de réussite et le concept de succès

Selon Wit (1988), les critères de réussite les plus appropriés sont les objectifs du projet. Une bonne gestion du projet, du point de vue managérial, n'est tout de même pas une garantie que le projet n'échouera pas. Également, les mesures ne peuvent pas se limiter aux coûts, qualités et délais. Pour mesurer la réussite d'un projet, il faut tenir compte des objectifs des parties prenantes tout au long du cycle de vie du projet et à tous les niveaux de la hiérarchie de gestion. Nixon et al. (2012) met également en avant la notion de *leadership* qui, de son point de vue, conditionne la performance et la réussite des objectifs d'un projet. Également, l'environnement social, économique et environnemental du projet peut être une condition reliée à la réussite d'un projet (Martens & Martens, 2014).

Ainsi, il n'y a pas de définition claire du succès en gestion de projet. Shenhar et al. (2002) avancent trois raisons pour expliquer cette ambiguïté, à savoir l'approche universaliste utilisée dans la plupart des études sur la gestion de projet, selon laquelle tous les projets sont supposés similaires, la subjectivité des mesures de réussite et le nombre limité de variables managériales examinées par les recherches antérieures. La méthode Prince2 intègre pourtant les deux notions (indicateur de performance et critère de réussite) afin de mesurer et contrôler l'impact des livrables sur l'objectif final du projet. La Figure 18 ci-dessous illustre comment le livrable doit répondre aux deux enjeux :

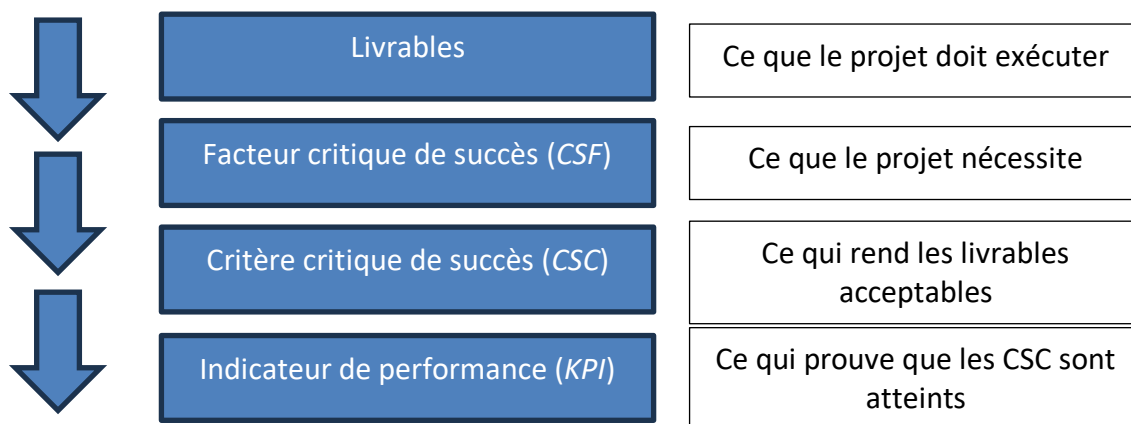


Figure 18 - Illustration de la méthode Prince2, en lien avec la performance. Illustration créée par © Florent NOGUEIRA 2025 à partir du guide de méthodologie Prince2 fournit par Axelos.
<https://www.axelos.com/certifications/propath/prince2-project-management>

Dans la littérature en gestion de projet, les notions de performance, réussite et succès renvoient à des concepts distincts, même si dans la pratique professionnelle, elles sont souvent utilisées comme synonymes.

Pour résumer cette distinction, la performance désigne principalement l'atteinte des objectifs mesurables du projet (coûts, délais, portée, qualité ou maîtrise des risques) et repose sur des indicateurs concrets permettant d'évaluer la gestion du projet en cours d'exécution. La réussite et le succès, pour leur part, correspondent à une appréciation plus globale, intégrant la satisfaction des parties prenantes, l'atteinte des bénéfices attendus et la contribution stratégique du projet après sa livraison.

Pour conclure, d'autres termes apparaissent fréquemment dans la littérature pour désigner des dimensions proches des concepts précédemment exposés. Lorsqu'il est question de performance, les notions d'efficacité et d'efficience sont souvent mobilisées, parfois comme synonymes, alors qu'elles renvoient à des réalités distinctes. L'efficacité réfère au fait de faire les bonnes choses, c'est-à-dire à la capacité du projet à atteindre les objectifs attendus, répondre aux besoins des parties prenantes ou contribuer aux bénéfices stratégiques de l'organisation. L'efficience, quant à elle, renvoie à la capacité de faire les choses correctement, en optimisant l'utilisation des ressources comme le temps, le budget ou la main-d'œuvre, afin de minimiser les gaspillages et maximiser la valeur produite (Sundqvist et al., 2014).

Bien que ces concepts soient conceptuellement distincts, leur usage courant tend à les confondre, d'où l'importance de préciser leurs différences dans un cadre académique.

2.4.4 La théorie de la contingence

Cette étude se concentre sur l'étude de facteurs et stratégies de gestion impactant directement la performance des projets d'ingénierie complexe. Afin de mieux comprendre les différences de résultats selon les situations, il est intéressant d'expliquer le concept de la théorie de la contingence.

En effet, la théorie de la contingence avance qu'il n'existe pas de meilleure façon universelle de conduire ou de structurer un projet ; au lieu de cela, l'efficacité dépend de la manière dont les pratiques et structures de gestion sont adaptées aux circonstances et facteurs contextuels propres à chaque projet (Hanisch & Wald, 2012). L'organisation est vue comme un système ouvert, influencé par des facteurs internes et externes (technologie, taille, environnement, stratégie, compétences disponibles). Ainsi, une mauvaise adéquation entre la structure (ou les pratiques) et la situation est crucial pour la performance. Cette théorie aborde donc des critères importants à maîtriser, en plus de ceux plus répandus, comme ceux reliés au triangle de fer (coût, délai, qualité) ou aux objectifs corporatifs.

Ainsi, le *leadership* est une notion qui explique en quoi l'efficacité du style de leader impacte directement l'efficacité d'un projet (Fiedler, 1981). Également, si le contexte change (forte innovation, incertitude élevée), les indicateurs *hard* classiques (coût, délai, qualité) peuvent ne pas suffire ; des indicateurs *soft* (adoption, apprentissage, adaptabilité) deviennent pertinents.

Enfin, la théorie de la contingence s'articule étroitement avec la notion de risque comme levier de performance. La nature, la fréquence et la gravité des risques dépendent directement du contexte du projet ; ainsi, une gestion des risques alignée sur les spécificités contextuelles permet non seulement de réduire les menaces, mais aussi d'améliorer la performance globale en favorisant l'adaptabilité et la résilience organisationnelle (Mikes & Kaplan, 2014).

Plusieurs travaux ont tenté de trouver si une structure idéale en gestion de projet pouvait répondre à l'ensemble des besoins. L'étude de Shenhar (2001) montre que les projets diffèrent substantiellement selon le niveau d'incertitude technologique et la complexité du système à livrer. Ainsi, la gestion (leadership, style, structure) doit s'ajuster à ces caractéristiques, ce qui suggère qu'un modèle de gestion unique n'est pas pertinent pour tous les projets.

Cela confirme en partie la pertinence de la théorie de la contingence comme cadre de réflexion dans cette étude.

2.4.5 Environnement économique, opportunité et profitabilité des entreprises

Le secteur de l'A&D est une industrie qui génère des revenus importants, de l'ordre de plusieurs centaines de milliards de \$ US par année. La Figure 19 ci-dessous illustre la période 2019 à 2023 :

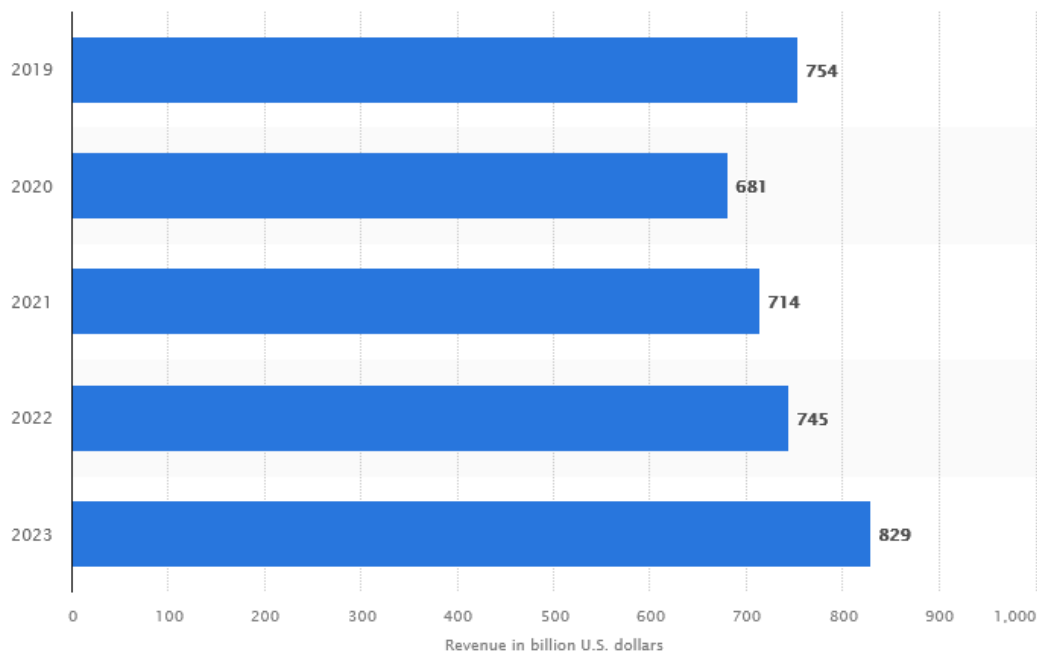


Figure 19 - Revenu du secteur de l'A&D de 2019 à 2023 (en Million de \$ US). Tiré de *Statista Research Department* - © 2024. <https://www.statista.com/statistics/1471842/global-leading-aerospace-and-defense-industry-revenue/>. Reproduit avec permission.

Historiquement, Suarez (1976) met en avant que les compagnies menant des projets pour le secteur gouvernemental réalisent des profits importants, sans assumer de grands risques, et en faisant financer leurs dépenses de R&D par les subventions. Ce sont de fait, des compagnies prospères, réalisant des performances financières et technologiques importantes.

Du côté du secteur de l'aéronautique, il est attendu que les revenus dépassent le 1000 milliards de \$ US à l'horizon 2025, en hausse de 4.4% par rapport à 2024 (IATA, 2024).

Les profits du secteur civil, principalement l'aviation commerciale, sont également en hausse, comme le montre le Tableau 5 ci-dessous :

Tableau 5 - Répartition des profits des opérateurs de transports aériens dans le monde. Tiré du rapport IATA No. 58 - © IATA 2024. <https://www.iata.org/en/pressroom/2024-releases/2024-12-10-01/>. Reproduit avec permission.

Région du monde	2024 profit net	2025 profit net (attendu)	Demande en 2025	Capacité en 2025
Amérique du Nord	11.8 Billion \$US	13.8 Billion \$US	+ 3.0%	+2.8%
Europe	10 Billion \$US	11.9 Billion \$US	+ 7.0%	+ 6.5%
Asie Pacifique	3.2 Billion \$US	3.6 Billion \$US	+11.7%	+10.8%
Amérique latine	1.0 Billion \$US	1.3 Billion \$US	+8.0%	+7.9%
Moyen-Orient	5.3 Billion \$US	5.9 Billion \$US	+9.5%	+9.2%
Afrique	0.1 Billion \$US	0.2 Billion \$US	+8%	+7.7%

Ce contexte conduit les entreprises leaders dans ce domaine à réaliser de nombreux projets, autant pour garantir la pérennité de leur compagnie, mais aussi pour répondre aux besoins grandissants des utilisateurs. Morandini et al. (2024) met en lumière les défis auxquels l'industrie manufacturière est confrontée dans un contexte d'avancées technologiques et de conditions de marché en évolution.

2.5 CADRE CONCEPTUEL DE LA RECHERCHE

Suite à la revue de la littérature disponible autour des sujets mis en avant dans l'introduction, et en lien avec la problématique illustrée dans la Figure 8, il apparaît que des relations émergent entre les concepts. Ces relations nous permettent de comprendre comment ils influent sur la performance des projets d'ingénierie dans le domaine aéronautique et aérospatial.

Également, plusieurs variables sont maintenant identifiées et pourront être intégrées au plan de recherche. Un résumé sera rédigé dans cette section afin de bien encadrer la collecte de données.

2.5.1 Relation entre l'utilisation de solutions et outils technologiques, et performance de projet

La littérature, à travers les études de Betia et al. (2023), Nyktarakis (2022), Rose et al. (2020) ou encore Vieira et Romero-Torres (2016) ont mis en avant plusieurs solutions et outils technologiques, qui peuvent avoir un impact sur la performance des projets. On peut citer 3 grandes catégories de solutions, soit :

- Les technologies d'information et de communication (TIC)
- Les solutions numériques d'ingénieries
- L'intelligence artificielle (IA)

Au sein de ces principaux outils, plusieurs facteurs influent différemment sur les indicateurs de performance mesurés par les questionnaires de projets. L'analyse préliminaire nous emmène à formuler la proposition suivante :

P1 : L'utilisation des solutions et outils numériques au sein de projet d'ingénierie contribue à l'amélioration de la performance.

Il serait intéressant de comprendre quelles solutions ou quels outils s'associent le plus à la performance des projets de conception et développement de nouveaux produits, en particulier dans le secteur aéronautique et aérospatial.

2.5.2 Relation entre méthodologie en gestion de projet et performance

Également, Dickinson (2008), Nixon et al. (2012), Anatolyevich et al. (2021), ou encore Khayyat (2022) identifient l'utilisation de méthodologies spécifiques dans les projets complexes du domaine relié à cette recherche. Selon l'ampleur, le niveau de risque ou la structure organisationnelle, les questionnaires peuvent utiliser une méthodologie traditionnelle, Agile ou Hybrides. Nous pouvons ainsi formuler la proposition suivante :

P2 : Les méthodologies Agile ou Hybride sont associés à une amélioration de la performance des projets.

Également, nous pouvons évaluer quel modèle ou quelle théorie de gestion performe le mieux dans le contexte de l'exécution de projets d'ingénierie aéronautique et aérospatiale.

2.5.3 Résumé des questions de recherche, propositions formulées et variables étudiées

Tableau 6 - Résumé des questions de recherche, propositions et variables

Concepts étudiés	Question de recherche	Proposition	Facteurs identifiées
Solutions et outils numériques et Performance	QR1 Comment l'utilisation et l'implémentation d'outils et de solutions technologiques contribue à l'évolution des indicateurs de performance des projets ?	P1 L'utilisation des solutions et outils numériques au sein de projet d'ingénierie contribue à l'amélioration de la performance.	- Technologie de l'information et des communications - Solutions d'ingénierie numérique (CFD, Digital Twin, RV/AR, NLP, etc.) - Intelligence Artificielle (IA)
Méthodologie en gestion de projet, Performance et Projet d'ingénierie complexe	QR2 Comment la méthodologie en gestion de projet d'ingénierie complexe peut être associé à l'atteinte des objectifs de performance ?	P2 Les méthodologies Agile ou Hybride sont associés à une amélioration de la performance des projets.	Utilisation de méthodologie appropriée : - Traditionnelle - Agile - Hybride

La littérature, à travers les études de Kerzner (2011), Pereira et Lima (2018) et Krol et al. (2020) nous indiquent les indicateurs servant à mesurer la performance des projets. On peut citer :

- CPI et SPI (indicateurs reliés respectivement aux coûts et à l'échéancier)
- Qualité
- Périmètre

En lien avec les tendances relevées, nous sommes en mesure de raffiner le cadre conceptuel préliminaire et identifier des propositions. La Figure 20 présente le cadre conceptuel final, qui sera décrit ensuite.

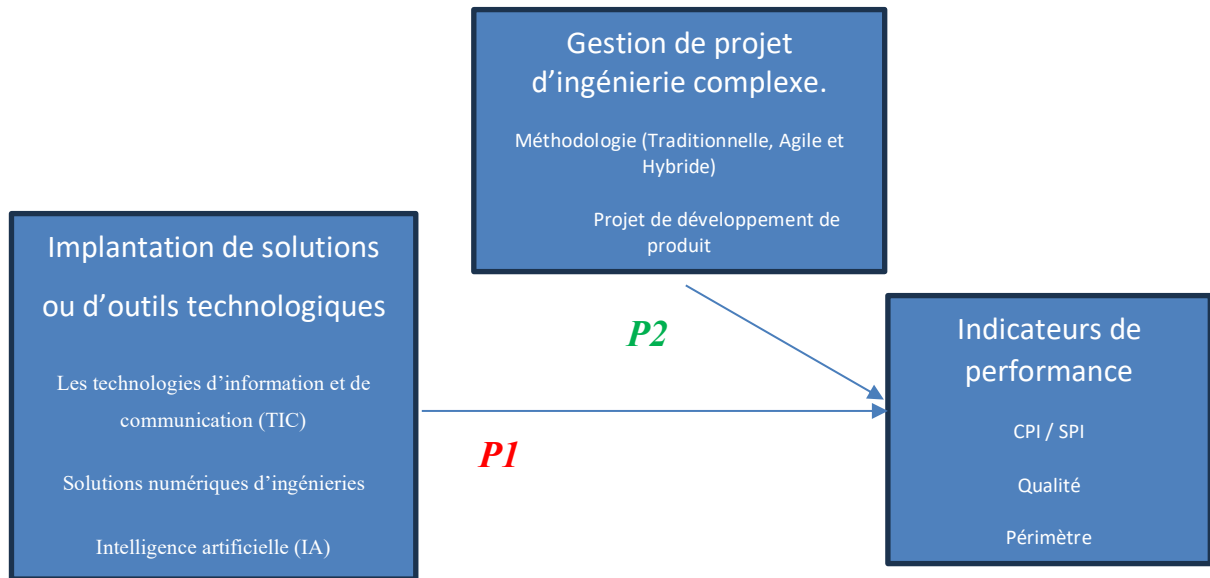


Figure 20 - Cadre conceptuel final

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre décrit la méthodologie adoptée pour répondre à la problématique de cette recherche. Il aborde la nature de l'étude envisagée, les techniques de collecte des données proposées, ainsi que les outils d'analyse employés.

3.1 VUE D'ENSEMBLE DE LA METHODOLOGIE

Selon Saunders et al. (2019), la méthodologie est définie comme une structure conceptuelle qui guide la manière dont une recherche est conçue et menée. Elle inclut les philosophies, les stratégies, et les techniques utilisées pour recueillir, analyser et interpréter des données.

La Figure 21 ci-dessous met en avant l'oignon de la recherche, qui illustre les différentes couches de la méthodologie, et explique visuellement les imbrications entre les étapes du raisonnement :

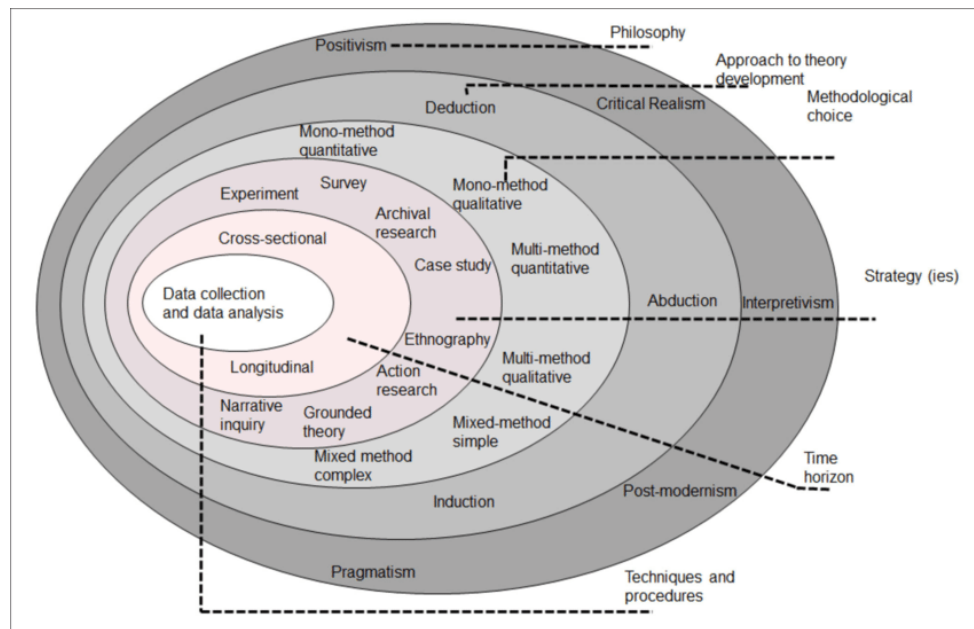


Figure 21 - Research onion (Saunders et al., 2019, p. 108). Image sous licence CC

Selon Saunders et al. (2019) la méthodologie est essentielle pour garantir la cohérence et la crédibilité des recherches dans le contexte des études en science de la gestion.

Également, il est important d'identifier une méthodologie appropriée afin de proposer une analyse de données fiable et pertinente. Les sections suivantes décrivent en détail la méthodologie qui sera utilisée par la suite.

3.2 POSITIONNEMENT DE LA RECHERCHE

L'objectif de cette étude est de comprendre le lien entre les techniques, les outils et la méthodologie utilisés en gestion de projet d'ingénierie complexe et leur impact sur la performance de ces projets. Grâce à la revue de littérature, plusieurs solutions et méthodologies ont été identifiées et des théories émergent autour de l'utilisation de ces approches dans la gestion des projets dans le secteur aéronautique et aérospatial.

Ainsi, le positionnement épistémologique retenu pour cette étude est l'interprétativiste, car l'observation de la réalité du terrain dépend des individus et varie en fonction de leur sensibilité (Villiers, 2005). Cette approche nous permet d'observer les interactions humaines qui influencent la performance des projets d'ingénierie complexes et de comprendre comment le lien entre ces concepts influe indépendamment sur l'observation principale. Une fois les liens établis, cartographiés et définis individuellement, il est important de comprendre si les propositions ont un lien concomitant ou non, ou bien si certains concepts agissent comme modérateurs. Cet objectif nous oblige à observer les situations dans leur environnement propre, et en évaluant les particularités de chacune.

Du point de vue ontologique, l'approche sera constructiviste. En effet, l'objectif n'est pas de tester une hypothèse, mais plutôt de faire émerger une compréhension du phénomène observé.

Le choix du constructivisme permet alors d'analyser les différentes réalités socialement construites et subjectives. La recherche se construit alors à travers l'expérience des personnes interrogées et l'interprétation du chercheur (Pouliot, 2004).

3.3 PERSPECTIVES DE RECHERCHE

Cette étude se penche sur l'observation des pratiques managériales utilisées par les équipes projet au sein du secteur aérospatial et aéronautique. L'accent est dirigé vers l'impact de ces pratiques sur la performance opérationnelle. L'idée est donc de déterminer si des liens existent entre les outils et techniques mobilisés, et l'effet sur le résultat observé.

Dans cette couche de l'oignon de la recherche, le choix se porte sur l'induction, car l'objectif est de faire émerger des théories à partir des données et de construire un modèle basé sur l'analyse des observations (Prince & Felder, 2006).

La première proposition qui sera observée est l'utilisation d'outils et solutions numériques dans un environnement de projet d'ingénierie complexe, et le lien avec la performance.

La seconde proposition se concentre sur les liens entre la méthodologie utilisée en gestion de projet et l'effet sur la performance.

Pour finir, les deux propositions seront étudiées en combinant les concepts et en vérifiant si un modèle peut émerger des observations.

3.4 LES NIVEAUX ET UNITES D'ANALYSE

Le niveau d'analyse retenue pour cette étude est le niveau projet, caractérisé par la structure de l'organisation où la gestion quotidienne des tâches est coordonnée et exécutée. L'étude se focalise sur les pratiques collectives, intégrées et suggérées par l'organisation. Ainsi, les cas particuliers, reliés à la spécificité des humains, ne seront pas mis en avant.

Nous cherchons principalement à comprendre comment l'équipe de travail fonctionne et comment les processus sont mis en œuvre collectivement. L'unité d'analyse se penchera sur la phase de conception des projets d'ingénieries complexes, les projets de R&D ou de développement de produits complexes.

3.5 APPROCHE DE RECHERCHE

L'approche de la recherche est inductive. Ainsi, à partir des données recueillies pendant la collecte de données, il est alors possible d'étudier l'imbrication des variables dépendamment.

Concrètement, nous pouvons évaluer si la combinaison de certaines solutions technologiques et de méthodologies en gestion de projet permet d'optimiser la performance des projets.

Cette approche nous permet alors d'identifier des pratiques générales, des tendances, et permet également de formuler une théorie ou un modèle émergent.

3.6 RECHERCHE PROPOSEE : RECHERCHE QUALITATIVE

Le choix méthodologique de la recherche ciblée est une méthode qualitative. En effet, l'impact des différents concepts de l'étude sur la performance des projets d'ingénieries complexes dépend des usages réels et des perceptions des utilisateurs. Une approche qualitative permet de mieux comprendre comment et pourquoi les outils ou les méthodes sont adoptés ou rejetés.

Une approche quantitative ne serait pas adaptée, car le phénomène étudié n'est pas théorisé et les variables pas encore identifiées. Également, il n'existe pas de bases de données disponibles pour construire un questionnaire fiable et permettant d'obtenir un échantillon représentatif.

L'approche qualitative est tout à fait adaptée à notre cadre et permet d'explorer ces dynamiques en profondeur et d'adapter l'analyse aux résultats émergents.

3.7 METHODES MOBILISEES

Cette recherche adopte une approche par étude de cas multiple pour analyser l'impact des outils numériques et de la méthodologie sur la performance des projets d'ingénierie aérospatiale. L'étude de cas multiple permet une compréhension approfondie des dynamiques spécifiques aux projets, en prenant en compte les perceptions des acteurs, les interactions entre outils et processus, ainsi que les contraintes organisationnelles.

3.8 L'HORIZON DE TEMPS

Le choix de l'horizon de temps de cette recherche est fait selon une conception transversale. En effet, les solutions, outils ou méthodologies en gestion de projet qui seront observés sont relativement récents. Également, la combinaison de ces outils est utilisée depuis peu de temps, et la gestion de projets d'ingénieries complexes, particulièrement en aérospatiale et aéronautique, évolue très rapidement.

De plus, l'étude ne s'intéresse pas à l'évolution des pratiques. Elle se concentre sur les processus utilisés actuellement, dans un secteur qui innove et itère sans cesse, et vise à identifier les pratiques émergentes.

3.9 TECHNIQUES, PLAN ET PROCEDURES DE COLLECTE ET TRAITEMENT DE DONNEES

3.9.1 Définition de la population et de l'échantillon

Dans le cadre de cette étude, la collecte de données cible principalement les entreprises œuvrant dans la conception de véhicules volants, qu'ils soient à vocation commerciale, militaire ou scientifique. Nous souhaitons également interagir avec des gestionnaires de projets évoluant au sein d'équipes multidisciplinaires et consacrant la majeure partie de leur temps au suivi de projets de conception complexes. Ces compagnies ont été identifiées aux chapitres 1 et 2, et le recrutement vise les entités les plus représentatives du secteur aéronautique et aérospatial, en fonction de leur capacité à participer à l'étude.

La méthode d'échantillonnage non probabiliste est privilégiée. En effet, l'étude étant de nature exploratoire, l'objectif est d'identifier des tendances plutôt que de confirmer une ou plusieurs hypothèses. Ainsi, nous ciblons des professionnels ayant plus de trois (3) ans d'expérience dans le secteur visé par l'étude, participant à des projets complexes intégrant des outils technologiques, et situés géographiquement au Canada, en France ou aux États-Unis.

3.9.2 Techniques de collecte de données

La technique de collecte de données utilisée dans cette étude est celle des entrevues semi-dirigées. Elle vise à interroger les participants dans leur environnement professionnel, et leur permettre de détailler les processus, outils, solutions et méthodologies utilisés au quotidien dans la gestion des projets d'ingénieries complexes.

Également, comme les entrevues sont conduites en personne ou à distance, la discussion est encadrée afin de réfléchir sur les pratiques managériales, et les effets sur le quotidien des équipes projets. L'attention est portée sur les concepts identifiés, soit l'utilisation des outils et les solutions numériques, la mise en place d'une méthodologie en gestion de projet et la surveillance et l'utilisation des indicateurs de performances.

Les entrevues ont une durée de 45 à 60 minutes, et sont composées d'une dizaine de questions, basées sur les trois variables identifiées ainsi que les deux propositions illustrées dans le cadre conceptuel de l'étude.

Dans un premier temps, la rencontre débute par une première section orientée sur des questions permettant de comprendre comment les équipes projets sont organisées. Nous orientons les questions sur les outils et solutions numériques utilisés au quotidien, et tentons de connaître comment ils sont intégrés dans les différents processus reliés à la conception, le suivi des indicateurs de performance, les tests ou les différentes phases d'implantation. L'objectif est d'identifier des outils en particulier, et de cartographier les noms de chaque solution.

Par la suite, une série de questions porte sur le domaine d'application des méthodologies en gestion de projet. Les participants, qu'il s'agisse d'individus, d'équipes ou de l'organisation dans son ensemble, sont invités à préciser comment les différentes méthodologies sont utilisées et quels résultats elles produisent en termes de performance.

Les échanges visent à comprendre les techniques utilisées, les interactions entre les différents membres, et comment la communication coordonne les différentes tâches au sein du bureau de projet. Également, les processus propres aux méthodologies sont identifiés et les questions tentent d'établir comment elles influent sur la vision de la conception de produits complexes au sein du secteur aérospatial et aéronautique.

Pour finir, des questions spécifiques à la performance sont posées aux participants. Elles cherchent à établir quels indicateurs sont suivis durant l'exécution des projets, la manière dont ils sont pondérés et quelle est la stratégie pour les utiliser.

La discussion aborde donc ces thématiques avec les participants, en se concentrant sur les observations recueillies sur les terrains et en abordant le retour d'expérience de projets passés et présents avec les gestionnaires de projets interrogés. L'analyse des données brutes peut ainsi être comparée aux pistes de réflexion abordées avec les participants lors de la discussion, laissant place à plus de libertés sur l'opinion de chaque professionnel.

Le guide d'entretien utilisé est joint en ANNEXE I.

3.9.3 Plan de collecte de données

Le secteur de l'aérospatiale et de l'aéronautique est présent dans plusieurs pays dans le monde. Les compagnies *leaders*, identifiées dans la revue de littérature, sont localisées principalement aux États-Unis, au Canada, en Europe et dans certains pays d'Amérique du Sud et de l'Asie.

Pour obtenir un panel de participants représentatif et qualitatif, nous souhaitons interroger des équipes projets au Canada (Québec et Ontario), aux États-Unis (Floride) et en France.

Le nombre de répondants visé par l'étude se situe autour de trente (30), répartis équitablement entre les trois régions citées plus haut. Une fois le certificat d'éthique obtenu, la période de récolte de données s'étale sur environ trois (3) mois. Les entrevues ont été réalisées en personne, mais aussi à distance, à l'aide d'une plateforme de visioconférence, permettant l'enregistrement des conversations.

3.9.4 Traitement, analyse, sécurisation et interprétation des données

La collecte de données s'oriente exclusivement sur des entretiens semi-structurés. Ainsi, une partie des réponses qui sont collectées sont sous forme de réponses à des questions fermées (pour fin d'identification) et ouvertes. Les réponses sont transcrites et les informations sont anonymisées, afin de garantir la confidentialité de celles-ci. Les données sont organisées et stockées dans un logiciel approprié pour structurer et centraliser les réponses.

Également, il est important de coder les données, afin d'identifier les concepts et relations clés, à partir d'informations brutes. Nous utilisons l'outil NVivo (version 14) pour cette étape. Ensuite, la méthode inductive vise à identifier les thématiques émergentes, qui peuvent nous permettre de répondre aux questions de recherches. Dans ce cas, les réponses sont compilées, regroupées et mises en commun afin d'identifier une cohérence dans le courant de pensée qui se dégage.

Afin d'assurer la fiabilité et la validité des résultats, plusieurs stratégies ont été mises en place pour garantir la qualité de la recherche. Tout d'abord, une triangulation des données a été réalisée en croisant les propos des différents participants. Les thématiques retenues reposent ainsi sur la récurrence et la convergence des réponses, ce qui renforce la robustesse des conclusions. Les réponses isolées ou anecdotiques, bien que documentées, ont été exclues de l'analyse finale afin d'éviter les biais d'interprétation et de concentrer la réflexion sur les tendances réellement significatives.

De plus, une validation croisée des codes a été effectuée au moyen du logiciel NVivo, permettant d'assurer la cohérence et la rigueur du processus de codification. Les thèmes émergents ont été examinés de manière itérative, en confrontant à la fois les données empiriques et les concepts issus du cadre théorique. Ce va-et-vient constant entre théorie et pratique contribue à la crédibilité et à la transparence de l'analyse. Enfin, l'utilisation d'un journal de bord analytique et la documentation systématique des décisions méthodologiques renforcent la traçabilité du processus et permettent une interprétation fidèle et nuancée des résultats.

L'analyse de ces données nous permet ensuite de faire des liens entre les résultats de la recherche, et le cadre conceptuel final identifié dans la Figure 20. En fonction des liens entre les thèmes, et en les comparant avec les propositions de départ, nous sommes en mesure de comprendre les dynamiques sous-jacentes.

Également, l'analyse met l'accent sur la comparaison des résultats préliminaires, avec les théories et les études identifiées dans le Chapitre 2. Ainsi, l'orientation de notre recherche peut être confrontée aux courants de pensée déjà établis, et les éventuels biais peuvent être soulevés.

Les conclusions de l'analyse sont décrites dans le Chapitre 4, et permettent de présenter en détail les résultats, en mettant l'accent sur l'apport de la recherche sur la connaissance du domaine d'étude, les pratiques managériales et les leçons à tirer des analyses mises en avant par cette étude.

Dans un souci de confidentialité, et afin de protéger les données critiques recueillies pendant la collecte de données, les enregistrements des rencontres sont stockés sur un appareil unique, et ne seront pas mis en ligne sur une plateforme de stockage en ligne (*cloud* ou nuage). De plus, lors de la transcription, les nom et employeur des répondants ne sont pas recopiés. Seul le secteur d'activité est catégorisé, mais il ne sera pas possible de relier ce secteur à une compagnie en particulier.

Les enregistrements vidéo sont archivés sur le OneDrive de l’UQAR, pendant une durée de sept (7) ans. Le dossier sera uniquement accessible à l’auteur et à la direction de recherche. Eux seuls possèdent l’information pour accéder aux enregistrements.

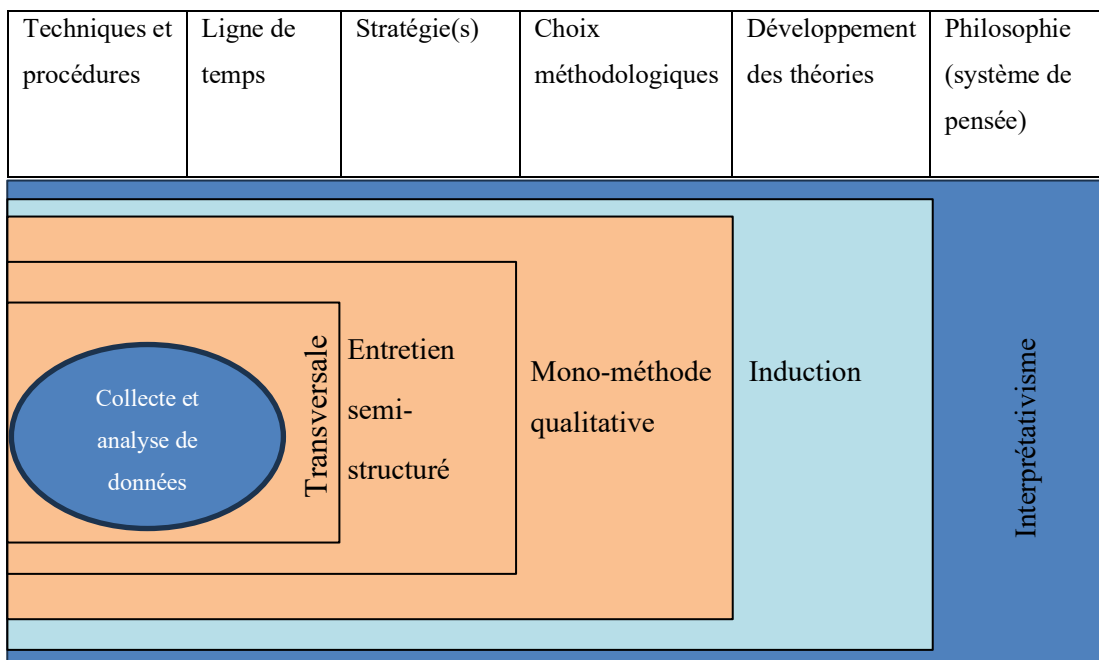
En tout temps, l’auteur s’efforce de garantir aux répondants l’utilisation exclusive des informations partagées au seul but de cette étude.

Le certificat d’éthique autorisant la collecte de donnée dans le cadre de cette recherche est joint en ANNEXE II.

3.10 RESUME DE LA METHODOLOGIE

Le Tableau 7 ci-dessous résume les concepts qui seront utilisés dans cette étude en particulier, adapté sur le modèle illustré en Figure 21 :

Tableau 7 - Vue d'ensemble de la méthodologie



CHAPITRE 4

PRÉSENTATION ET DISCUSSION DES RÉSULTATS

4.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous exposerons les résultats issus des entrevues menées auprès des professionnels du secteur aéronautique et aérospatial afin de répondre à la problématique de recherche : « L'influence de l'implantation des nouvelles technologies sur les indicateurs de performance des projets d'ingénierie dans le domaine manufacturier aéronautique et aérospatial ».

Nous débuterons par une description concise de l'échantillon : nombre de participants, répartition géographique, postes occupés et les autres critères démographiques.

Ensuite, nous présenterons les thématiques principales dégagées lors de l'analyse qualitative : d'abord, les outils numériques et solutions technologiques identifiés, puis les pratiques méthodologiques de gestion de projet associées, et enfin, l'impact perçu sur les indicateurs de performance (délais, coûts, qualité, etc.).

Enfin, nous établirons des liens entre ces résultats empiriques et les propositions formulées dans le cadre conceptuel, afin de situer nos observations par rapport aux propositions de départ. Nous discuterons ensuite des liens avec les publications évoquées lors de la revue de littérature afin de mettre en évidence la convergence ou la divergence des observations.

Pour finir, nous proposerons une analyse des résultats en lien avec les objectifs de la recherche, afin de mettre en avant les conclusions relatives aux propositions explorées.

Nous terminerons par une proposition de recommandation.

4.2 PRÉSENTATION DES PARTICIPANTS

Les entretiens se sont déroulés pendant huit semaines, d'avril à mai 2025, selon le plan de collecte défini dans le chapitre 3. Sur l'objectif initial de 30 entrevues visées, j'ai eu l'occasion d'en compléter 25. En effet, suite aux différentes sollicitations postales, par courriel ou sur les réseaux de professionnels, j'observe que le secteur de l'aéronautique et de l'aérospatiale est très réceptif à ma demande de collecte de données et les gestionnaires de projets sont en mesure de dégager un peu de leur temps pour partager leur expérience. Néanmoins, on observe des disparités entre les régions ou pays sollicités, dues principalement aux structures organisationnelles et aux directives corporatives.

On observe qu'au Canada, les répondants sont souvent autorisés à discuter avec des étudiants dans un cadre défini, alors qu'aux É.-U., les politiques relatives à la divulgation d'informations dans un cadre scientifique sont beaucoup plus limitées. Par exemple, certaines compagnies ont refusé de répondre, car il leur est défendu de parler à des étudiants non américains. En France, les gestionnaires sont souvent surchargés, et ont de la difficulté à ajuster leurs horaires pour participer à la collecte de données.

Dans l'ensemble, les échanges ont été cordiaux, pertinents et dans certains cas, déterminants pour être en mesure de répondre à la question de recherche.

Le Tableau 8 détaille les données statistiques de l'échantillon et les différentes informations relatives aux participants :

Tableau 8 - Données statistiques des participants à l'étude

Nombres d'entrevues réalisées	25
Répartition géographique des participants	11 participants au Canada 7 participants en France 7 participants aux É.-U.
Catégorie socioprofessionnelle des participants	20 hommes / 5 femmes 48% d'ingénieurs, membres d'un ordre professionnel 54% détiennent une certification PMP du PMI 32% détiennent un titre d'ingénieur et une certification PMP. En moyenne, un participant combine plus de 4.5 années d'expérience en gestion de projet complexe, dans le domaine aéronautique et/ou aérospatial
Niveau scolaire des participants	20% détiennent au maximum un niveau Bac (Niveau 6 CITE ⁴ 2011) 70% détiennent un niveau Maîtrise (Niveau 7 CITE 2011) 10% détiennent un doctorat (Niveau 8 CITE 2011)
Temps moyen des entrevues	52 minutes

Les participants travaillent pour des compagnies du secteur privé (89% des répondants) et du secteur public (11%).

⁴ Selon la définition de l'UNESCO : <https://uis.unesco.org/fr/topic/classification-internationale-type-de-leducation-cite>

Nous pouvons classer ces entreprises dans lesquelles travaillent les participants en 3 catégories de grosseur, en considérant le nombre d'employés :

- 24% comptent plus de 20 000 employés
- 44% entre 1000 et 20 000 employés
- 28% emploient moins de 1000 employés

Également, à des fins d'identifications et classifications, nous avons demandé aux participants de détailler, selon leur connaissance :

- La taille du bureau de projet (ou le nombre de personnes qui travaillent à temps plein, sur des tâches reliées à la gestion de projet) ;
- Le niveau de maturité des processus documentés en gestion de projet ;
- Le niveau de complexité des projets réalisés au quotidien.

Le Tableau 9 détaille les moyennes des réponses :

Tableau 9 - Autres statistiques de la population

Nombre d'employés dédiés à la gestion de projet (en pourcentage du nombre d'employés total, dans l'organisation ou le site)	<u>Total : 7%*</u> Au Canada : 3% En France : 13% Aux É.-U. : 8%
Niveau de maturité des processus documentés en gestion de projet (1 : peu mature à 5 : très mature)	<u>Total : 3.4*</u> Au Canada : 3.22 En France : 3.07 Aux É.-U. : 4.00
Niveau de complexité des projets réalisés au quotidien (1 : peu complexe à 5 : très complexe)	<u>Total : 4.2*</u> Au Canada : 4.06 En France : 4.32 Aux É.-U. : 4.21

* Moyenne basée sur les 25 réponses, collectée pendant les entrevues

Ces statistiques sont à titre indicatif, et n'ont pas de valeur quantitative fiable, à cause du faible échantillon. Néanmoins, elles peuvent apporter un niveau de détail intéressant pour comprendre et analyser les tendances.

4.3 PRESENTATION DES RESULTATS

Dans cette seconde section, nous nous attarderons sur l'analyse des thématiques émergentes issues des entretiens. En effet, la démarche de codification réalisée en amont à l'aide du logiciel NVivo nous amène à présenter les catégories principales qui ont surgi et à démontrer de quelle manière ces thèmes reflètent les perceptions des professionnels sur l'implantation des nouvelles technologies, utilisées dans un cadre méthodologique particulier et l'influence sur la performance.

À l'intérieur des trois thématiques principales, en lien avec la question de recherche, nous avons identifié trois sous-thèmes. Cette identification a été réalisée en fonction de la concordance des réponses, la saturation des données recueillies et la pertinence des idées en lien avec notre objectif. Le Tableau 10 ci-dessous détaille le cadre de codification, en indiquant les codes et sous-thèmes, et en indiquant le nombre des références obtenus :

Tableau 10 - Cadre de codification et nombres de référence par sous-thèmes

Sous-thèmes	Codes	Méthodologie	Outils et solutions technologiques	Performance
Approche hybride		17		
Approche traditionnelle		16		
Gouvernance et maturité des processus		54		
Systèmes en silos			26	
Adoption inégale et besoin en formation			26	
Perception de la valeur des outils			26	
Gestion de risques comme levier				26
Clarté du périmètre				38
Facteur humain, différence culturelle				45
Usage des KPIs (EVM, CPI, SPI, etc.)				25

4.3.1 Outils et solutions technologiques

4.3.1.1 Outils technologiques propres à la gestion de projet

Toutes les entreprises étudiées s'appuient sur des solutions informatiques pour piloter le développement de leurs projets. Les répondants insistent sur le fait que les logiciels de gestion de projet sont les outils majoritairement utilisés. Également, ils jugent que ces outils sont les plus indispensables pour réaliser leurs tâches quotidiennes. Dans certains cas, un bris d'opération de ces outils entraîne par défaut l'arrêt des activités. Un répondant indique : « sans l'informatique, la gestion du temps et des tâches serait impossible et nous ne saurions jamais où nous sommes rendus dans le projet ! ».

En effet, ces outils concentrent l'ensemble des fonctionnalités permettant de gérer les échéanciers, les différents lots et livrables, l'assignation des ressources et toutes les autres tâches reliées à l'organisation, la planification et le suivi des projets. Comme le soulignent Betia et al. (2023), les outils TIC permettent de gérer efficacement les projets d'ingénierie complexe, en garantissant qualité, coûts maîtrisés et respect des délais.

La Figure 22 illustre quelles solutions (TIC) ont été identifiées au cours de l'étude :

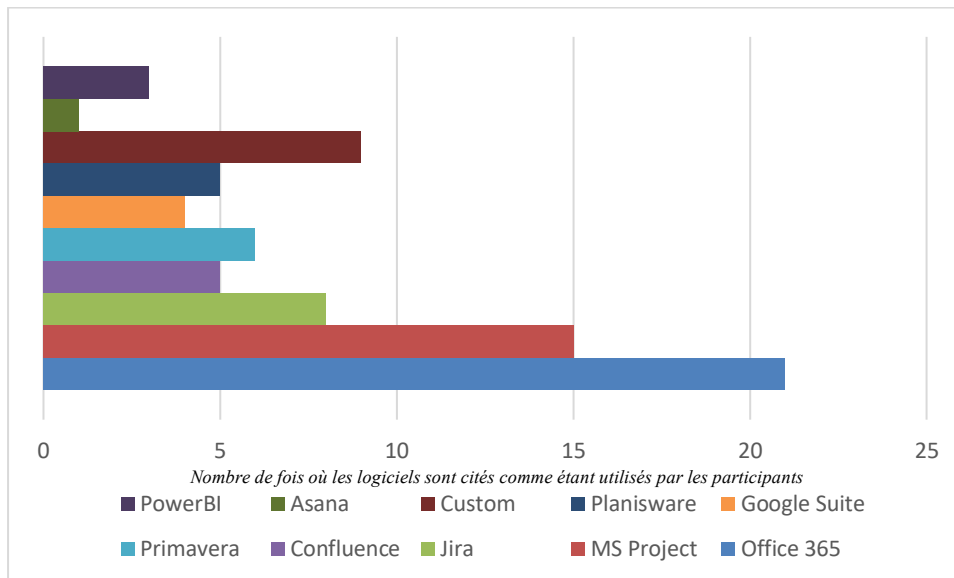


Figure 22 - Logiciels utilisés par les entreprises pour gérer les projets

On constate que la plateforme Microsoft est la plus utilisée. Les discussions portent sur l'utilisation de la suite Office 365 (Word, Excel, PowerPoint, etc.) qui permet aux équipes de rédiger des rapports, de concevoir des présentations et plus largement, d'utiliser la puissance d'Excel pour construire des outils simples. En particulier dans la gestion de risques (matrice), la planification des ressources ou la compilation locale de données, Excel est utilisé par la majorité des organisations.

MS Teams est également un outil central, au sein des équipes projets. En effet, ce logiciel permet la communication entre les équipes à partir d'un *chat*, l'échange et le partage de documents en commun, le suivi des tâches ou encore l'accès aux documents via le *sharepoint*. Cela concorde avec l'étude de Nyktarakis (2022) qui explique que MS Teams transforme la communication des équipes hybrides en la rendant plus immédiate, informelle, expressive et traçable, tout en offrant la souplesse nécessaire pour alterner entre échanges rapides et réflexifs.

MS Project est sans aucun doute le logiciel de gestion de tâches le plus cité dans les réponses collectées lors des entrevues. Dans la quasi-totalité des entreprises évoluant dans un environnement Microsoft, on remarque que c'est l'outil le plus répandu et le plus maîtrisé, au sein des bureaux de projets. Il sert en premier lieu à construire l'échéancier de référence (*base-line*), mettre au propre les différents blocs de la structure de découpage de projet (SDP ou *WBS*) et ordonnancer les tâches. Un participant nous indique : « j'utilise MS Project car c'est un requis pour l'industrie du militaire, mais MS Teams est un outil puissant, collaborative et aussi performant que MS Project. Par exemple, j'utilise Planner dans MS Teams pour l'assignation des tâches à mon équipe et c'est beaucoup plus pratique au quotidien. »

Dans les données recueillies, on note que MS Project est la plateforme technologique qui permet aux gestionnaires de planifier, organiser et surveiller l'avancement des projets.

Les concurrents de MS Project également cités dans l'étude sont :

- Planisware (principalement utilisé par l'aviation civile)
- Jira et Confluence (environnement Agile, ou implanté dans les divisions qui gère des projets de technologie de l'information (IT))
- Primavera

Pour finir, on note une proportion non négligeable d'outils sur mesure, développés par les organisations pour leurs besoins spécifiques. En effet, plusieurs participants expliquent que les fonctionnalités des logiciels commerciaux ne sont pas adaptées à leurs besoins. Par exemple, pour la gestion de risques, les gestionnaires utilisent principalement Excel pour construire leur matrice et gérer les risques identifiés. Pour optimiser cette gestion, on note que leurs services d'IT ont été mandatés pour développer une application plus intuitive, efficace et connectée. Également, on remarque que des fonctionnalités existantes dans les solutions commerciales ne sont pas utilisées, et on leur préfère un outil sur mesure, qui fait globalement la même chose. On a observé ce cas plusieurs fois dans la gestion des jalons (ou *milestone*) ou pour la gestion documentaire.

La seconde solution technologique principalement utilisée, à grande échelle, dans les organisations du secteur de l'aéronautique et de l'aérospatiale est le *ERP*.

C'est le cœur du système informatique de l'entreprise, et la plateforme qui font le lien entre les activités propres à la gestion de projet et les finances, les approvisionnements ou encore la gestion des feuilles de temps.

Le Tableau 11 détaille les différents logiciels utilisés, répartis selon la catégorie d'entreprise et/ou le cœur de métier de ces organisations :

Tableau 11 - Liste des ERP utilisés dans les organisations

<u>Catégorie d'entreprise</u>	<u>ERP utilisé</u>
Leader mondial	SAP
Leader de second plan	SAP, Infor, Oracle, Epicor, IFS
Intégrateur système	SAP, Infor, Epicor
Secteur de la défense et aérospatial	SAP
Petite structure et Start-Up	NetSuite, Odoo

On remarque que la solution SAP est la plus souvent citée. Durant les entrevues, la majorité des répondants expliquent que l'utilisation de ce logiciel est indispensable à la saine gestion de leurs différents projets. En effet, SAP est utilisé pour le suivi des coûts et la gestion de la paye des membres de l'équipe. C'est aussi l'outil que le management exploite pour connaître l'avancement des projets et organiser les interactions avec les autres départements (maintenance, comptabilité, finance, approvisionnements, etc.).

Les plus petites organisations ne peuvent pas supporter un logiciel aussi complexe, mais utilisent également des *ERP*, plus abordables et plus faciles à opérer.

4.3.1.2 Outils technologiques propres à l'ingénierie

En questionnant les gestionnaires de projets ayant participé à cette étude, ceux-ci ont détaillé les outils technologiques propres à l'ingénierie utilisés dans leur organisation.

Bien que les répondants soient en grande majorité des ingénieurs, leurs tâches quotidiennes se concentrent sur la gestion administrative des projets. Dans cette optique, les professionnels nous indiquent ne pas utiliser eux-mêmes des solutions technologiques en lien avec des activités de conception, de simulation ou de fabrication. Néanmoins, ils connaissent les solutions utilisées par leurs équipes. Le Tableau 12 détaille les principaux outils, en fonction des catégories identifiées dans le Chapitre 2, Section 2.1.2 :

Tableau 12 - Liste de solutions d'ingénierie numériques

<u>Solution / Outil d'ingénierie numérique</u>	<u>Outils observés</u>
Chapitre 2, Section 2.1.2	
Conception Assistée par Ordinateur	Dassault, CATIA, Altium, ADS, SolidWorks, AutoCad, Creo
Jumeaux Numériques	<u>Utilisé uniquement par un leader mondial, et ne communique pas sur le nom de la solution</u>
Outil de prototypage	Impression 3D, CNC multi-axe,
Réalité virtuelle	<u>Non-Observé</u>
Outil de simulation informatique	Star-CCM+, Astos, SolidWorks
PLM	Siemens TeamCenter, Dassault, Centric, WindChill

On remarque encore une fois la présence de leaders largement implantés dans l'industrie de l'aéronautique et de l'aérospatiale. En effet, la plateforme Siemens est utilisée (PLM, simulation, conception) ainsi que celle de Dassault Systèmes (conception et simulation 3D, électrique), comme le démontre Suydam et Pyles (2020).

De nombreuses entreprises affirment utiliser régulièrement des solutions de prototypage rapides, comme l'impression 3D, pour tester un concept et confirmer un design, sans être dépendantes d'un sous-traitant pour sa fabrication. Dans certains cas, les ingénieurs couplent l'utilisation d'un scanner 3D et d'une imprimante additive, pour reproduire une pièce, sans devoir la modéliser au préalable. Un participant nous explique : « quand une pièce existe, mais que nous n'avons pas le dessin technique, l'impression 3D nous permet à l'aide d'un scanner, de refaire une validation complète et en quelque heures, fournir un dessin technique basé sur la modélisation et le test d'impression ».

Certains possèdent même leur propre atelier de fabrication, équipé de machines-outils, d'équipement pour fabriquer des cartes électroniques, ou des postes à souder.

Pour finir, le guide d'entrevue aborde l'utilisation de l'intelligence artificielle avec les participants. On note que cette thématique est sensible dans les organisations, et que le sujet est polarisant. Néanmoins, on constate que la majorité des entreprises ont une politique claire concernant l'utilisation de cette technologie, dans la gestion quotidienne des tâches reliées au projet. Le Tableau 13 résume les observations recueillies pendant la collecte de données :

Tableau 13 - Liste des IA observées

<u>Catégorie d'entreprise</u>	<u>Solutions utilisées</u>
Leader mondial	Développement de leur propre IA, basé sur des LLM open source, et développé en interne
Leader de second plan	Licence fermée de Gemini ou Copilot
Intégrateur système	Selon la structure, on peut observer l'utilisation de licences professionnelles des IA de Google ou Microsoft, ou bien le développement d'un IA propriétaire
Secteur de la défense et aérospatial	<u>Information non communiquée</u>
Petite structure et Start-Up	L'ensemble des outils grand public, tels que ChatGPT, Claude.ai, Gemini, etc.

On remarque un engouement important pour l'utilisation de ces technologies en milieu de travail. Beaucoup de répondants ont une opinion positive sur l'intelligence artificielle.

Néanmoins, considérant que le secteur est sensible, du point de vue des données et de la confidentialité des projets, l'adoption est inégale au sein des différents départements (gestion, ingénierie, administration, etc.).

Clairement, les leaders mondiaux et d'autres ont décidé de contrôler l'IA à l'interne. Ils se basent sur des *Large Language Models* (LLM) open source, qui leur permettent de développer leur propre modèle.

Pour d'autres, des licences limitées (ou professionnelles) de solutions commerciales comme CoPilot et Gemini, commencent à être déployées. Pour les structures moins sensibles, ou les start-ups, on observe que les membres des équipes sont plus libres de tester les outils disponibles en ligne.

On distingue bien évidemment les tâches simples (traitement de données, mise en jour de présentation, résumé de compte-rendu) des tâches complexes (calculs, aide à la conception, assistance au design, automatisation des tâches répétitives ou à la modélisation).

Pour les opérations administratives, le but de l'utilisation de l'IA est principalement de gagner du temps, être plus efficient et orienter les activités des humains sur la valeur ajoutée.

Également, les équipes se servent de l'IA pour *brainstormer*, remettre en question une idée ou bien identifier un risque. Dans ce cas, l'IA est utilisée comme une aide à la décision.

Pour les activités de conception, l'IA est utilisée pour vérifier des calculs, confirmer une hypothèse de départ ou évaluer une solution technique alternative.

Ces observations vont dans le sens des études citées dans le Chapitre 2, en particulier celle de Rose et al. (2020) qui explique comment les équipes utilisent l'IA comme aide à la décision et l'interprétation de données.

4.3.1.3 Système en silo et intégration partielle

Suite à l'analyse des observations en lien avec l'utilisation d'outils et solutions technologiques, on observe que les gestionnaires de projet qui les utilisent émettent des réserves sur leur efficacité.

En effet, en regroupant les différentes solutions, on observe que les organisations utilisent en parallèle un logiciel de gestion de projet, un ERP et des outils technologiques dédiés. En moyenne, les répondants nous confirment utiliser au minimum huit différents logiciels ou progiciels, sur une base quotidienne.

La Figure 23 ci-dessous illustre l'architecture informatique typique d'un utilisateur, et les interactions entre les différentes solutions :

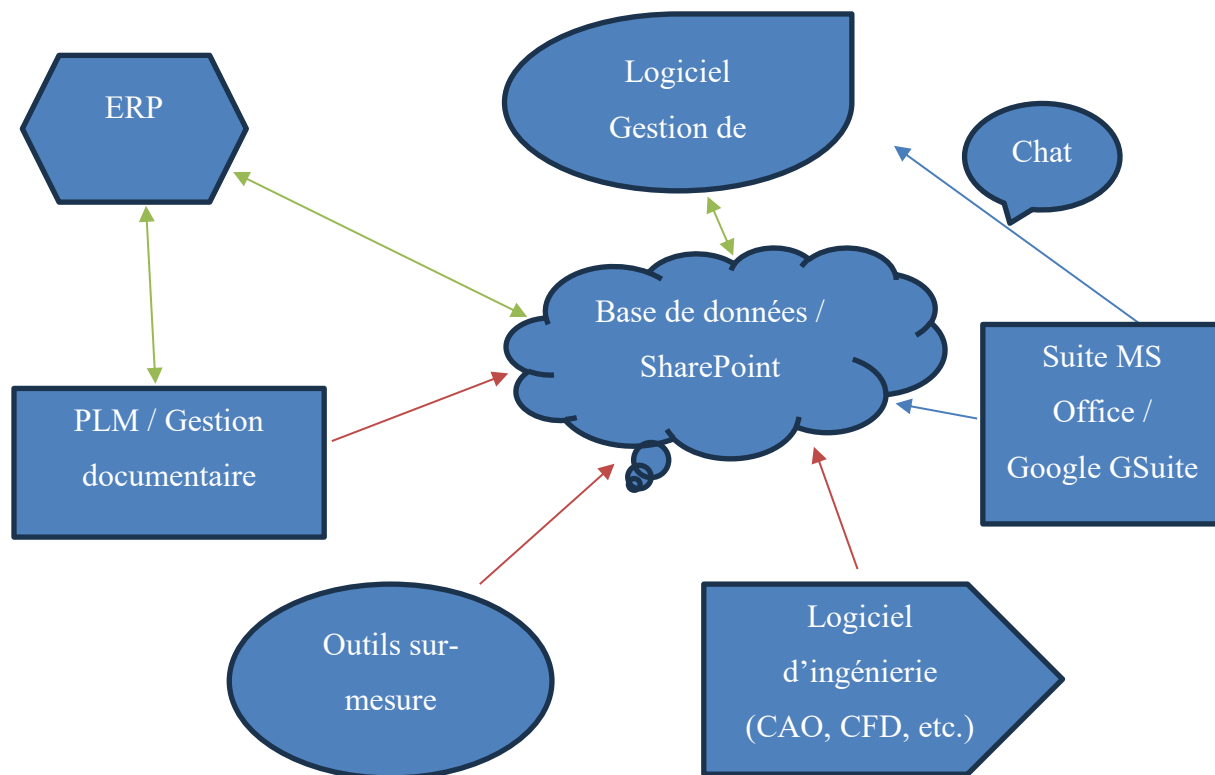


Figure 23 - Lien entre les différents outils technologiques

On retrouve les différentes solutions évoquées plus haut, ainsi que des flèches, représentant le sens des interactions. En vert, les flèches bidirectionnelles illustrent le fait que les solutions sont intégrées avec la base de données, et que la communication s'établit dans les deux sens. Ainsi, un utilisateur peut aussi bien enregistrer des données que les lire, ou les extraire, afin de nourrir d'autres fonctionnalités. C'est un gain important, car cela supprime la double saisie.

En rouge, les flèches unidirectionnelles représentent le fait que la base de données ne sert qu'à accueillir les données, mais les autres logiciels ou solutions ne peuvent pas les exploiter. Dans ce cas, il faut créer une interface de programmation d'application (API) manuellement.

En bleu, les liens représentés sont en général intégrés à la suite de bureautique utilisée. Par exemple, un utilisateur Microsoft va utiliser MS Project, MS Teams et la suite Office 365.

On remarque donc que la majorité des solutions et outils technologiques sont utilisés en silo. En d'autres termes, les différentes fonctionnalités ne sont pas connectées de manière native. Dans la plupart des cas, une intervention du service informatique ainsi qu'une procédure de connexion spécifique (API) sont nécessaires pour permettre leur intégration.

Pour les utilisateurs, cela peut être un enjeu pour plusieurs raisons :

- Perte de temps liée à la double saisie (on doit nourrir plusieurs logiciels avec la même information)
- Manque d'efficience des gestionnaires de projets
- Perte de valeur ajoutée
- Perte de visibilité, lorsqu'un indicateur doit être suivi dans plusieurs environnements
- Gestion documentaire lourde (demande de changement, approbation des dessins, etc.)

4.3.1.4 Adoption inégale et besoin en formation

Au sein des équipes projets, les gestionnaires doivent composer avec des ressources pluridisciplinaires et hétérogènes. En effet, comme dans une organisation classique, le niveau de compétence et d'expérience des membres n'est pas égal.

On observe ainsi des niveaux variés de confort et de familiarité vis-à-vis de l'utilisation des technologies, selon les individus et les contextes.

La première variable est sans doute l'âge des utilisateurs. En effet, on observe une forte disparité entre les générations, en lien avec l'utilisation des technologies. Pour les générations plus âgées, le niveau d'aisance est plutôt acceptable, mais doit être souvent mis à jour à travers de la formation. Ils sont en général plus déstabilisés lors d'une mise à jour, une évolution ou un changement dans les habitudes quotidiennes.

Les générations plus jeunes, qui sont nées avec la technologie, sont souvent proactives et avides de nouvelles applications. Ils s'adaptent plus facilement et utilisent dans certains cas l'IA comme assistant, afin d'optimiser leur utilisation de la technologie. Par exemple, l'impression 3D évoluant rapidement, l'IA permet maintenant de coupler la conception, le paramétrage de l'impression et l'utilisation des machines.

La seconde variable est l'utilisation des fonctionnalités. En moyenne, basée sur l'évaluation des participants, les utilisateurs utilisent entre 40 et 60 % des fonctionnalités des différentes solutions technologiques.

Peu importe la génération, la connaissance approfondie des logiciels et/ou outils est relativement faible. Dans la plupart des cas observés, les utilisateurs préfèrent même utiliser plusieurs outils en parallèle, alors que l'outil principal serait en mesure de combler le besoin initial. Ce qui montre également que les fournisseurs de logiciels n'offrent pas de solutions fonctionnelles pour l'ensemble des besoins, au sein d'une même et unique plateforme.

Cette observation, partagée par les participants, est un enjeu important en lien avec la performance des projets. En effet, le secteur requiert un haut niveau de fiabilité et de conformité. Sans la technologie, les équipes ne seraient pas en mesure d'atteindre le niveau de performance attendue. Un des répondants nous indique : « la technologie avance plus vite que nous. Et quand on n'arrive pas à suivre le rythme, il devient compliqué d'utiliser pleinement les outils, ce qui ralentit forcément notre capacité à livrer ».

Pour pallier ce problème, deux solutions ont été décrites par les répondants.

La première est la formation à l'interne. Les procédures en lien avec l'utilisation des outils sont bien documentées et dans certains cas, les organisations ont même un document de formation interne (ou *handbook*). Les nouveaux employés sont ainsi formés en commençant et sont en mesure d'atteindre rapidement le niveau d'aisance obligatoire pour participer aux différentes activités. On observe également un parrainage entre les nouveaux et anciens employés, afin de faciliter l'adoption rapide des politiques internes.

La seconde est le recours aux consultants. Très implantés dans cette industrie, un certain nombre d'experts offrent des services d'accompagnement en technologie, permettant aux utilisateurs de profiter efficacement des fonctionnalités offertes par les outils technologiques.

Également, les fournisseurs de service (Atlassian, Microsoft, Google, Dassault, Siemens, etc.) offrent un support technique et technologique de grande qualité, permettant aux utilisateurs de profiter de session de formation adaptée. L'évolution rapide des technologies est ainsi perçue comme un atout sur le plan organisationnel et leur adoption est activement encouragée.

4.3.1.5 Perception de la valeur des outils technologiques

L'ensemble des répondants s'accorde sur un point : les outils technologiques sont devenus indispensables à la gestion des projets complexes dans l'industrie aéronautique et aérospatiale. À l'intérieur des organisations, l'adoption massive de la technologie permet une meilleure collaboration, une augmentation de la productivité et la réduction drastique des erreurs pouvant mener à un défaut critique (Haque & James-Moore, 2005). Néanmoins, notre recherche met en avant une perception inégale de la valeur de ces outils.

En premier lieu, la pluralité des outils est un enjeu critique. De plus, le défaut d'intégration qui génère des silos d'information et de tâches décourage souvent les utilisateurs et réduit la perception positive de leur utilisation massive.

En second lieu, on observe que la valeur perçue varie beaucoup selon les profils :

- Les gestionnaires de projet expérimentés perçoivent une forte valeur dans les outils qui offrent de la visibilité (tableaux de bord, KPI automatisés, suivi de jalons).
- Les cadres techniques ou ingénieurs de premier niveau préfèrent des solutions simples, intuitives et peu chronophages. Certains contournent les outils officiels au profit de fichiers Excel ou de méthodes artisanales, qu'ils jugent plus efficaces.
- Les équipes jeunes ou récemment formées sont souvent plus ouvertes aux outils numériques avancés, mais peuvent être freinées par un manque d'intégration entre plateformes ou des règles organisationnelles rigides.
- Enfin, certains chefs de programme reconnaissent que la valeur des outils est conditionnée à leur niveau d'adoption collective : un bon outil mal utilisé peut devenir un fardeau.

Plusieurs répondants insistent sur le fait que les outils, bien qu'utiles, ne remplacent pas l'expertise humaine. Un bon logiciel ne garantit ni la qualité des décisions ni l'alignement des équipes. La valeur ajoutée émerge lorsque l'outil est combiné à une méthodologie claire, un langage commun, et une culture de projet partagée.

Les conditions qui permettent aux outils de dégager une valeur concrète sont :

- Une formation adaptée et continue des utilisateurs ; une centralisation des données ou une interopérabilité fluide.
- Une simplicité d'utilisation, même dans des contextes complexes.
- Un leadership engagé dans la promotion des bons usages.
- Une capacité à adapter les outils aux réalités du terrain, plutôt que l'inverse.

4.3.2 Méthodologies en gestion de projet

4.3.2.1 Adaptation des méthodologies au secteur de l'aéronautique et de l'aérospatiale

La seconde thématique abordée lors des entrevues concerne les méthodologies en gestion de projet mises en œuvre au sein des organisations. Cette section vise à explorer les approches utilisées par les équipes – qu'elles soient traditionnelles, agiles ou hybrides – ainsi que les processus structurants qui encadrent la planification, le suivi et la gouvernance des projets.

Le premier constat est que l'approche traditionnelle, inspirée des bonnes pratiques documentées par le PMI, est largement adoptée par l'industrie.

On retrouve au sein des organisations une connaissance approfondie de la méthodologie illustrée dans le PMBOK 6^{ème} édition et la grande majorité des gestionnaires de projet possède au minimum une certification *Projet Management Professionnal* (PMP). Pour eux, c'est le courant de pensée qui se rapproche le plus de leur réalité. En effet, ils expliquent que les contraintes du secteur, la complexité des projets et l'obligation de se conformer à de strictes réglementations les obligent à adopter une méthodologie traditionnelle.

Les répondants portent une attention particulière aux processus du PMI, principalement lors des phases d'initialisation et de planification. Cette observation va dans le sens de l'étude de Khayyat (2022). En effet, ils mettent en avant l'importance de bien comprendre les besoins du client (gestion du périmètre), de bien identifier les risques (gestion des risques) et de proposer un échéancier de référence clair et réaliste (gestion de l'échéancier).

Pour ces professionnels, l'approche traditionnelle (ou *Waterfall*) permet de bien débiter le projet et de s'aligner sur les objectifs corporatifs. Ainsi, l'étape de la structure de découpage de projet (ou *WBS*) est une donnée d'entrée pour l'identification des jalons et des indicateurs de performance du projet.

C'est également une étape importante pour les gestionnaires principaux, pour identifier les étapes critiques du projet et comprendre les informations qui seront transmises par la suite, lors des activités de suivi de projet (*reporting*).

Tout de même, on observe une adaptation des procédures classiques, selon le contexte, et un effort particulier des organisations à construire un guide de bonne pratique en gestion de projet. On y retrouve également des gabarits (ou *template*), des registres des projets passés, des retours d'expériences ou des modèles de base.

Ainsi, pour les gestionnaires de projet majeurs ou les gestionnaires de programmes, l'approche rigide et fiable permet de rencontrer les exigences des différents organismes de certification (Transport Canada, FAA, ou AESA). Néanmoins, certains répondants évoluant à des niveaux plus micros mettent en avant d'autres pratiques, utilisées dans leur quotidien.

On observe l'utilisation de la méthodologie Agile, principalement dans les projets purement *software*. Que ce soit pour construire le logiciel de guidage d'une fusée, concevoir le système d'exploitation de l'interface utilisateur, ou bien lors des phases de design itératives, les équipes projets utilisent très souvent l'approche Agile comme l'explique Anatolyevich et al. (2021).

Les répondants indiquent que l'approche Agile est généralement appliquée à certaines phases spécifiques ou à des sous-projets : principalement pour la programmation, la gestion de modules techniques isolés (*software* ou *hardware*) ou pour la planification à court terme.

Ils citent également l'utilisation de pratiques particulières, telles que l'utilisation du SCRUM, des tableaux KANBAN (souvent dans Jira) et des *Sprints*, ce qui confirme les conclusions de Fernandes et França (2015).

Plusieurs participants observent une progression de cette culture Agile dans leurs organisations, portée par les nouvelles générations, les départements numériques, ou les exigences des partenaires internationaux. Comme l'explique un participant, « nous devons aller vite ! Être agile aujourd'hui est devenu indispensable dans l'environnement hautement compétitif dans lequel nous évoluons. »

Peu importe la méthodologie utilisée par les organisations, la totalité des répondants indique participer à des activités de suivis, en lien avec le suivi des tâches, la gestion des coûts et des échéanciers, et la gestion des risques.

Le Tableau 14 ci-dessous regroupe les réponses des participants au sujet du contenu de ces activités :

Tableau 14 - Indicateurs lors des activités de suivi

<u>Indicateurs</u>	<u>Fréquences des activités de suivi</u>	<u>Cible - Auditoire</u>
Ordonnancement des tâches. Gestion des priorités.	Quotidien	Équipe projet Sous-traitants
Livraison des lots de travail. Indicateur de performance (retard, dépassement de coût)	Hebdomadaire	Équipe projet et gestionnaire direct
Coût – Qualité Risques critiques Périmètre	Mensuel	Management / Vice-Président
Risques Indicateur VA ⁵	Trimestriel	Équipe programme - Spécialiste
Dépend des objectifs de chaque compagnie	Annuel	Organisation complète

⁵ Valeur acquise (VA) : cet indicateur est utilisé seulement dans certaines organisations.

Les activités de suivi occupent une place centrale dans la gestion des projets analysés. Selon les répondants, elles se déclinent à différents niveaux de fréquence et de formalisme, selon la taille de l'organisation, la culture interne et le degré de complexité du projet.

Dans de nombreuses entreprises, des suivis quotidiens sont organisés sous forme de rencontres brèves, souvent qualifiées de *stand-up* ou *daily meetings*. Ces rencontres visent principalement à maintenir la coordination opérationnelle, à identifier rapidement les obstacles et à ajuster les priorités à court terme. Ce type de suivi est davantage observé dans les organisations qui ont intégré certaines pratiques agiles, même de manière partielle.

À une fréquence hebdomadaire, la majorité des répondants évoquent des réunions structurées permettant de faire le point sur l'avancement global du projet. Ces suivis hebdomadaires incluent généralement l'actualisation des livrables, le calcul du pourcentage d'avancement, ainsi qu'une analyse des écarts entre les prévisions et la réalité. Ils servent de support à la prise de décision au sein des équipes projet et permettent un suivi plus rigoureux de la performance. On y observe l'utilisation d'outils technologiques pour animer et illustrer ces suivis, et offrir un résumé clair aux gestionnaires.

Dans les organisations plus matures sur le plan méthodologique en gestion de projet, on observe également la tenue de revues de projet mensuelles, parfois en présence de la direction ou des clients. Ces rencontres permettent de passer en revue les indicateurs clés, tels que les indices de performance en coûts et en délais (CPI, SPI), d'évaluer les risques, de valider les jalons atteints, et de réajuster la planification si nécessaire. Elles s'inscrivent dans une logique de gouvernance structurée, souvent portée par un bureau de projet ou une direction technique, comme l'explique l'étude de Dickinson (2008).

Les outils utilisés pour le suivi varient d'un contexte à l'autre. Certains répondants mentionnent l'usage de tableaux de bord automatisés, développés sur des plateformes comme Power BI, Jira ou Excel, tandis que d'autres utilisent encore des rapports plus narratifs, rédigés manuellement. Plusieurs soulignent que la valeur du suivi repose avant tout sur la régularité et la rigueur des pratiques, davantage que sur les outils eux-mêmes.

Enfin, des différences notables apparaissent entre les grandes entreprises et les structures de plus petite taille. Dans les premières, les processus de suivi sont souvent normés, documentés et intégrés à des cycles formels de revue. Dans les secondes, les suivis sont généralement plus souples, moins documentés, mais aussi parfois plus réactifs, ce qui peut offrir un certain avantage en termes d'adaptabilité.

Les professionnels rencontrés décrivent des visions corporatives contrastées selon les organisations, mais certaines tendances communes émergent. Dans plusieurs grandes entreprises, on observe une volonté affirmée d'intégrer les projets dans une stratégie globale orientée vers l'innovation, la transformation numérique et l'amélioration continue. Dans ces cas, les pratiques de gestion de projet sont soutenues par des structures formelles telles que les bureaux de projets, les directions techniques ou les cellules de transformation, et les outils numériques sont perçus comme des leviers stratégiques. On observe également l'adoption d'une culture Lean, ou la méthodologie *Define, Measure, Analyze, Improve and Control* (DMAIC) est implantée dans l'ensemble de l'organisation, comme l'expliquent Haque et Moore (2005).

Toutefois, cette orientation stratégique n'est pas toujours perçue de manière claire au niveau opérationnel. Certains participants soulignent une forme de décalage entre le discours porté par la direction et les réalités du terrain, où les équipes doivent souvent composer avec des ressources limitées, des outils mal adaptés ou des processus contraignants. Ce manque de cohérence peut affaiblir l'adhésion aux orientations technologiques de l'entreprise.

Dans les structures de plus petite taille ou dans certaines unités plus autonomes, la vision corporative semble davantage orientée vers la satisfaction client et la livraison efficace des projets, avec une attention plus ponctuelle portée à la dimension technologique. Dans ces cas, les décisions en matière d'outils ou de méthodes sont souvent dictées par les contraintes du moment, et non par une volonté stratégique affirmée.

Plusieurs intervenants insistent sur l'importance d'un leadership engagé pour assurer un alignement réel entre la stratégie d'entreprise et les pratiques de gestion de projet, soutenant les conclusions de Nixon et al. (2012). Comme l'explique un professionnel, « avoir la bonne personne à la bonne place, c'est la preuve qu'un gestionnaire saisit vraiment l'impact que son style de leadership peut avoir sur son projet. »

Lorsque la direction soutient activement les initiatives, les équipes bénéficient d'une meilleure cohérence dans les choix technologiques et d'un environnement plus propice à l'innovation. À l'inverse, lorsque la vision corporative reste floue ou peu diffusée, les évolutions reposent souvent sur l'initiative individuelle de certains gestionnaires ou responsables de projet.

Enfin, quelques participants mentionnent des démarches récentes visant à renforcer ou clarifier cette vision à travers des feuilles de route numériques, des politiques d'innovation ou des stratégies de transformation organisationnelle. Ces efforts témoignent d'une prise de conscience croissante de la nécessité d'unifier les projets sous une orientation commune et partagée.

Dans l'ensemble, ils s'accordent à dire que le secteur aéronautique et aérospatial se distingue par un niveau d'exigence particulièrement élevé, tant sur le plan technique que réglementaire. La rigueur attendue, la traçabilité des actions, la gestion des risques, ainsi que les impératifs de conformité et de sécurité imposent une discipline constante dans la conduite des projets.

Ce contexte engendre un stress professionnel perçu comme important, notamment dans les phases critiques des projets (livraisons, audits, intégrations). Plusieurs professionnels mentionnent des charges de travail élevées, des délais serrés et une pression continue pour atteindre des objectifs ambitieux, souvent dans des environnements fortement encadrés.

Un répondant explique néanmoins que « l'aéronautique est un milieu tellement réglementé que le stress est moindre. Dans l'automobile, une erreur peut avoir de graves conséquences, mais dans l'aéronautique, tout est tellement vérifié et validé que ce genre de situation ne se produit pas. »

4.3.2.2 Approche hybride et concept d'équipe dédié

L'analyse des entretiens révèle une tendance marquée vers l'adoption d'approches méthodologiques hybrides dans la gestion de projets complexes, comme l'explique Parvez Alam et Toppur (2019). Ces approches résultent d'un compromis entre les exigences de structure imposées par le secteur (normes, traçabilité, validations formelles) et le besoin d'agilité opérationnelle, notamment dans les phases de développement technique ou logiciel. Il en résulte une cohabitation entre des méthodes séquentielles traditionnelles – comme le cycle en V ou les processus traditionnels – et des pratiques inspirées de l'Agile, appliquées à des segments spécifiques du projet, tel qu'expliqué par Anitha et al. (2013).

Chez un des leaders mondiaux par exemple, les différentes phases du projet de conception d'aéronefs comportent des *milestones*, et suivent un processus strict de validation, qui permet de passer à l'étape suivante, comme l'illustre la Figure 24 ci-dessous :

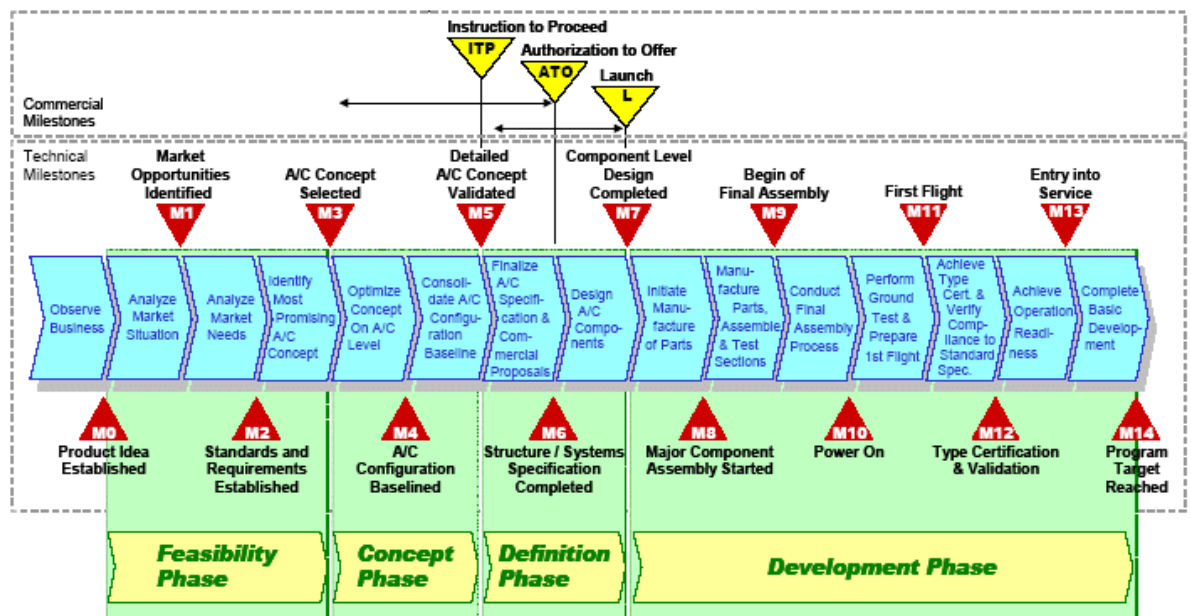


Figure 24 - M14 Milestone Concept - Image reproduite avec permission, tirée de C. Badufle Définition conceptuelle d'avions : vers une optimisation multiobjectif, robuste et incertaine (2009)

Cette hybridation méthodologique est rarement formalisée dans une documentation précise, mais elle est largement intégrée dans les pratiques quotidiennes. Elle se déploie de manière pragmatique, en fonction du contexte technique, des enjeux contractuels et du niveau de maturité des équipes. Elle permet notamment de mieux répondre aux imprévus, d'accélérer la prise de décision et d'adapter les priorités en fonction de l'évolution du projet, tout en conservant un cadre structurant compatible avec les exigences réglementaires du secteur aéronautique.

Également, on observe dans les discours recueillis l'importance accordée à la constitution d'équipes projet dédiées. Lorsque les ressources humaines sont mobilisées de façon stable sur un même mandat, on observe une meilleure cohérence dans l'exécution, une continuité dans les décisions et une réduction significative des pertes d'information. La présence d'un noyau d'équipe concentré sur un objectif commun favorise également la responsabilisation, renforce la dynamique de collaboration, et améliore la réactivité face aux enjeux techniques ou organisationnels.

À l'inverse, les contextes dans lesquels les ressources sont partagées entre plusieurs projets simultanément présentent davantage de défis en termes de coordination, de suivi et de priorisation. La surcharge, la dispersion des efforts et la multiplication des interfaces nuisent alors à la performance globale du projet.

Plusieurs observations mettent en lumière l'enjeu lié à la qualité des livrables et à l'expérience des ressources impliquées dans les projets. Une transition semble en cours entre une génération de professionnels aguerris, à l'origine des grands succès des années 2000, et une relève plus jeune, souvent moins expérimentée et parfois plus difficile à mobiliser de façon durable.

Dans l'ensemble, les projets bénéficiant à la fois d'une approche hybride bien assumée et d'une équipe projet dédiée apparaissent comme mieux alignés sur les objectifs de performance, tant en termes de qualité que de délais et d'efficacité.

4.3.2.3 Gouvernance et maturité des processus

L'examen transversal des entretiens permet de constater une variabilité importante dans les niveaux de gouvernance et de maturité des processus de gestion de projet, selon les organisations et la complexité de l'environnement commercial.

Dans certains cas, la gouvernance est formalisée, soutenue par des structures dédiées (telles que des bureaux de projet, des comités de direction ou des cellules d'amélioration continue) et appuyée par des processus bien établis de suivi, de validation et d'arbitrage. Ces structures offrent un cadre décisionnel clair, favorisent la cohérence des pratiques et assurent une certaine continuité dans les projets, même en contexte de changement organisationnel ou de roulement du personnel. On observe principalement cette maturité chez les leaders mondiaux ou bien dans l'industrie de l'A&D.

À l'inverse, d'autres organisations fonctionnent selon des logiques plus informelles, parfois réactives, où les décisions sont fortement dépendantes des individus en place, de leur expérience ou de leur capacité à influencer. Dans ces cas, la gestion de projet repose davantage sur l'agilité locale, l'initiative individuelle et la culture implicite de l'entreprise, plutôt que sur des processus codifiés. Cette absence de formalisme méthodologique peut générer des gains de flexibilité dans certaines phases du projet, mais elle tend également à accroître les risques liés à la coordination, à la qualité de l'information et à la stabilité des décisions. On observe ces comportements dans des centres de R&D, des équipementiers ou des entreprises spécialisées (intégrateur système, leaders de second plan).

Dans certaines organisations, des communautés de pratique en gestion de projet sont mises en place afin de favoriser le partage d'expériences, la mutualisation des savoirs et la participation à des activités de réseautage, dans une logique de renforcement des bonnes pratiques et de professionnalisation des équipes.

La maturité des processus semble ainsi étroitement liée à la structure organisationnelle, mais aussi à l'exposition de l'entreprise à des environnements normés ou réglementés.

Les entreprises opérant dans des chaînes d'approvisionnement certifiées ou dans des projets financés publiquement démontrent généralement un degré plus élevé de formalisation. Elles recourent plus systématiquement à des méthodes de revue de phase, à des matrices de responsabilités (RACI), ou à des outils de capitalisation comme les bilans de fin de projet.

Certains mettent en avant l'importance de suivre un cadre précis, appelé *system engineering process*, et qui combine des processus fiables et une approche itérative basée sur le besoin de l'utilisateur (le client), les éléments techniques du système et les différents départements impliqués. La Figure 25 illustre ce concept:

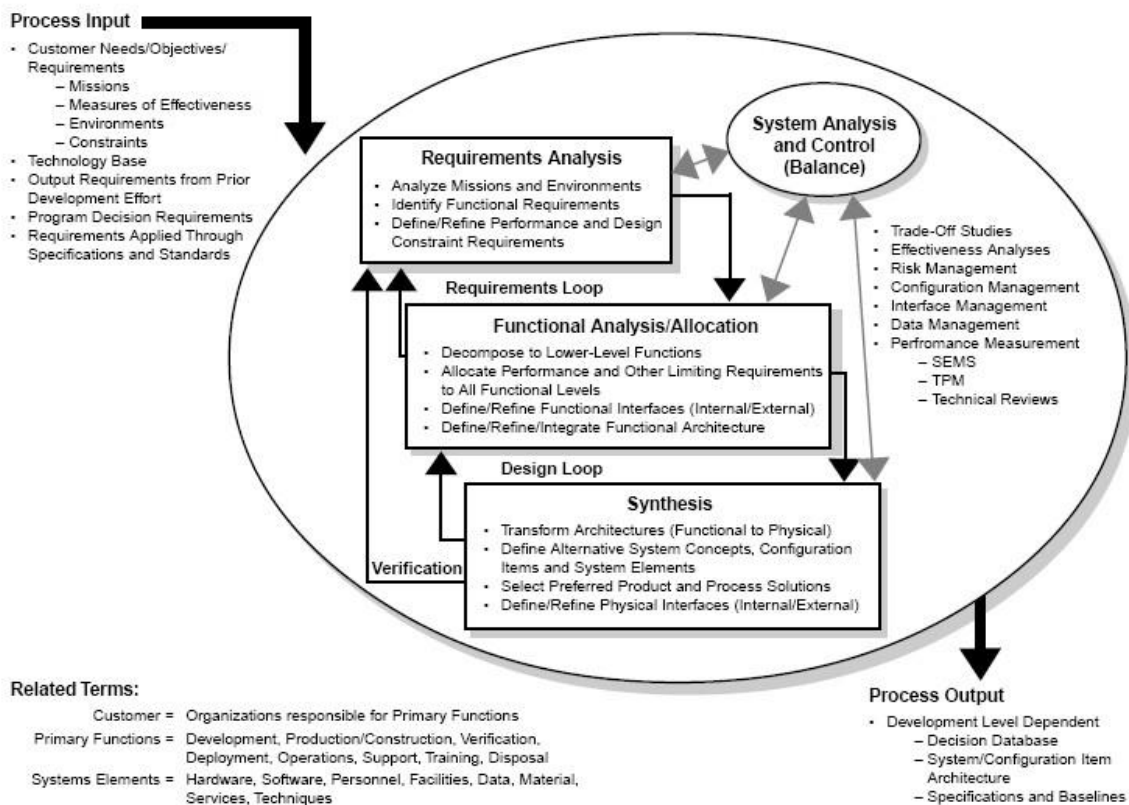


Figure 25 - *System Engineering Process* – Tiré de J. Lienig; H. Bruemmer (2017). *Fundamentals of Electronic Systems Design*. Springer International Publishing. pp. 6–7 - Image sous licence CC

Il est également observé que la maturité ne se déploie pas toujours de manière homogène à l'intérieur d'une même organisation. Certaines unités ou certains types de projets sont plus avancés que d'autres, notamment lorsque des exigences contractuelles, des partenariats internationaux ou une pression externe imposent un niveau plus élevé de traçabilité et de rigueur. Ce phénomène produit une forme de dualité : d'un côté, des pratiques stabilisées et encadrées ; de l'autre, des espaces de gestion plus souples, qui peuvent générer des tensions internes ou des écarts de performance entre projets. Cela s'explique également par la méthodologie hybride, qui permet une combinaison des deux formes de gestion.

Enfin, les données recueillies montrent que les efforts visant à structurer ou renforcer la gouvernance ne suffisent pas à eux seuls à garantir une performance accrue. La maturité des processus semble produire des effets positifs lorsqu'elle est accompagnée d'une culture de gestion partagée, d'une appropriation des outils et méthodes par les équipes, et d'un alignement réel entre les ambitions stratégiques et les pratiques opérationnelles.

Sans cette cohérence d'ensemble, les processus les plus aboutis risquent d'être perçus comme des contraintes administratives plutôt que comme des leviers d'efficacité.

4.3.2.4 Gestion des risques comme levier

Les données recueillies suggèrent que les efforts de structuration, en matière de gouvernance ou de maturité des processus, ne produisent des effets durables que lorsqu'ils s'accompagnent d'une culture organisationnelle propice à l'anticipation et à la gestion proactive des incertitudes. La gestion des risques apparaît dans ce contexte non seulement comme un mécanisme de protection, mais aussi comme un véritable levier stratégique, permettant d'orienter les décisions, de prioriser les ressources et de moduler l'intensité des contrôles en fonction du degré de maturité des technologies engagées.

Dans les phases en amont, la plupart des projets comportent une étape formelle de cartographie des risques. Celle-ci intervient généralement après l'analyse de faisabilité ou lors de l'élaboration du plan de projet. Cette phase permet d'identifier les risques techniques, organisationnels, financiers ou réglementaires associés au contexte spécifique du projet. Dans plusieurs cas, cette analyse est directement liée au niveau de maturité technologique des solutions envisagées, à travers une évaluation du TRL (*Technology Readiness Level*). Des risques sont alors anticipés non seulement en fonction des aléas classiques de projet, mais aussi selon le degré d'incertitude scientifique ou industrielle porté par les technologies elles-mêmes.

La Figure 26 détaille les différents niveaux de risque, en lien avec la technologie visée :

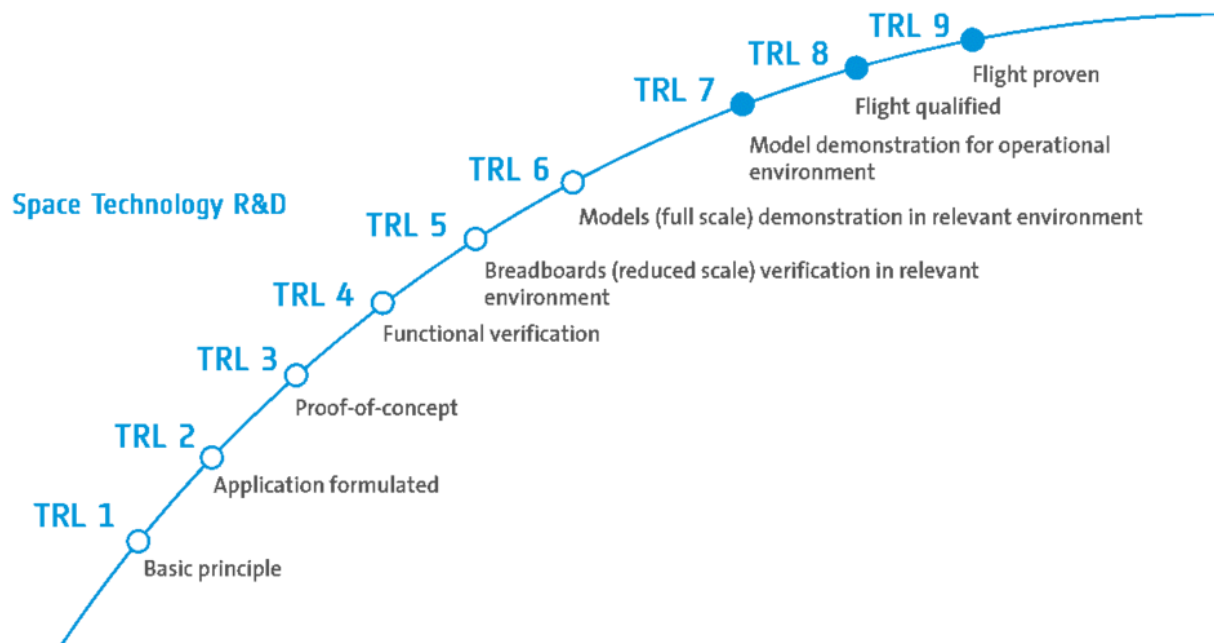


Figure 26 - Concept de TRL utilisé par l'ESA - Tiré du site web : https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/Shaping_the_Future/Technology_Readiness_Levels_TRL - Reproduit avec permission

Dans ce cas, les équipes qui souhaitent intégrer des TRL à score faible doivent prendre en compte le risque dans leur planification.

En cours de projet, le suivi des risques repose sur des revues périodiques (hebdomadaires, mensuelles ou à chaque jalon majeur). Ces moments de validation permettent de réévaluer les risques identifiés, d'actualiser leur probabilité ou leur impact, et d'intégrer de nouveaux éléments qui auraient émergé. Plusieurs professionnels rapportent l'utilisation de matrices d'analyse qualitative ou semi-quantitative, combinées à des registres de risques partagés au sein des équipes. Ce suivi est souvent couplé à des comités techniques ou des points de gouvernance pour favoriser la transparence et l'alignement sur les priorités.

L'exigence de conformité imposée par les organismes de réglementation et de certification contribue également à renforcer la nécessité d'une gestion des risques rigoureuse et bien structurée, perçue comme un élément incontournable pour répondre aux standards du secteur.

En ce qui concerne la mitigation, les stratégies varient selon la culture de l'organisation et la nature des projets. Certaines structures appliquent des plans de contingence détaillés, avec des actions préventives et des responsables désignés pour chaque risque majeur. D'autres adoptent une approche plus réactive, centrée sur la résolution rapide des problèmes lorsqu'ils se manifestent. Dans plusieurs cas, le recours à des prototypes, des maquettes numériques ou des essais intermédiaires est mentionné comme moyen de réduire l'incertitude dès les premières phases du développement. Cette logique de mitigation progressive s'inscrit souvent dans un découpage du projet par niveau de maturité technique, avec des validations incrémentales adaptées aux étapes critiques (intégration, certification, industrialisation).

Dans l'ensemble, les pratiques de gestion des risques témoignent d'une certaine maturité collective dans les projets les plus complexes, dans lesquels l'incertitude est acceptée comme une composante inhérente du développement technologique. Toutefois, des écarts persistent selon la taille des entreprises, la disponibilité des outils, et la capacité des équipes à institutionnaliser une démarche structurée plutôt que de la traiter comme un exercice ponctuel.

4.3.3 Performance des projets

4.3.3.1 Stratégies de gestion de la performance

Les témoignages recueillis permettent d'identifier plusieurs facteurs convergents dans les projets jugés réussis ou performants. Ces projets sont décrits comme ayant atteint leurs objectifs en termes de délais, de qualité technique, d'innovation ou de satisfaction client. Au-delà des résultats, ce sont les conditions de réalisation qui sont souvent mises en avant pour expliquer cette performance.

Les projets considérés comme performants partagent généralement une définition claire des objectifs dès les phases de démarrage. Cette clarté se manifeste par un alignement entre les parties prenantes, une compréhension commune des attentes du client et une planification initiale réaliste. Lorsque les livrables sont bien définis et que le périmètre est stabilisé, les risques d'ambiguïté ou de dérive sont fortement réduits. Néanmoins, l'utilisation de la contingence dans l'estimation initiale de l'échéancier et du budget préliminaire est répandue. Selon les cas, les niveaux de contingence évoluent entre 5 à 25%, en fonction du risque, de la complexité technique et l'impact commercial. On note que c'est une stratégie efficace utilisée par les gestionnaires pour se donner les moyens d'atteindre les objectifs stratégiques.

Plusieurs cas sont associés à la présence d'une équipe projet dédiée, compétente et stable dans le temps. La constance dans l'implication des ressources, le niveau d'expérience et la qualité des interactions internes sont systématiquement cités comme des leviers majeurs de performance. Ces éléments facilitent la coordination, la capitalisation des connaissances et la capacité à résoudre rapidement les problèmes. On observe que plusieurs répondants accordent plus d'importance à ce critère, plutôt qu'à la négociation de budget ou d'un échéancier plus facilement atteignable.

Également, la circulation fluide de l'information, l'accès régulier aux décideurs, et l'implication du client ou de l'utilisateur final sont perçus comme des conditions essentielles.

Les projets performants sont souvent ceux où les boucles de rétroaction sont courtes, où les enjeux sont partagés en amont et où les attentes sont réalignées de manière proactive lorsqu'un décalage est détecté.

L'agilité dans la prise de décision et l'anticipation des risques sont des éléments récurrents dans les exemples de projets réussis. Lorsque les équipes sont capables d'identifier tôt les signaux faibles, de réévaluer les priorités et d'adapter la stratégie sans perdre de vue les objectifs globaux, la performance est perçue comme plus robuste. Le recours à des outils de gestion des risques, à des phases pilotes ou à des points d'arrêt structurants est souvent mentionné.

Certains abordent également la notion d'obligation, sur plusieurs aspects de la performance, qui les forcent, d'une certaine manière, à atteindre les niveaux de performance attendue. Ainsi, l'environnement très concurrentiel de certains marchés oblige les équipes à s'investir totalement, et travailler beaucoup pour réaliser le maximum de livrables en un temps limité. Également, une majorité des contrats étant signés à coût fixe (et non à montant remboursable), l'obligation de rentabilité incite les équipes à respecter leur engagement. En d'autres termes, la performance est une clé de la survie de l'entreprise. *A contrario*, dans le cas des projets publics, principalement dans la R&D, on observe des dépassements de coût ou d'échéanciers extrêmement élevés.

Enfin, plusieurs témoignages insistent sur l'importance du soutien actif de la direction et de la cohérence entre les priorités stratégiques de l'entreprise et la conduite du projet. Les projets les plus performants sont souvent ceux qui bénéficient d'une forte légitimité interne, de moyens adaptés, et d'un environnement organisationnel aligné sur les objectifs du mandat. Comme le souligne un répondant : « Quand la direction croit réellement au projet et le place au cœur de la stratégie de l'entreprise, tout devient plus fluide. Les décisions se prennent plus vite, les ressources suivent, et l'équipe sent qu'elle peut réussir. »

4.3.3.2 Facteur humain, différence culturelle et leadership

L'analyse des projets perçus comme performants met en évidence le rôle déterminant des facteurs humains dans la réussite des initiatives d'ingénierie. Au-delà des outils et des méthodes mobilisées, c'est la qualité des interactions, des comportements et des dynamiques relationnelles qui influence directement la performance des projets.

La cohésion de l'équipe, la motivation individuelle et la clarté des rôles sont fréquemment mentionnées comme des leviers favorisant l'efficacité collective. Lorsque les membres du projet se sentent engagés, valorisés et responsabilisés, leur capacité à collaborer, à s'adapter et à faire face aux imprévus s'en trouve renforcée, tel qu'explique Pereira et Lima (2018).

À l'inverse, les projets caractérisés par une forte rotation du personnel, des conflits non résolus ou un manque de coordination souffrent souvent de retards, de tensions internes et d'une perte de qualité dans les livrables.

Les entrevues ayant été réalisées dans trois pays et deux continents différents, on remarque une grande variation dans les réponses, selon l'implantation géographique des équipes gérant des projets complexes. Le Tableau 15 résume les points clés, en comparant cinq entreprises du secteur privé, dans les trois pays couverts par cette étude :

Tableau 15 - Différences culturelles impactant la performance des projets

	États-Unis	Canada	France
<i>Points ayant un impact positif sur la performance des projets</i>	Culture de la performance. Engagement des équipes. Capacité d'innovation importante. Grosse tolérance aux risques. Facilité à trouver des capitaux.	Bonne connaissance de la pratique en gestion de projet. Qualité des professionnels. Implication du management. Excellente maîtrise des risques.	Bonne maîtrise technique. Processus bien structuré et complet. Motivation des équipes. Volonté de devenir ou rester compétitif. Qualité des scientifiques/ingénieurs
<i>Points ayant un impact négatif sur la performance des projets</i>	Forte compétitivité interne. Management souvent toxique. Pression importante sur les gestionnaires et les équipes R&D.	Rigidité des processus. Lenteur dans les prises de décisions. Faible compétitivité sur les marchés internationaux.	Manque de flexibilité organisationnelle. Faible tolérance à l'échec. Centralisation des décisions et lenteur dans la capacité à décider Environnement d'affaires limité.

Ainsi, chaque région présente des atouts spécifiques, mais aussi des contraintes propres, qui influencent la manière dont les projets sont pilotés, arbitrés et livrés. Ces différences doivent être prises en compte, en particulier dans les projets collaboratifs internationaux où l'alignement des cultures de gestion devient un enjeu stratégique.

On note tout de même une prépondérance plus importante du facteur culturel dans les entreprises françaises. En effet, plusieurs répondants nous expliquent que les failles du système organisationnel sont souvent explicables par des enjeux de pouvoir ou des guerres de territoires. Aux États-Unis, plusieurs participants notent que le multiculturalisme est également un facteur qui influe négativement sur la performance des projets. En effet, les gestionnaires doivent s'adapter à différentes cultures, religions ou pratiques sociales.

Le rôle du leadership émerge alors comme un autre facteur central et cela oriente positivement ou négativement la performance.

Dans les projets performants, la présence d'un leader reconnu, capable de donner une direction claire, de mobiliser les énergies, de trancher en situation d'incertitude et de créer un espace de dialogue, est souvent déterminante. Ce qu'explique parfaitement Nixon et al. (2012) en soulignant l'importance d'ajuster le modèle aux différentes situations. Le leadership est perçu ici moins comme une fonction hiérarchique que comme une posture relationnelle : il s'agit de guider sans imposer, de soutenir sans contrôler, et d'incarner une vision, tout en demeurant à l'écoute du terrain. C'est assurément un facteur critique de succès des projets complexes dans l'industrie visée par cette recherche.

Dans l'ensemble, ces dimensions humaines et culturelles apparaissent comme des catalyseurs ou, au contraire, comme des freins majeurs à la performance. Leur impact dépasse souvent celui des aspects strictement techniques ou méthodologiques, et invite à reconnaître que la gestion de projet dans les environnements complexes repose tout autant sur la compétence relationnelle que sur la maîtrise des outils technologiques.

4.3.3.3 Clarté du périmètre et alignement sur les attentes

Les données recueillies confirment que la clarté des objectifs et du périmètre constitue un fondement central à la performance des projets d'ingénierie complexes. Cette clarté, lorsqu'elle est établie dès les premières phases du projet, permet non seulement de cadrer les efforts des équipes, mais aussi de prévenir les risques de dérives, d'ambiguïtés ou de retravail. Plusieurs professionnels soulignent que les projets les plus performants sont ceux dont le périmètre a été défini de manière réaliste, documentée et partagée entre l'ensemble des parties prenantes.

Étant donné que de nombreux projets sont marqués par une forte complexité technique, l'un des facteurs d'échec fréquemment mentionné réside dans la capacité des équipes à concrétiser les innovations requises. Que ce soit dans le cadre de la conquête spatiale, du développement de moteurs d'avion plus performants et économes en carburant, de la conception de satellites de communication en série (constellations), ou de la fabrication de lanceurs réutilisables, une mauvaise compréhension du cahier des charges peut rapidement entraîner des dépassements de coûts ou de délais.

Certains mentionnent l'utilité d'ateliers de lancement, de revues de jalons contractuels, ou de comités conjoints client-fournisseur pour maintenir cet alignement tout au long du projet. Cette pratique permet d'éviter l'écart progressif entre la réalité du développement et la vision initiale, qui, selon plusieurs témoignages, est à l'origine de tensions fréquentes lors des phases de validation ou de livraison.

Dans le même temps, l'alignement sur les attentes du client apparaît comme un facteur complémentaire et tout aussi déterminant. Lorsque les équipes internes, la direction et les représentants du client convergent autour d'une même compréhension des enjeux, des priorités et des critères de succès, la dynamique projet s'en trouve considérablement renforcée. Les décisions sont plus rapides, les arbitrages sont facilités, et les écarts d'interprétation sont limités.

À l'inverse, un décalage — même partiel — entre les objectifs du projet et les attentes du client entraîne souvent des frictions, des révisions de livrables et une perte d'efficacité collective.

Comme la complexité amène un grand nombre de changements, de modifications et d'ajustements, la gestion efficace des attentes des parties prenantes est un processus que les gestionnaires doivent privilégier. En raison du rôle déterminant joué par les organismes de certification et de réglementation, les gestionnaires doivent en permanence assurer la cohérence entre les objectifs du projet, les capacités techniques des équipes et les exigences d'approbation.

Également, il est possible d'observer que cette notion d'alignement va au-delà d'un simple exercice de clarification technique : elle engage une capacité des organisations à créer un espace de dialogue structuré, à maintenir une communication continue et à ajuster les engagements en fonction de l'évolution des besoins. La clarté et l'alignement ne sont donc pas des acquis ponctuels, mais des processus à entretenir tout au long du cycle de vie du projet.

Ainsi, la précision des objectifs et du périmètre, conjuguée à un alignement constant avec les attentes du client, constitue une condition essentielle à la maîtrise des délais, à la qualité des livrables et à la mobilisation des équipes. Ces éléments sont perçus comme des marqueurs de maturité dans la gestion de projet, particulièrement dans les environnements à forte complexité technologique ou réglementaire.

4.3.3.4 Usage des indicateurs de performances

Les données recueillies indiquent que la méthode de la valeur acquise (EVM) est effectivement utilisée dans plusieurs organisations à la maturité avancée. Cette approche permet aux gestionnaires de projet de mesurer de manière intégrée les écarts entre l'avancement physique du projet, les coûts engagés et le plan budgétaire initial.

Comme l'explique l'étude de Krol et al. (2020), il est nécessaire de combiner indicateurs opérationnels, stratégiques et de maturité numérique, pour capturer l'effet des outils technologiques sur la performance globale.

Les professionnels mentionnant explicitement l'usage de l'EVM soulignent son utilité pour anticiper les dérives et soutenir la prise de décision stratégique. Dans certains cas, la méthode est intégrée à des outils de gestion centralisés (Planisware, MS Project, Power BI), avec des tableaux de bord automatisés permettant une revue périodique des indicateurs clés, comme le SPI et le CPI. Ces outils favorisent une meilleure transparence des données, notamment à destination des parties prenantes internes (direction, bureau de projet) ou externes (clients, autorités de financement), ce qui confirme les conclusions de Kerzner (2011).

Cependant, l'analyse montre également que l'utilisation de la valeur acquise reste hétérogène. Dans plusieurs organisations, cette méthode n'est appliquée que partiellement, souvent à l'échelle de projets critiques ou contractuellement encadrés. Certains répondants signalent des obstacles liés à la lourdeur des mises à jour, à la fiabilité des données d'entrée ou au manque de formation des équipes sur l'interprétation des résultats.

On note tout de même que la présence de l'EVM au sein des pratiques témoigne d'une volonté de professionnaliser le pilotage des projets, en s'appuyant sur des référentiels normés. Toutefois, sa mise en œuvre dépend fortement du contexte organisationnel, des outils disponibles et de la culture de gestion en place. Lorsqu'elle est bien intégrée, la valeur acquise permet une gestion proactive et rigoureuse des performances en coûts et en délais.

Notant ceci, on remarque que les indicateurs relatifs au coût (CPI) et au délai (SPI) sont plus largement maîtrisés et popularisés, à travers des organisations plus matures. Plusieurs participants mentionnent l'utilisation explicite de ces indicateurs pour suivre l'avancement des projets et soutenir les décisions. Ils sont, eux aussi, souvent intégrés dans des outils de suivi comme Power BI ou Planisware, permettant une revue régulière de l'état d'avancement technique et financier.

Leur pertinence repose néanmoins sur la qualité des données d'entrée et la capacité des équipes à interpréter les écarts de manière proactive.

On retrouve, selon les organisations, d'autres indicateurs de performance (KPI), selon les besoins de chaque entité. Également, selon la méthodologie utilisée, les indicateurs mesurables varient. Le Tableau 16 résume les différents indicateurs observés, et les situations dans lesquelles ils s'utilisent.

Tableau 16 - Autres exemples d'indicateurs utilisés par les équipes projets

Contexte	Indicateurs observés	Niveau d'interprétation ou d'utilisation
Équipe Agile (SCRUM)	Taux de complétion des <i>stories</i> , respect des objectifs du sprint, vélocité de l'équipe	<i>Product Owner</i> , <i>Scrum Master</i> et l'équipe de développement
Utilisateur de la méthode du Cycle en V	% d'avancement par phase, taux de conformité aux exigences techniques, temps de cycle par phase	Ingénieur projet, gestionnaire d'équipe technique, chargé de projet
<i>System Engineering</i>	Gestion des exigences (traçabilité, validation), niveau de complétude V&V (vérification et validation), robustesse des interfaces	Ingénieur projet, gestionnaire d'équipe technique
Design par <i>Milestone</i> déterminé	Niveau d'achèvement de phases critiques (PDR, CDR) ⁶ , nombre de replanification nécessaires, délai moyen des validations et des approbations	Gestionnaire de projet, responsable de lot, membres de l'équipe technique

⁶ PDR : Revue de Conception Préliminaire (Preliminary Design Review) CDR : Revue de Conception Critique (Critical Design Review)

4.3.4 Liens avec les propositions du cadre conceptuel

À la lumière de l'analyse des résultats et de l'émergence des principales thématiques, il est désormais possible d'établir des liens pertinents avec les deux propositions formulées dans le cadre conceptuel. Ces propositions, qui visaient à explorer l'influence de l'utilisation des technologies et des méthodologies en gestion de projet sur la performance des projets d'ingénierie complexes, trouvent un écho direct dans les données recueillies. La section suivante présente ces correspondances, en illustrant de quelle manière les observations issues du terrain soutiennent ou nuancent les propositions initiales.

4.3.4.1 Lien avec la proposition P1

La proposition P1 prévoit que l'utilisation des solutions et outils numériques au sein de projet d'ingénierie sont associés à une meilleure performance.

La quasi-totalité des participants indique que leur organisation utilise des solutions numériques, principalement pour la gestion de projet (MS Project, Jira, Confluence), la planification, la gestion documentaire et la collaboration d'équipe. Également, l'ensemble des répondants confirment que les outils numériques dédiés à l'ingénierie complexe sont indispensables et largement implantés dans les organisations.

On observe donc des liens explicites entre l'implantation de logiciels spécialisés (ERP, PLM, outils de simulation et autres) et une augmentation mesurable de la performance, notamment en ce qui concerne la gestion des changements, la réduction des erreurs et la traçabilité des actions, comme l'expliquent Betia et al. (2023).

Également, plusieurs témoignages font état d'une amélioration de la visibilité sur les échéanciers et d'un meilleur respect des délais grâce à des outils, les tableaux de bord automatisés et les plateformes de suivi.

Du point de vue des gestionnaires de projets, le consensus apparaît autour de l'utilisation de trois principaux outils :

- Le ERP, comme outil principal, permettant de centraliser l'information, gérer les finances, l'assignation des ressources, les approvisionnements. C'est le cœur numérique des organisations, et on observe la prépondérance de l'outil SAP, dans le secteur aéronautique et aérospatial.
- Le logiciel de gestion de projet, utilisé pour l'ordonnancement des tâches, le suivi des actions, le *reporting*. On peut noter que MS Project, Jira et Confluence sont les outils les plus souvent cités.
- Les outils « sur-mesure », qui, selon les entreprises, sont développés pour répondre à un besoin spécifique (gestion de risques, suivi des tâches, l'approbation de jalons, etc.).

Les discussions ont mis en lumière la forte dépendance des gestionnaires à ces outils dans leur environnement de travail quotidien. Néanmoins, ces solutions leur permettent de maintenir un haut niveau d'efficacité, en cohérence avec les objectifs organisationnels, tout en répondant aux enjeux et problématiques récurrents. Le suivi des indicateurs de performance à travers ces différents outils contribue ainsi à une meilleure maîtrise des dimensions clés du projet, telles que les coûts, les délais et le périmètre.

Du point de vue des ingénieurs ou des membres techniques des équipes, on observe également un croisement des résultats et l'identification de plusieurs catégories d'outils :

- On retrouve bien entendu une utilisation partielle des plateformes collaboratives, pour le suivi des tâches, la priorisation et la mise à jour des statuts. Souvent, MS Teams, Jira ou Confluence sont utilisées.
- Les outils digitaux de conception assistés par ordinateur. Selon l'usage (électronique, mécanique, fluide, etc.) les logiciels sont différents, mais les plateformes Dassault Systèmes et Siemens sont privilégiés. On retrouve également souvent un PLM, qui permet de centraliser la gestion documentaire (les plans et dessins).
- Les solutions « sur mesure » ou les outils dédiés pour la simulation. En effet, la majorité des participants expliquent que les phases d'ingénierie ne nécessitent pas l'utilisation d'outils tous au même moment. Selon la phase, on observe l'utilisation d'imprimante 3D pour le prototypage, la simulation assistée par ordinateur pour tester des hypothèses ou l'IA générative.

L'analyse des entrevues révèle que la puissance des outils actuellement disponibles pour les ressources techniques contribue significativement à accroître l'efficacité des équipes, et, par conséquent, la performance des projets d'ingénierie complexes. Par ailleurs, l'adoption de nouvelles technologies, ainsi que l'intérêt croissant pour les solutions émergentes basées sur l'intelligence artificielle, représente un atout stratégique pour les ingénieurs évoluant dans des environnements techniques exigeants.

Bien entendu, les participants mettent en avant que l'utilisation de ces différents et nombreux outils nécessite une attention particulière autour de la collaboration et la communication. Comme l'indique Schlotterbeck (2021), la qualité de l'interconnexion et le partage des données sont indispensables pour bénéficier de l'effet multiplicateur de la puissance des différents outils informatiques.

La performance est donc liée à une bonne compréhension des systèmes, une intégration entre les plateformes et la qualité des données exploitées ou traitées.

Sur ce dernier point, Hicks et al. (2020) confirment que l'exploitation des données numériques générées au cours d'un projet (modèles CAO, courriels, rapports, etc.) permet d'améliorer significativement la performance en offrant une visibilité accrue sur les interdépendances, les risques et l'avancement des travaux.

Il convient toutefois de souligner que les observations issues de cette étude ne permettent pas, à ce stade, d'établir un lien clair entre l'utilisation de l'intelligence artificielle et l'amélioration de la performance des projets d'ingénierie complexes. Comme le rappellent Yüksel et al. (2023), l'IA offre un potentiel considérable pour optimiser le processus de conception, notamment en traitant des paramètres ambigus et en résolvant des problématiques complexes échappant aux méthodes conventionnelles. Néanmoins, les entretiens révèlent que son adoption demeure limitée, souvent restreinte à des usages spécifiques confiés à des experts dédiés. On observe toutefois un vif intérêt de la part des organisations pour un déploiement plus large, visant à intégrer ces technologies de manière transversale et à en faire bénéficier l'ensemble des parties prenantes.

Nous pouvons ainsi avancer que globalement, les solutions technologiques et les outils numériques participent à améliorer la performance des projets, ce qui confirme l'acceptation de la proposition P1.

4.3.4.2 Lien avec la proposition P2

La proposition P2 prévoit que l'utilisation d'une méthodologie hybride ou Agile participe à atteindre une meilleure performance.

Plusieurs répondants mentionnent l'utilisation d'une approche hybride comme solution pragmatique pour répondre à la complexité des projets d'ingénierie. Cette combinaison permettrait de tirer parti de la rigueur des méthodes traditionnelles (cycle en V, jalons, exigences réglementaires) tout en bénéficiant de la souplesse et de l'adaptabilité des méthodes Agiles. Cela soutient les travaux de Parvez Alam et Toppur (2019) qui confirment que le modèle hybride :

- Maintient un contrôle strict sur les phases réglementaires,
- Intègre des sprints agiles pour améliorer la réactivité et l'apprentissage continu,
- Optimise les échanges entre les équipes techniques et les parties prenantes, favorisant l'alignement et la réduction des retards ou erreurs éventuelles

Également, le modèle hybride favoriserait une communication plus fluide, notamment grâce à des itérations régulières, des points de synchronisation et une implication accrue des utilisateurs finaux. Cela contribue à une meilleure compréhension des besoins et à une réduction des erreurs de conception. Par le fait même, les projets gardent une meilleure trajectoire et sont en mesure d'atteindre ou même dépasser le niveau d'exigence attendue. Ce qui rejoint les travaux de Krupa et Hajek (2022), qui étayaient également l'idée que l'adoption structurée d'une approche hybride, bien conditionnée par un cadre organisationnel mature, est un levier convaincant d'optimisation de la performance des projets d'ingénierie complexes.

Aussi, les entretiens soulignent que les projets utilisant une méthode hybride s'adaptent plus rapidement aux changements d'exigences ou de priorités, ce qui renforce la performance en termes de délai et de satisfaction client.

Certains gestionnaires associent clairement l'amélioration de la performance (respect du périmètre, qualité, *time-to-market*) à l'adoption d'un mode de gestion plus agile, notamment dans des environnements techniques en constante évolution.

En ce sens, l'étude d'Anatolyevich et al. (2021) confirme que l'alliance d'agilité et de formalisme est non seulement possible dans les environnements complexes, mais qu'elle constitue une approche prometteuse pour concilier sécurité, qualité et performance dans les projets spatiaux.

L'hybridation des méthodologies peut prendre des formes variées. Selon la structure organisationnelle et les besoins particuliers du projet, les équipes choisissent souvent de combiner différentes approches afin de capitaliser sur les avantages spécifiques de chacune. On observe ainsi l'intégration de cadres tels que SCRUM ou la méthode LEAN (notamment le cycle DMAIC), en complément des processus de gestion traditionnels.

Cependant, on remarque que dans les secteurs fortement normés (aéronautique, défense), plusieurs répondants précisent que la méthode traditionnelle reste incontournable pour les étapes critiques. L'agilité est alors utilisée en complément, jamais en substitution.

De manière concrète, le modèle traditionnel demeure essentiel pour encadrer les processus fondamentaux ainsi que les phases de certification.

Les exemples suivants, tirés des entrevues, illustrent l'application du modèle traditionnel dans la gestion de projets d'ingénierie complexes :

- Échéancier de référence (*base-line*)
- Méthode de découpage de projet ou *work breakdown structure* (WBS)
- Gestion des demandes de changements liés au cahier des charges
- Activités de suivis auprès du management, du client ou des *sponsors*
- Gestion de risque (utilisation de matrice classique)
- Gestion du budget

L'environnement classique offre alors une panoplie d'outils qui permettent aux équipes de garder une maîtrise efficace en lien avec les coûts, l'échéancier et le périmètre/qualité.

On observe également de grande disparité lors de l'utilisation de méthodologie alternative, au sein des grandes organisations. L'efficacité de l'agilité dépend alors de la culture d'entreprise, de la formation des équipes et du soutien managérial. Sans ces éléments, la méthode peut générer confusion ou inefficacité.

L'étude de Bart (2024) confirme que, bien qu'une démarche Agile adaptée puisse accélérer le développement tout en améliorant la flexibilité, son implémentation dans des domaines hautement réglementés comme l'aérospatiale requiert des ajustements significatifs : automatisation de la conformité, contrôle rigoureux de la sécurité, documentation efficace et support organisationnel.

Dans le même esprit, l'étude d'Özdenizci Köse (2021) et celle de Carpenter et Dagnino (2014) mettent en lumière l'importance de la maturité des équipes pour assurer une application efficace de l'Agile, et discutent d'une approche structurée basée sur la gestion des processus métiers pour accompagner cette montée en compétence.

À la lumière de ces observations, la proposition P2 ne peut être totalement confirmée. On note que l'adoption de méthodologies hybrides ou agiles contribue à l'amélioration de la performance des projets, mais pas au détriment de la méthode traditionnelle.

4.3.4.3 Synthèse interprétative : vers une proposition de modèle amélioré

À la lumière de l'analyse des 25 entrevues, menée en réponse aux questions de recherche définies au Chapitre 2, une tendance émerge des propos des participants. En explorant à la fois les outils technologiques utilisés et les approches méthodologiques encadrant la gestion de projets complexes dans les secteurs aéronautique et aérospatial, les répondants mettent en évidence une combinaison jugée particulièrement efficace. La Figure 27 illustre cette combinaison :

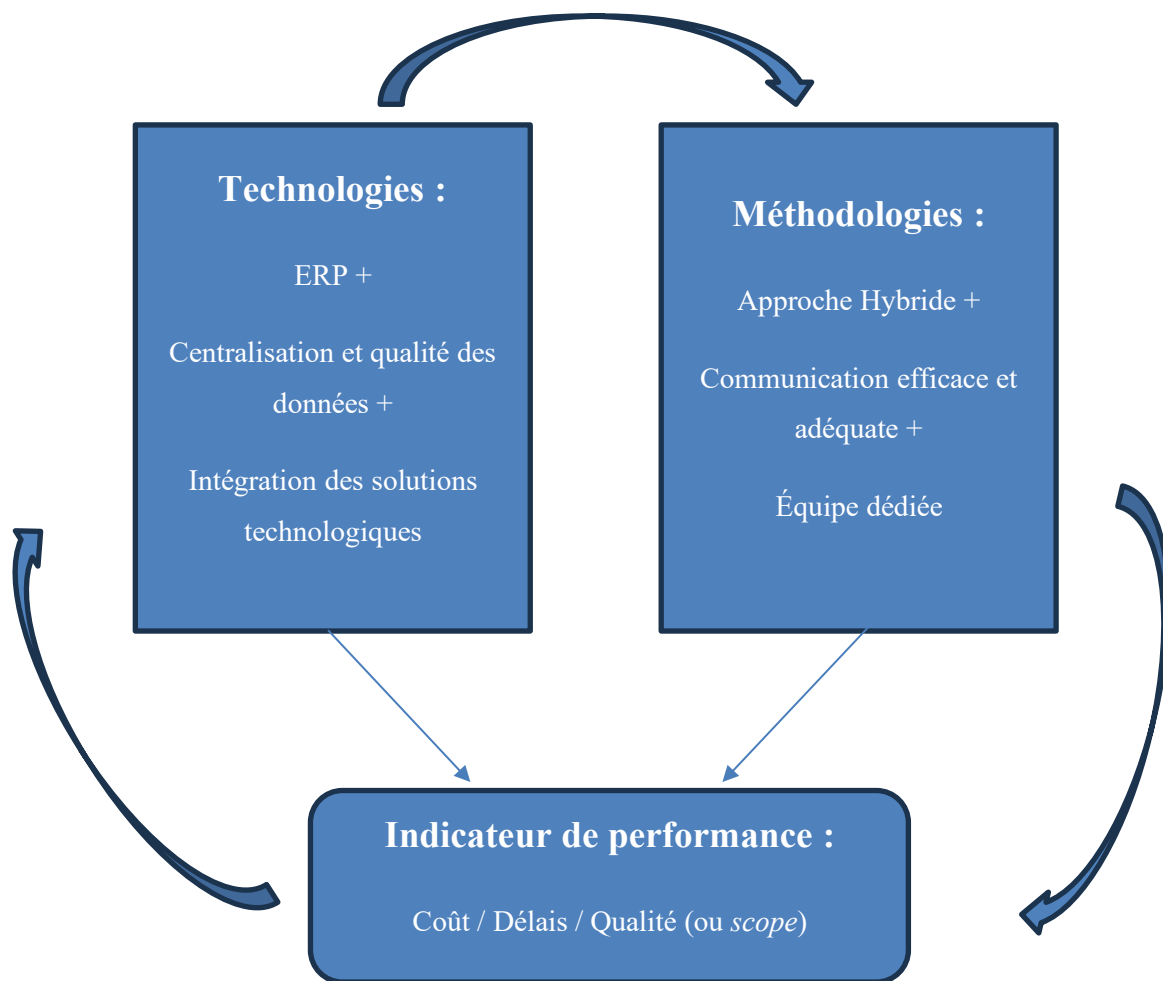


Figure 27 - Combinaison d'outils et de méthodologies favorisant l'amélioration de la performance des projets

Les résultats mettent en évidence une convergence entre les propositions P1 et P2. Il apparaît que l'alliance entre des outils technologiques adaptés et une méthodologie bien choisie contribue à améliorer la qualité du suivi des indicateurs de performance, et, par conséquent, à renforcer la performance globale du projet.

4.4 DISCUSSION DES RESULTATS

Ce mémoire s'inscrit dans une démarche d'analyse des facteurs qui sont associés à la performance des projets d'ingénierie complexes dans les secteurs aéronautique et aérospatial, à travers le prisme de l'implantation de nouvelles technologies et de l'utilisation d'une méthodologie en gestion de projet.

La problématique générale de cette recherche vise à comprendre dans quelle mesure l'adoption de solutions technologiques avancées et de pratiques méthodologiques Agile et hybride peut contribuer à améliorer la performance des projets d'ingénierie.

Deux propositions structurent cette réflexion :

- **P1** : L'utilisation des solutions et outils numériques au sein de projet d'ingénierie contribue à l'amélioration de la performance.
- **P2** : Les méthodologies Agile ou Hybride sont associés à une amélioration de la performance des projets.

À la lumière des résultats, les sous-sections suivantes détaillent dans quelle mesure l'étude a permis de répondre aux différentes propositions.

4.4.1 Mise en évidence des similarités et divergences dans les données

4.4.1.1 Thèmes émergents

Tout au long de la collecte de données, les participants ont eu l'occasion d'exposer leur point de vue sur les thématiques encadrés par l'étude. Néanmoins, les questions ouvertes leur donnaient l'occasion d'aborder des sujets connexes et apporter des nuances aux propositions que nous souhaitions valider.

En ce sens, les participants ont mis en avant trois thématiques à considérer, dans l'analyse de la problématique.

Le premier élément est l'importance d'une définition rigoureuse du périmètre. En effet, l'impact des variables de l'étude (outils technologiques et méthodologies) est atténué si le cahier des charges manque de clarté et si les objectifs du projet sont mal identifiés. Pour les participants, il s'agit d'une condition préalable à l'atteinte des cibles de performance exigées par le contexte. On observe que, dans certains cas, les projets peuvent être mis de côté, voire annulés, si le cadre défini ne permet pas aux équipes de comprendre clairement les attentes à l'origine de ce projet.

Le second élément concerne l'impact de l'aspect humain sur l'ensemble des activités du projet. La quasi-totalité des participants ont souligné l'importance des capacités interpersonnelles dans la performance finale. Qu'il s'agisse du leadership des gestionnaires, de la qualité des professionnels, de l'intégration de la gouvernance ou de l'expertise des équipes, on constate que l'humain demeure au cœur des critères contribuant à l'atteinte des objectifs. Ainsi, un déficit dans ces compétences peut avoir un impact plus critique que l'utilisation du mauvais outil ou de la mauvaise méthodologie.

Le troisième est le niveau de maturité inégale entre les différents membres des équipes (junior et senior). Autant dans la pratique en gestion de projet, la maîtrise des outils numériques ou le niveau d'expérience en développement de projets complexe, on observe une variation importante.

En lien avec l'objectif de cette recherche, ces constats présentent un caractère original. En effet, la littérature met en évidence une relation étroite entre technologie, méthodologie et performance, relation qui a été analysée tout au long de la présentation des résultats. On retrouve ces précisions dans nos discussions, ce qui confirme que la théorie du triangle de Barnes ne peut, à elle seule, expliquer la performance d'un projet. Au-delà de la triple-conainte, il faut considérer d'autres facteurs.

Ces éléments s'inscrivent pleinement dans la logique contingente, selon laquelle il n'existe pas de méthode de gestion universellement supérieure. La performance d'un projet découle plutôt de la cohérence entre l'approche choisie, le contexte organisationnel et les ressources humaines mobilisées, ainsi que de la capacité du gestionnaire à ajuster ses pratiques aux spécificités de chaque environnement.

4.4.1.2 Identification des points de convergences

L'étude confirme que la technologie est omniprésente dans les activités qui encadrent les projets d'ingénierie complexe dans les secteurs aéronautique et aérospatial. La majorité des participants indiquent qu'ils sont totalement dépendants des outils et solutions numériques pour effectuer leurs tâches quotidiennes. De plus, la qualité des données qu'ils produisent et exploitent leur permet de garder un contrôle proactif sur l'exécution du projet. Dans toutes les phases du projet, et quelle que soit la méthodologie utilisée, la technologie leur permet de gérer les activités, de piloter les coûts et les délais, d'organiser les tâches et d'optimiser les contraintes et les risques, afin de garantir l'atteinte des objectifs.

Du point de vue de l'ingénierie et du développement de produits et systèmes complexes, le constat est similaire. Les activités liées à la conception, à la simulation, à la fabrication et aux tests reposent sur l'utilisation de diverses technologies, permettant aux équipes de réduire les coûts, les délais et les risques. On note ainsi que la dépendance quasi totale à ces technologies crée des problématiques autour de l'architecture des systèmes informatiques et impose aux organisations de réduire leur dette technologique.

4.4.1.3 Identification des points de divergences

L'une des différences majeures qui ressortent de l'analyse des résultats est que l'adoption des technologies émergentes demeure inégale au sein du secteur. On observe ainsi une forte disparité entre les différents acteurs, malgré des cahiers des charges similaires et des ressources comparables. En particulier pour les technologies d'IA et de réalité virtuelle, seuls les leaders du secteur et certaines structures privées influentes sont en mesure de les intégrer efficacement et de se différencier de leurs concurrents.

Compte tenu de la situation économique et du besoin pour les États de préserver ou d'acquérir une souveraineté dans ce domaine, ces technologies représentent un atout indéniable. Dans l'aérospatiale, par exemple, certaines structures disposent de plusieurs décennies d'avance, alors que d'autres stagnent et peinent à livrer leurs projets dans les délais et objectifs initialement établis.

Si l'on analyse les données du point de vue des méthodologies utilisées dans le secteur, on constate également une différence importante. L'organisation du travail varie considérablement d'une organisation à l'autre. Ainsi, l'idée d'une méthodologie idéale garantissant la performance est erronée. On aurait pu s'attendre, après plusieurs décennies de conception, d'itérations et d'échecs, à voir émerger une structure d'organisation du travail capable de réduire les risques, d'optimiser les coûts et de respecter les délais.

Or, les entrevues réalisées révèlent plutôt une forte variabilité, principalement expliquée par trois facteurs :

- Dans le secteur, il existe peu de similarités entre les projets. Chaque opportunité commerciale apporte de nouveaux défis et de nouvelles contraintes, nécessitant l'adoption d'une méthodologie adaptée.
- Il y a très peu d'uniformisation dans la formation des gestionnaires en gestion de projet. Les leaders techniques sont souvent promus à des postes de gestion sans formation adéquate ni expérience dans la gestion des équipes.
- La rigueur méthodologique peine à se maintenir dans la durée. Certaines organisations peuvent implanter une approche sans la faire vivre adéquatement, ce qui conduit souvent à un abandon rapide et préjudiciable.

On observe ainsi que les organisations doivent choisir la méthodologie appropriée, en se basant sur les propres besoins, les bonnes pratiques du secteur et la capacité des équipes à les utiliser.

On peut également souligner une dernière divergence mineure. En effet, l'importance de la réglementation et de la certification sur les critères de performance n'a pas été évaluée en profondeur lors de la revue de littérature. Ainsi, lors des entretiens, une grande proportion des participants ont mis en avant la dépendance aux organismes de réglementation, qui sont chargés d'autoriser les livrables et ont, de ce fait, un impact majeur sur la performance des projets d'ingénierie complexes.

4.4.4 Mise en relation des résultats avec la littérature existante

Tout au long de la présentation des résultats, nous avons mis en évidence les liens de convergence de nos résultats avec la littérature identifiée dans le Chapitre 2. On remarque qu'il y a une similarité entre les conclusions des études citées dans la revue de littérature et les résultats collectés lors des entrevues. Le Tableau 17 ci-dessous résume les études en lien avec les résultats :

Tableau 17 - Études de la revue de littérature, en lien avec les résultats de la recherche

Facteurs du cadre conceptuel	Études citées
4.3.1 Outils et solutions technologiques	Betia et al. (2023) Nyktarakis (2022) Suydam et Pyles (2020) Vieira & Romero-Torres (2016) Rose et al. (2020) Haque & James-Moore (2005)
4.3.2 Méthodologies et gestion de projets	Khayyat (2022) Anatolyevich et al. (2021) Fernandes et França (2015) Dickinson (2008) Nixon et al. (2012), Parvez Alam et Toppur (2019) Anitha et al. (2013)
4.3.3 Performance des projets	Pereira et Lima (2018) Krol et al. (2020) Kerzner (2011)

4.4.5 Analyse des résultats à la lumière des objectifs de recherche et du cadre théorique

Les résultats de cette recherche confirment en grande partie les propositions formulées dans le cadre conceptuel, tout en apportant des nuances importantes quant aux conditions de succès. En croisant les propos recueillis lors des 25 entrevues avec les fondements théoriques identifiés en amont, il est possible de dégager plusieurs constats structurants.

D'une part, l'utilisation d'outils numériques spécialisés s'impose comme un levier incontestable d'amélioration de la performance, notamment en matière de suivi des indicateurs, de coordination entre les acteurs et de gestion des données techniques. Toutefois, cette efficacité dépend fortement du contexte d'implantation, du niveau d'intégration des solutions, et surtout, de l'adhésion des utilisateurs. Ces outils, en permettant une meilleure traçabilité et une plus grande rigueur dans la gestion de l'information, contribuent à maintenir l'équilibre entre les trois contraintes fondamentales du triangle de Barnes. Néanmoins, leur contribution à cet équilibre ne peut être effective que si les processus sont adaptés à la réalité opérationnelle et si les utilisateurs disposent des compétences nécessaires pour en tirer pleinement parti.

D'autre part, les méthodologies agiles ou hybrides offrent une souplesse appréciable face à la complexité et à l'évolution des besoins. Elles permettent d'ajuster en continu les priorités et de réallouer les ressources en fonction des aléas rencontrés, ce qui favorise une meilleure maîtrise du triangle de contraintes. Cependant, leur apport réel à la performance dépend de la maturité des équipes, de la culture d'entreprise et de l'environnement réglementaire dans lequel s'inscrit le projet. Dans les contextes fortement normés, comme ceux de l'aéronautique ou du spatial, la flexibilité méthodologique doit se conjuguer avec des exigences de conformité et de traçabilité élevées, rendant l'équilibre entre agilité et rigueur particulièrement délicat à atteindre.

Ces résultats rejoignent la théorie de la contingence, selon laquelle il n'existe pas de méthode universelle garantissant la performance. L'efficacité d'une approche dépend de son adéquation au contexte : la structure du projet, la taille de l'équipe, les contraintes techniques, la culture organisationnelle ou encore le niveau de risque. Autrement dit, la performance découle de la capacité du gestionnaire à adapter les outils, les processus et le style de leadership aux conditions spécifiques du projet. Cette lecture contingente permet d'expliquer pourquoi certains projets atteignent des niveaux de performance élevés malgré des approches ou outils différents : ce n'est pas la méthode en soi qui détermine le succès, mais la qualité de son intégration dans un système cohérent, aligné sur les réalités et les objectifs du projet.

Les sections suivantes proposent donc une mise en perspective des conclusions à travers trois axes : les conditions d'une implantation réussie des outils technologiques, les facteurs de succès des démarches méthodologiques hybrides, et enfin, le rôle déterminant du facteur humain, souvent sous-estimé, mais central dans la performance globale des projets.

4.4.5.2 Les conditions d'une implantation adéquate des outils et solutions technologiques

Les résultats révèlent que l'efficacité des outils numériques ne repose pas uniquement sur leurs fonctionnalités techniques, mais sur leur adéquation avec les besoins réels des équipes et des projets.

Les solutions les plus performantes sont celles qui s'intègrent de manière fluide aux processus existants, évitent les redondances et favorisent une circulation efficace de l'information. Plusieurs répondants insistent sur l'importance de la formation, de l'accompagnement au changement et de la capacité des outils à évoluer avec le projet. Ainsi, l'implantation technologique doit être considérée comme un processus organisationnel, nécessitant un alignement stratégique, une gouvernance claire et une implication active des utilisateurs finaux.

4.4.5.3 Les facteurs de succès de l'utilisation des méthodologies hybrides

L'agilité, lorsqu'elle est adaptée aux réalités des projets d'ingénierie complexes, constitue un levier de performance, à condition d'être bien maîtrisée. L'approche hybride apparaît comme la plus répandue dans les entreprises rencontrées, combinant des pratiques issues du cycle en V (structuration, validation, conformité) avec des éléments agiles (itérations, feedbacks fréquents, ajustements continus). Cette flexibilité méthodologique permet de concilier rigueur et adaptabilité. Toutefois, elle requiert des compétences spécifiques en gestion du changement, une capacité à gérer la transversalité, et une compréhension fine des rôles et responsabilités. En ce sens, la méthodologie n'est efficace que si elle est bien comprise, acceptée et portée par les équipes.

4.4.5.4 Le rôle central du facteur humain

Enfin, au-delà des outils et des méthodes, la réussite d'un projet repose largement sur les individus qui y contribuent. Les entretiens mettent en avant le poids décisif des compétences interpersonnelles, du leadership des gestionnaires, de la motivation des équipes et de la qualité des interactions avec les parties prenantes.

La compréhension des objectifs, la capacité à résoudre les conflits, à communiquer efficacement et à maintenir un climat de confiance apparaissent comme des éléments déterminants.

Plusieurs témoignages rappellent qu'un bon outil mal utilisé ou une méthode mal appliquée peuvent nuire à la performance, tandis qu'une équipe engagée et bien accompagnée peut surmonter des contraintes importantes.

4.4.6 Recommandations

L'étude scientifique de la performance en gestion de projet est plutôt courante. Cette recherche est en croissance constante depuis les années 1990, avec un pic d'intérêt à partir des années 2010 lié notamment à la complexification des projets et à l'essor des méthodologies agiles, du numérique, et de l'intelligence artificielle. On peut citer comme exemple le travail du Standish Group, et son rapport *Chaos Report*, qui est publié régulièrement, portant sur les facteurs de succès dans les projets informatiques.

En parallèle, notre étude permet d'apporter des recommandations qui peuvent favoriser la compréhension, par les organisations, des facteurs qui sont associés à la performance des projets d'ingénierie complexes.

4.4.6.2 L'importance de l'adoption précoce des technologies émergentes

Dans le domaine aéronautique et aérospatial, l'adoption précoce des technologies émergentes est un facteur clé pour garantir une compétitivité accrue. Ces secteurs, caractérisés par une forte complexité technique, des exigences de sécurité rigoureuses et des cycles de développement longs, bénéficient grandement de l'intégration rapide d'innovations telles que l'intelligence artificielle, la réalité virtuelle ou la fabrication additive. Adopter ces technologies en amont permet d'optimiser la conception, de réduire les coûts et les délais, tout en améliorant la qualité et la fiabilité des produits. De plus, cette anticipation technologique confère aux entreprises un avantage stratégique en leur permettant de répondre plus efficacement aux attentes du marché, aux réglementations évolutives et à la pression croissante en matière de durabilité.

4.4.6.3 La formation continue et le partage des connaissances

La formation continue et le partage des connaissances jouent un rôle essentiel dans la performance et la pérennité des entreprises. En favorisant le développement des compétences des employés, ces pratiques permettent d'améliorer la qualité du travail, d'accroître l'innovation et de mieux s'adapter aux évolutions technologiques et organisationnelles. Par ailleurs, elles contribuent significativement à augmenter le taux de rétention des employés, car ces derniers se sentent valorisés, engagés et voient des opportunités de progression. Ce climat d'apprentissage continu renforce également la cohésion et la collaboration au sein des équipes, ce qui construit une culture d'entreprise solide, basée sur la confiance, le partage et la responsabilité collective. Une telle culture favorise la motivation, la satisfaction au travail et, in fine, la performance globale de l'organisation, en particulier dans des secteurs exigeants et en constante évolution.

4.4.6.4 L'alignement avec les objectifs corporatifs

L'alignement des projets et des initiatives avec les objectifs corporatifs est crucial pour les entreprises du secteur aérospatial afin de rester des leaders sur un marché hautement concurrentiel. Cet alignement garantit une compréhension claire des attentes stratégiques, permettant de concentrer les ressources et les efforts sur les priorités clés. En synchronisant les activités opérationnelles avec la vision et les buts de l'entreprise, les équipes peuvent mieux anticiper les besoins des clients, respecter les contraintes réglementaires et optimiser la performance globale. De plus, cet alignement favorise une prise de décision cohérente et rapide, réduisant les risques de dérive et d'éparpillement des actions. Il crée un cadre structurant qui facilite la mesure des résultats et l'ajustement des stratégies, contribuant ainsi à l'atteinte des objectifs de performance et au maintien d'un avantage compétitif durable dans ce secteur exigeant.

4.4.7 Limites

Dans cette étude, la démarche s'appuie sur un échantillonnage dit « théorique » plutôt que statistique. En effet, nous cherchons à sélectionner des participants en fonction de leur capacité à enrichir progressivement la conceptualisation du phénomène étudié et non pour atteindre une représentativité chiffrée. Cette approche implique nécessairement une taille d'échantillon restreinte avec un nombre limité de professionnels interviewés. Il est donc impossible de couvrir la diversité complète des pratiques et des contextes organisationnels dans l'industrie aéronautique et aérospatiale (Méliani, 2013).

Également, il faut préciser l'importance de la réflexivité et de l'adéquation empirique entre la théorisation et la réalité du terrain. En effet, cette exigence de proximité aux données suppose que chaque nouvel entretien corrige ou enrichisse la catégorisation, ce qui rend difficile la généralisation des résultats : les catégories émergentes restent « ancrées » dans la singularité de chaque contexte local et culturel, rendant délicate toute extrapolation de ces constats à l'ensemble du secteur.

Le choix de cette recherche est d'obtenir une vue d'ensemble des processus utilisés dans l'industrie, et d'explorer les différences entre trois régions géographiques différentes. Ainsi, une observation lors d'une entrevue ne pourra pas être généralisée à l'ensemble de la population. Néanmoins, sur certaines thématiques spécifiques, nous observons une redondance d'informations, peu importe le secteur, la taille de l'entreprise ou la localisation régionale.

D'ailleurs, le plan de collecte détaillée dans le chapitre 3 indiquait que nous souhaitions un équilibre régional dans l'échantillon. Notons qu'il a été plus facile et pertinent de discuter avec des professionnels au Canada, d'où la surreprésentation de ce pays dans les entrevues. Dans l'analyse des résultats, principalement lorsque nous aborderons les particularités culturelles, nous mettrons en avant les pays des participants à parts égales.

À noter par ailleurs que le secteur privé est principalement représenté, et que seuls deux participants travaillent pour des centres de R&D public, uniquement au Canada. Ces entreprises qui composent la majorité des participants font partie des leaders internationaux. Seule une start-up a répondu à l'étude.

Également, aucune université n'a souhaité participer à l'étude. De leur point de vue, le périmètre de la recherche se concentre sur les processus en milieu de travail, et rend par définition hors sujet les pratiques observables en milieu scolaire.

4.4.8 Pistes de recherche futures

De récentes études sur l'intelligence artificielle montrent que l'évolution rapide des technologies, combinée à des risques élevés en matière de sécurité informatique ainsi qu'à un besoin croissant en ressources matérielles (serveurs, matériel, formation, maintenance, etc.), freine les organisations dans l'adoption large de cette technologie. Il serait intéressant de suivre cette évolution dans les prochaines années et de mener une étude spécifique au secteur aéronautique et aérospatial.

Par ailleurs, très peu d'études ont été menées auprès de l'entreprise SpaceX, actuellement leader mondial du lancement spatial, qui n'a pas pu participer à cette recherche. Il serait pertinent d'accéder à des participants de cette organisation afin de comprendre en quoi elle se différencie des autres leaders comparables. À titre personnel, cela reste un mystère pour moi, et il serait particulièrement utile pour la communauté scientifique d'analyser leur modèle organisationnel.

4.4.9 Diffusion des résultats

Afin de mettre en valeur le travail réalisé dans le cadre de cette recherche et de contribuer à la diffusion des résultats au sein de la communauté scientifique et professionnelle en gestion de projet aéronautique et aérospatiale, ce travail sera présenté lors de la conférence aérospatiale IEEE qui se tiendra dans le Montana, en mars 2026. L'acceptation de l'*Abstract* est jointe en ANNEXE III.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Cette recherche a pour objectif d'explorer l'influence de l'implantation des solutions technologiques et des méthodologies en gestion de projet sur la performance des projets d'ingénierie complexes, dans les secteurs aéronautique et aérospatial. À travers l'analyse de 25 entrevues menées auprès de professionnels du domaine, il a été possible de confirmer en partie les deux propositions formulées dans le cadre conceptuel : les outils numériques, lorsqu'ils sont bien intégrés et utilisés de manière stratégique, améliorent significativement la performance projet, et les méthodologies agiles ou hybrides, lorsqu'elles sont adaptées au contexte, renforcent la flexibilité et l'efficacité des équipes.

Cependant, ces leviers ne produisent leurs effets que sous certaines conditions. La réussite dépend avant tout de facteurs humains : la maturité des équipes, le leadership des gestionnaires, la clarté des objectifs et la qualité de la collaboration. De plus, l'environnement organisationnel et réglementaire dans lequel évoluent ces projets impose des contraintes qui limitent parfois l'application pure des modèles agiles ou l'implantation rapide de technologies émergentes, comme l'intelligence artificielle.

Cette étude comporte certaines limites, notamment liées à la nature qualitative de la méthodologie. Bien que les entretiens aient permis d'explorer en profondeur les perceptions et les pratiques des professionnels, les résultats ne peuvent être généralisés à l'ensemble de l'industrie. Par ailleurs, les réponses restent tributaires du contexte organisationnel et du niveau d'expérience des participants.

Pour aller plus loin, il serait pertinent de mener des études quantitatives afin de valider les constats sur un échantillon plus large, ou d'approfondir certaines dimensions, comme l'adoption de l'IA, la maturité Agile ou la mesure directe de la performance.

De futures recherches pourraient également explorer les dynamiques de collaboration entre les acteurs d'un même projet, ou l'impact des exigences normatives sur la gestion de l'innovation technologique dans les environnements contraints.

ANNEXE I

Guide d'entrevue

Destiné aux participants à l'étude visant l'étude de l'influence de l'implantation des nouvelles technologies sur les indicateurs de performance des projets d'ingénierie dans les domaines manufacturiers aéronautique et aérospatial.

Nom du participant :		Date de l'entrevue : ____ / ____ / _____
Organisation :		Heure de début : _____ Heure de fin : _____
Identifiant :		Lieu : ☐ En personne ☐ En ligne

Questions préliminaires (pour identification et classification)

- Taille de l'entreprise (nombre d'employés) : _____
- Taille du bureau de projet (nombre d'employés) : _____
- Niveau de maturité des processus documentés en gestion de projet (1 à 5)¹ : ____
- Niveau de complexité des projets réalisés au quotidien (1 à 5)² : ____

Première section : L'utilisation de solutions et outils technologiques³.

- Dans votre quotidien, quels outils et/ou solutions technologiques utilisez-vous dans l'exécution des tâches reliées aux activités de conception / développement ?
-

- Est-ce que ces différentes solutions sont intégrées, connectées ou centralisées entre elles ?
-

- Comment abordez-vous l'utilisation de ces technologies avec les autres membres de l'équipe ?
-

- Selon vous, quel est l'outil qui apporte le plus de valeurs ajoutées ? Et celui qui en apporte le moins ?
-

- Pensez-vous que les outils technologiques vous aident à être plus performant ?
-

¹ 1 : peu mature à 5 : très mature.

² 1 : peu complexe à 5 : très complexe.

³ Sous-entendus : outils IT (technologie de l'information), outils de conception/simulation informatique ou intelligence artificielle (IA).

Seconde section : La méthodologie en gestion de projet

- Dans votre quotidien, utilisez-vous des processus de gestion propre à la gestion de projet ? Pouvez-vous préciser lesquelles ?
-

- Participez-vous à des activités de suivis, en lien avec la gestion de l'échéancier / coût / qualité ? Si oui, sous quelle forme ?
-

- Savez-vous si l'organisation met en avant des pratiques de gestion en particulier ? Impose-t-elle une culture / méthodologie corporative pour gérer des projets ?
-

- Selon vous, quelles sont les méthodes de gestion qui impactent le plus positivement votre performance ? Et négativement ?
-

- En lien avec le secteur d'activité où vous exercez, pensez-vous que des exigences propres complexifient la gestion de projet et le niveau de stress liés aux résultats ?
-

Troisième section : La performance

- D'après votre expérience, pouvez-vous nous partager des projets qui sont considérés comme avoir atteint le niveau de performance attendue :

- Encore d'après vous, qu'est-ce qui impacte le plus la performance de vos projets ?

- Pensez-vous que la technologie actuelle, et l'évolution rapide de technologies futures sont un atout pour conduire des projets complexes ?

- Avez-vous des exemples de projets qui ont été qualifiés de réussite, mais dont la performance liée aux coûts / délais / qualités était en dessous des cibles ?

- D'après vous, quelle combinaison de méthodologie et de technologie permet d'optimiser la performance des projets d'ingénieries complexes ?

Aviez-vous d'autres sujets / commentaires à aborder avant de clore l'entretien ?

ANNEXE II



Le 01 avril 2025

À l'attention de :

Florent Nogueira
Unité départementale des sciences de la gestion - Lévis

Titre : Mémoire de recherche : l'influence de l'implantation des nouvelles technologies sur les indicateurs de performance des projets d'ingénierie dans les domaines manufacturiers aéronautique et aérospatial

Projet : 2025-774

Objet : Approbation éthique de votre projet de recherche

Bonjour,

Votre projet de recherche a fait l'objet d'une évaluation en matière d'éthique de la recherche avec des êtres humains par les membres du sous-comité délégué à l'évaluation des demandes soumises au Comité d'éthique de la recherche de l'Université du Québec à Rimouski (CER-UQAR) ainsi que moi-même, à titre de présidente de ce comité. Nous sommes heureux de vous annoncer qu'un certificat d'éthique peut vous être délivré pour votre projet de recherche, à risque minimal, intitulé : Mémoire de recherche : l'influence de l'implantation des nouvelles technologies sur les indicateurs de performance des projets d'ingénierie dans les domaines manufacturiers aéronautique et aérospatial .

Un certificat d'approbation éthique qui atteste de la conformité de votre projet de recherche à la [Politique d'éthique de la recherche avec des êtres humains](#) de l'UQAR est émis en date du 01 avril 2025. Vous pouvez dès maintenant débiter vos activités de recherche.

Prenez note que ce certificat est valide jusqu'au **01 avril 2026**.

Selon la [Politique d'éthique de la recherche avec des êtres humains](#), il est de la responsabilité des chercheurs d'élaborer des projets de recherche qui respectent l'ensemble des principes éthiques et d'assurer le respect et la protection des droits des personnes qui participent à la recherche. Vous devrez obtenir le renouvellement de votre approbation éthique avant l'expiration de ce certificat. De plus, vous devez signaler tout incident significatif dès qu'il survient et soumettre à l'approbation du CER-UQAR, toute modification dans le déroulement d'une activité qui touche la nature de la participation des personnes.

Enfin, puisque votre demande d'approbation pourrait être liée à un financement, le Décanat de la

NAGANO Approbation du projet par le comité d'éthique suite à l'approbation conditionnelle
www.sem-lab.ca Université du Québec à Rimouski - 300, allée des Ursulines, Rimouski (Québec), G5L 3A1

1 / 4

recherche est mis en copie conforme.

Dans le cadre de l'Entente pour la reconnaissance des certificats d'éthique des projets de recherche à risque minimal, il est de votre responsabilité d'informer vos cochercheurs provenant de l'externe, s'il y a lieu, afin qu'ils puissent obtenir reconnaissance et/ou certification éthique de leur propre CÉR.

En vous souhaitant le meilleur des succès dans la réalisation de votre recherche, veuillez recevoir nos salutations distinguées.

Le CER-UQAR

Janie Bérubé, Ph.D

Présidente du Comité d'Éthique de la Recherche - UQAR (CER-UQAR)

Professeure Unité départementale des sciences de la gestion

cer@uqar.ca

CERTIFICAT D'APPROBATION ÉTHIQUE

Le Comité d'éthique de la recherche de l'Université du Québec à Rimouski (CER-UQAR), certifie, conjointement avec la personne titulaire de ce certificat, que le présent projet de recherche prévoit que les êtres humains qui y participent seront traités conformément aux principes de l'Énoncé de politique des trois Conseils : Éthique de la recherche avec des êtres humains ainsi qu'aux normes et principes en vigueur dans la Politique d'éthique avec les êtres humains de l'UQAR (C2-D32).

Projet # : 2025-774

Titre du projet de recherche : Mémoire de recherche : l'influence de l'implantation des nouvelles technologies sur les indicateurs de performance des projets d'ingénierie dans les domaines manufacturiers aéronautique et aérospatial

Chercheur principal à l'UQAR

Florent Nogueira,
Unité départementale des sciences de la gestion - Lévis

Direction / Codirection de recherche

En provenance de l'UQAR: Tian Zeng
En provenance de l'externe: Erika Souza de Melo

Financement : UQAR

Date d'approbation du projet : 01 avril 2025

Date d'entrée en vigueur du certificat : 01 avril 2025

Date d'échéance du certificat : 01 avril 2026

N.B. Un rappel automatique vous sera envoyé par courriel quelques semaines avant l'échéance de votre certificat afin de remplir le formulaire F7 - Renouvellement annuel.

-
- Si votre projet se termine avant la date du prochain renouvellement, veuillez remplir le formulaire **F9 - Fin de projet**.
 - Si des modifications sont apportées à votre projet avant l'échéance du certificat, veuillez remplir le formulaire **F8 - Modification de projet**.
 - Tout nouveau membre de votre équipe de recherche devra être déclaré au CER-UQAR lors de votre prochaine demande de renouvellement ou lors de la fin de votre projet si le renouvellement n'est pas requis. ATTENTION: Vous devez faire signer une déclaration d'honneur aux personnes ayant accès aux participants (ou à des données nominatives sur les participants) et la conserver dans vos dossiers de recherche.

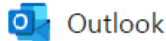
Janie Bérubé

NAGANO
www.sem-lab.ca

Approbation du projet par le comité d'éthique suite à l'approbation conditionnelle
Université du Québec à Rimouski - 300, allée des Ursulines, Rimouski (Québec), G5L 3A1

3 / 4

ANNEXE III



IEEE AeroConf Abstract Acceptance

À partir de TechnicalProgramChair@aeroconf.org <TechnicalProgramChair@aeroconf.org>

Date Mer 09/07/2025 08:06

À Nogueira Florent <Florent.Nogueira@uqar.ca>; stephen.a.shinn@nasa.gov
<stephen.a.shinn@nasa.gov>; eric.m.mahr@aero.org <eric.m.mahr@aero.org>

Cc karen.profet@aeroconf.org <karen.profet@aeroconf.org>; TPC@aeroconf.org <TPC@aeroconf.org>;
jeff.webster@aeroconf.org <jeff.webster@aeroconf.org>; kendra.cook@aeroconf.org
<kendra.cook@aeroconf.org>; erica.deionno@aero.org <erica.deionno@aero.org>;
alexander.austin@jpl.nasa.gov <alexander.austin@jpl.nasa.gov>



Abstract Acceptance

Your abstract submission to the IEEE Aerospace Conference Title: **Impact of Technology and Methodology on Performance Metrics in Complex Aerospace Project Management**

Session: **13.03 Cost and Schedule Tools, Methods, and Processes**

Paper number: **2141**

Dear Florent Nogueira,

Thank you for submitting your abstract. Your abstract has been Approved

Please note the assigned Paper Number (above), since you and the website use it to enter and track your paper.

Reviewer comments for your abstract were as follows:

Subject matter fits within scope of session

Very timely. Looking forward to it!

Yours sincerely,

The Technical Program Committee

Richard Mattingly, RLMattingly@aeroconf.org

Karen Profet, karen.profet@aeroconf.org

Jeff Webster, jeff.webster@aeroconf.org

Erica Deionno, erica.deionno@aero.org

Alex Austin, alexander.austin@jpl.nasa.gov

2026 IEEE Aerospace Conference

At the Yellowstone Conference Center in Big Sky, Montana,

March 07 - 14

You are receiving this email because you are member of IEEE Aerospace Conference website. To stop receiving messages, you can [Unsubscribe](#).

Copyright © 2026 IEEE Aerospace Conference

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Ahmed, R. (2023). Project performance measures and metrics framework. In (pp. 11-22).
<https://doi.org/10.4337/9781802207613.00007>
- Ahmed, S., & Kanike, Y. (2007). Engineering change during a product's lifecycle. Proceedings of ICED 2007, the 16th International Conference on Engineering Design,
- Altfeld, H.-H. (1991). *Commercial Aircraft Projects: Managing the Development of Highly Complex Products* (Vol. 1st Edition). Routledge.
<https://doi.org/10.4324/9781315572833>
- Anatolyevich, D. P., Aleksandrovna, K. N., Aleksandrovich, S. V., & Aleksandrovna, K. D. (2021). *Specifics of applying agile methods in the space industry* AIP Conf. Proc,
- Anderson, M. (2020). AI Seeks ET: Machine Learning Powers Hunt for Life in the Solar System. *IEEE Spectrum*. <https://spectrum.ieee.org/ai-seeks-et-machine-learning-life-solar-system>
- Anitha, P. C., Savio, D., & Mani, V. S. (2013, 15-15 July 2013). Managing requirements volatility while “Scrumming” within the V-Model. 2013 3rd International Workshop on Empirical Requirements Engineering (EmpiRE),
- Ansar, A. a. B. F. (2022). *A Platform Approach to Space Exploration*. Harvard Business Review. <https://hbr.org/2022/11/a-platform-approach-to-space-exploration>
- Athanasakopoulos. (2021). *Seizing the moment: Talent challenges and opportunities in aerospace and defense*. <https://www.mckinsey.com/industries/aerospace-and-defense/our-insights/seizing-the-moment-talent-challenges-and-opportunities-in-aerospace-and-defense>

- Atkinson, R. (1999). Project management: cost, time and quality, two best guesses and a phenomenon, its time to accept other success criteria. *International Journal of Project Management*, 17(6), 337-342. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0263-7863\(98\)00069-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0263-7863(98)00069-6)
- Attaran, M. (2020). Digital technology enablers and their implications for supply chain management. *Supply Chain Forum: An International Journal*. <https://doi.org/10.1080/16258312.2020.1751568>
- Bales, R., Maull, R. S., & Radnor, Z. J. (2004). The development of supply chain management within the aerospace manufacturing sector. *Supply Chain Management*, 9, 250-255. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1108/13598540410544944>
- Baozh, G. (2014). Space Project Management:High-tech Complex Project Management. "Inconnu". https://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-HTGC201401002.htm
- Bart, R. d. F. (2024). *Is Hardware Agile Worth It? - Analyzing the SpaceX Development Process* AIAA SCITECH 2024 Forum, Orlando, FL, USA. <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2024-2054>
- Beck, K. (2001). "Manifesto for Agile Software Development". <https://agilemanifesto.org/>
- Betia, A., De Borja, R., Palacio, F., Samia, G. L., & Lim, P. N. (2023). Value in Every Byte: An Analysis of Firm's Experiences on the Adoption of Information Systems. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4668737>
- Bishop, D. A. (2017, 8-10 June 2017). Metagility: Managing Agility for competitive advantage in new product development. 2017 IEEE Technology & Engineering Management Conference (TEMSCON),
- Blais, C., & Agbodoh-Falschau, R. K. (2023). An exploratory investigation of performance criteria in managing and controlling new product development projects: Canadian SMEs' perspectives. *International Journal of Managing Projects in Business*, 16(6/7), 788-807.
- Bloebaum, C. L., & McGowan, A.-M. R. (2010). Design of Complex Engineered Systems. *Journal of Mechanical Design*, 132(12). <https://doi.org/10.1115/1.4003033>

- Boehm, B., & Turner, R. (2003). Using Risk to Balance Agile and Plan-Driven Methods. *IEEE Computer*, 36, 57-66. <https://doi.org/10.1109/MC.2003.1204376>
- Brandao, R., & Wynn, M. (2009). Improving the New Product Development Process through ICT Systems in the Aerospace Industry – A Report on Case Study Research. 2009 *International Conference on Information, Process, and Knowledge Management*. <https://doi.org/10.1109/EKNOW.2009.31>
- Briard, R., Bhuiyan, N., Sicotte, H., & Keshani, P. (2020). Critical Success Factors in New Product Development Projects in a Weak Matrix Structure: An Aerospace Case Study. *The Journal of Modern Project Management*. <https://doi.org/10.19255/JMPM02403>
- Cantamessa, M., Montagna, F., & Neirotti, P. (2012). An empirical analysis of the PLM implementation effects in the aerospace industry. *Computers in Industry*, 63(3), 243-251. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2012.01.004>
- Cardoso, S. H. S. B., Oliveira, M. V. R. d., & Godoy, J. R. S. (2022). eVTOL Certification in FAA and EASA Performance-Based Regulation Environments: A Bird Strike Study-Case. *Journal of Aerospace Technology and Management*, 14. <https://doi.org/10.1590/jatm.v14.1271>
- Carpenter, S. E., & Dagnino, A. (2014). Is Agile Too Fragile for Space-Based Systems Engineering? IEEE International Conference on Space Mission Challenges for Information Technology, *Chaos Report*. (2015). T. S. Group. https://www.standishgroup.com/sample_research_files/CHAOSReport2015-Final.pdf
- Charles Pickar, R. F. (2021). Telling Time: Getting Relevant Data for Acquisition Schedule Estimating Relationships. *Acquisition Research Program*. <https://dair.nps.edu/handle/123456789/4532>
- Chauhan, A. S., Nepal, B., Soni, G., & Rathore, A. P. S. (2018). Examining the State of Risk Management Research in New Product Development Process [Article]. *EMJ -*

Engineering Management Journal, 30(2), 85-97.

<https://doi.org/10.1080/10429247.2018.1446120>

Clark, P., & Harrison, P. (2008). Boeing's NLP System and the Challenges of Semantic Representation. <https://doi.org/10.3115/1626481.1626502>

Crawford, L., & Pollack, J. (2004). Hard and soft projects: a framework for analysis. *International Journal of Project Management*, 22(8), 645-653.

Deloitte. (2021). *Building The Resilient Organization 2021 Deloitte Global Resilience Report*. <https://www2.deloitte.com/dk/da/pages/about-deloitte/articles/2021-deloitte-global-resilience-report.html>

Dickinson, G. (2008). *Performance measurement and performance management of innovative products* University of Bath].

Doucette, R. (2021). *Digital : The next horizon for global aerospace and defense*. <https://www.mckinsey.com/industries/aerospace-and-defense/our-insights/digital-the-next-horizon-for-global-aerospace-and-defense#/>

Dreyer, L. (2009). Latest developments on SpaceX's Falcon 1 and Falcon 9 launch vehicles and Dragon spacecraft. *2009 IEEE Aerospace conference*, 1-15.

Dupont, T. (2017). Digitization and Industry 4.0 in Aerospace and Defense: boosting the transformation. *AIAC Blog*. https://aiac.ca/blog_posts/digitization-industry-4-0-aerospace-defense-boosting-transformation/#_ftnref1

Eppinger, S. D. (2002). Patterns of Product Development Interactions.

Fernandes, F. C. P. M., & França, R. B. (2015). *Assessing the impact of Scrum in airborne software quality assurance* XIV Simpósio Brasileiro de Qualidade de Software, Manaus, Brazil.

Fiedler, F. E. (1981). Leadership Effectiveness. *American Behavioral Scientist*, 24(5), 619-632. <https://doi.org/10.1177/000276428102400503>

Findlay, S., & Harrison, N. (2002). Why aircraft fail. *Materials Today*, 5, 18-25. [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(02\)01138-0](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(02)01138-0)

- Gangi, F., Mustilli, M., Daniele, L. M., & Coscia, M. (2021). The sustainable development of the aerospace industry: Drivers and impact of corporate environmental responsibility. *Business Strategy and the Environment*. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1002/bse.2883>
- Garzaniti, N., Fortin, C., & Golkar, A. (2019, 2019//). Toward a Hybrid Agile Product Development Process. *Product Lifecycle Management in the Digital Twin Era*, Cham.
- Geras, A., Smith, M., & Miller, J. (2006, 2006//). Configuring Hybrid Agile-Traditional Software Processes. *Extreme Programming and Agile Processes in Software Engineering*, Berlin, Heidelberg.
- Govindarajan, V., & Venkatraman, V. (2024). *Fusion Strategy: How Real-time Data and AI Will Power the Industrial Future*. <https://store.hbr.org/product/fusion-strategy-how-real-time-data-and-ai-will-power-the-industrial-future/10689?srsId=AfmBOor9xnAiVrF0TwbWb8GLc94mCcPtxaOBtpviWBZYcmaXFGcRKkxl>
- Hanisch, B., & Wald, A. (2012). A Bibliometric View on the Use of Contingency Theory in Project Management Research. *Project Management Journal*, 43(3), 4-23. <https://doi.org/10.1002/pmj.21267>
- Hanssen, G. K., Wedzinga, G., & Stuip, M. (2017). An Assessment of Avionics Software Development Practice: Justifications for an Agile Development Process. *Lecture notes in business information processing*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-57633-6_14
- Haque, B., & James-Moore, M. (2005). Performance measurement experiences in aerospace product development processes. *International Journal of Business Performance Management*, 7(1). <https://doi.org/10.1504/ijbpm.2005.006246>
- Haque, B., & Moore, M. J. (2005). Measures of performance for lean product introduction in the aerospace industry. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*,

- Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 218(10), 1387-1398.
<https://doi.org/10.1243/0954405042323496>
- Harvey, D. J., & Holdsworth, R. (2005). *Knowledge management in the aerospace industry*. IPCC 2005. Proceedings. International Professional Communication Conference, 2005.,
- Hass, K. B. (2008). *Managing Complex Projects: A New Model*. Berrett-Koehler Publishers.
<https://books.google.ca/books?id=OhhFDwAAQBAJ>
- Huang, P., Knuth, A., Krueger, R., & Garrison-Darrin, M. A. (2012). Agile hardware and software systems engineering for critical military space applications. *Defense + Commercial Sensing*. <https://doi.org/10.1117/12.919303>
- IATA. (2024). *Rentabilité accrue prévue en 2025 même si les problèmes de chaînes d'approvisionnement persistent*.
<https://www.iata.org/contentassets/f32de4cd05e2498a824e67fadd658cb7/2024-12-10-01-fr.pdf>
- Jiang, J. Y., & Liu, C.-W. (2015). High performance work systems and organizational effectiveness: The mediating role of social capital. *Human Resource Management Review*, 25(1), 126-137. <https://doi.org/10.1016/j.hrmr.2014.09.001>
- Kazemzadeh, A., Manteghi, M., Eshlaghy, A. T., & Jodey, J. (2021). Modeling the challenges of innovation in the development of complex aerospace products.
- Kerzner, H. (2011). *Project Management Metrics, KPIs, and Dashboards: A Guide to Measuring and Monitoring Project Performance*.
- Khayyat, R. M. M. (2022). A Comparative Case Study of Waterfall and Agile Management. *SAR Journal*, Pages 52-62.
https://www.sarjournal.com/content/51/SARJournalMarch2022_52_62.pdf
- Krol, F., Saeed, M. A., & Kersten, W. (2020). A holistic digitalization KPI framework for the aerospace industry. In (pp. 798 - 847).

- Krupa, M., & Hajek, J. (2022). Hybrid Project Management Models: A Systematic Literature Review. *International Journal of Project Organisation and Management*. <https://doi.org/10.1504/IJPOM.2024.10056237>
- Lee, S. M., & Trimi, S. (2018). Innovation for creating a smart future. *Journal of Innovation & Knowledge*, 3(1), 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.jik.2016.11.001>
- Li, L., Aslam, S., Wileman, A., & Perinpanayagam, S. (2022). Digital Twin in Aerospace Industry: A Gentle Introduction. *IEEE Aerospace Conference*, 10, 9543-9562. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3136458>
- Linden, A., Lexell, J., & Larsson Lund, M. (2011). Improvements of task performance in daily life after acquired brain injury using commonly available everyday technology. *Disabil Rehabil Assist Technol*, 6(3), 214-224. <https://doi.org/10.3109/17483107.2010.528142>
- Loukaka, A., & S. M. Rahman, S. (2017). Discovering New Cyber Protection Approaches from a Security Professional Prospective. *International journal of Computer Networks & Communications*, 9(4), 13-25. <https://doi.org/10.5121/ijcnc.2017.9402>
- Manuela, R., & Ilinca, S. (2018). Comparative Risk Assessment in Applicative Aerospace Projects using different approaches. *INCAS Bulletin*, 10(2), 233-246. <https://doi.org/10.13111/2066-8201.2018.10.2.21>
- Martens, M. L., & Martens, M. L. (2014). A conceptual framework of sustainability in project management oriented to success.
- Méliani, V. (2013). Choisir l'analyse par théorisation ancrée: illustration des apports et des limites de la méthode. *Recherches qualitatives*, 15, 435-452.
- Meluso, J., Austin-Breneman, J., Bagrow, J. P., & Hébert-Dufresne, L. (2022). A review and framework for modeling complex engineered system development processes. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 52(12), 7679-7691.
- Michael, E., Jr, F., Byrd, J. C., & Wood, R. T. (1994). *Impact of New Technologies on Manufacturing Environments*. DTIC.
- Mikes, A., & Kaplan, R. S. (2014). Towards a contingency theory of enterprise risk management.

- Morandini, S., Fraboni, F., Hall, M., Quintana-Amate, S., & Pietrantoni, L. (2024). Human factors and emerging needs in aerospace manufacturing planning and scheduling. *Cognition, Technology & Work*. <https://doi.org/10.1007/s10111-024-00785-3>
- Nadia, B., Gregory, G., & Vince, T. (2006). Engineering change request management in a new product development process [Article]. *European Journal of Innovation Management*, 9(1), 5-19. <https://doi.org/10.1108/14601060610639999>
- Najmon, J. C., Raeisi, S., & Tovar, A. (2019). Review of additive manufacturing technologies and applications in the aerospace industry. *Additive Manufacturing for the Aerospace Industry*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814062-8.00002-9>
- Newman, M. E. J. (2011). Resource Letter CS–1: Complex Systems. *American Journal of Physics*, 79(8), 800-810. <https://doi.org/10.1119/1.3590372>
- Nguyen, N. M. (2000). *Effective space project management* Project Management Institute Annual Seminars & Symposium, Houston, TX. Newtown Square, PA.
- Nixon, P., Harrington, M. C., & Parker, D. W. (2012). Leadership performance is significant to project success or failure: a critical analysis. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 61, 204-216.
- Nyktarakis, G. (2022). *Technology enabling collaboration of agile development teams in hybrid working: the case of Microsoft teams*.
- Nyman, H. J., & Öörni, A. (2023). Successful projects or success in project management - are projects dependent on a methodology? *International Journal of Information Systems and Project Management*, 11(4), 5-25. <https://doi.org/10.12821/ijispm110401>
- Oehmen, J., Günther, A., Herrmann, J. W., Schulte, J., & Willumsen, P. (2020). Risk management in product development: risk identification, assessment, and mitigation—a literature review. Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference,
- Ozdenizci Kose, B. (2021). Business process management approach for improving agile software process and agile maturity. *Journal of Software: Evolution and Process*, 33(4), e2331. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/smr.2331>

- Panarotto, M., Isaksson, O., & Vial, V. (2023). Cost-efficient digital twins for design space exploration: A modular platform approach. *Computers in Industry*, 145. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2022.103813>
- Parvez Alam, M., & Toppur, B. (2019). Hybrid agile project management model for new product development in aerospace [Article]. *International Journal of Operations and Quantitative Management*, 25(1), 59-73. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1504/IJPOM.2024.10056237>
- Pereira, M. S., & Lima, R. M. (2018). Definition of a Project Performance Indicators Model: Contribution of Collaborative Engineering Practices on Project Management.
- PMI. (2017). *Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide)–Sixth Edition*. Project Management Institute. <https://books.google.ca/books?id=Rzc2DwAAQBAJ>
- Pollack, J., Helm, J., & Adler, D. (2018). What is the Iron Triangle, and how has it changed? *International Journal of Managing Projects in Business*, 11. <https://doi.org/10.1108/IJMPB-09-2017-0107>
- Pouliot, V. (2004). The essence of constructivism. *Journal of International Relations and Development*, 7(3), 319-336. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jird.1800022>
- Prince, M. J., & Felder, R. M. (2006). Inductive Teaching and Learning Methods: Definitions, Comparisons, and Research Bases. *Journal of Engineering Education*, 95(2), 123-138. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/j.2168-9830.2006.tb00884.x>
- Rabechini Junior, R., & Monteiro de Carvalho, M. (2013). Understanding the impact of project risk management on project performance: An empirical study. *Journal of technology management & innovation*, 8, 6-6.
- Relich, M., & Muszyński, W. (2014). The Use of Intelligent Systems for Planning and Scheduling of Product Development Projects. *Procedia Computer Science*, 35, 1586-1595. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2014.08.242>
- Rodríguez-Segura, E., Ortiz-Marcos, I., Romero, J. J., & Tafur-Segura, J. (2016). Critical success factors in large projects in the aerospace and defense sectors. *Journal of Business Research*, 69(11), 5419-5425. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2016.04.148>

- Rose, R. L., Puranik, T. G., & Mavris, D. N. (2020). Natural Language Processing Based Method for Clustering and Analysis of Aviation Safety Narratives. *Aerospace*, 7(10). <https://doi.org/10.3390/aerospace7100143>
- Ryan, R. S. (1996). *A History of Aerospace Problems, Their Solutions, Their Lessons*. A. MSFC.
- Saadi, J., & Yang, M. (2023). Observations on the Implications of Generative Design Tools on Design Process and Designer Behaviour. *Proceedings of the Design Society*, 3, 2805-2814. <https://doi.org/10.1017/pds.2023.281>
- Sapountzoglou, N. (2023). A bibliometric analysis of risk management methods in the space sector. *Journal of Space Safety Engineering*, 10(1), 13-21. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jsse.2023.01.001>
- Saunders, P. L. a. A. T. (2019). *Research Methods for Business Students, 8th edition*. Pearson.
- Schlotterbeck. (2021). Using the network effect: Driving advanced manufacturing in A&D. *Deloitte Analysis*. <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/industry/aerospace-defense/advanced-manufacturing-aerospace.html>
- Schwartz, D. S. J. (2015). Redesigning Work Cognitive Technologies. *Deloitte Analysis*. <https://www2.deloitte.com/tr/en/pages/technology-media-and-telecommunications/articles/redesigning-work-cognitive-technologies.html>
- Sharma, A., & Gupta, S. (2014). Identifying the role of ERP in enhancing operational efficiency and supply chain mobility in aircraft manufacturing industry. International Conference on Issues and Challenges in Intelligent Computing Techniques (ICICT),
- Shenhar, A. (2001). One Size Does Not Fit All Projects: Exploring Classical Contingency Domains. *Management Science - MANAGE SCI*, 47, 394-414. <https://doi.org/10.1287/mnsc.47.3.394.9772>
- Shenhar, A. J., Dvir, D., Lechler, T., & Poli, M. (2002). One size does not fit all: True for projects, true for frameworks. Proceedings of PMI research conference,

- Shi, Q. (2011). Rethinking the implementation of project management: A Value Adding Path Map approach. *International Journal of Project Management*, 29(3), 295-302. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2010.03.007>
- Suarez, J. M. (1976). Profits and Performance of Aerospace Defense Contractors. *Journal of Economic Issues*, 10(2), 386-402. <https://doi.org/10.1080/00213624.1976.11503352>
- Sundqvist, E., Backlund, F., & Chronéer, D. (2014). What is Project Efficiency and Effectiveness? *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 119, 278-287. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.03.032>
- Suydam, A., & Pyles, J. (2020). *Lockheed Martin Conceptual Design Modeling in the Dassault Systemes 3DEXPERIENCE®Platform* AIAA Scitech Forum, Orlando, FL, USA.
- Tang, C. S., Zimmerman, J. D., & Nelson, J. I. (2015). Managing New Product Development and Supply Chain Risks: The Boeing 787 Case. *Supply Chain Forum: An International Journal*, 10(2), 74-86. <https://doi.org/10.1080/16258312.2009.11517219>
- Thamhain, H. (2013). Managing risks in complex projects [Article]. *Project Management Journal*, 44(2), 20-35. <https://doi.org/10.1002/pmj.21325>
- Trinh, M. T., & Feng, Y. (2020). Impact of Project Complexity on Construction Safety Performance: Moderating Role of Resilient Safety Culture [Article]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 146(2), Article 04019103. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001758](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001758)
- Vanderleest, S., & Buter, A. (2009). Escape the waterfall: Agile for aerospace. Conference on Digital Avionics Systems (DASC), Orlando, FL, USA.
- Vieira, D. R., & Romero-Torres, M. A. (2016). Is 3D Printing Transforming the Project Management Function in the Aerospace Industry. *Journal of Modern Project Management*. <https://doi.org/10.19255/187>
- Villiers, D. P. d. (2005). Interpretive research models for informatics: action research, grounded theory, and the family of design- and development research.

- Wellener, P. (2020). *Aerospace and defense ecosystem playbook*.
<https://www2.deloitte.com/us/en/pages/manufacturing/articles/aerospace-defense-ecosystem-approach.html>
- Wirth, A., Light, T., Romano, D., Tierney, S., McGarvey, R., Kim, M.-s., Lostumbo, M. J., Nguyen, A., Emslie, P., & Drew, J. (2020). *Evaluating Alternative Maintenance Manpower Force Structure Concepts for the F-35A*. Rand Corporation.
<https://doi.org/10.7249/RR4433>
- Wit, A. d. (1988). Measurement of project success. *International Journal of Project Management*, 6, 164-170. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0263-7863\(88\)90043-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0263-7863(88)90043-9)
- Yüksel, N., Börklü, H. R., Sezer, H. K., & Canyurt, O. E. (2023). Review of artificial intelligence applications in engineering design perspective. *Eng. Appl. Artif. Intell.*, 118, 105697. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105697>