

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN GESTION DE PROJET

PAR
PAULO SERGIO DE LIMA QUATTROCCHI

GESTION DE PROJET DURABLE D'ESSAIS EN VOL

SEPTEMBRE 2018

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

Université du Québec à Trois-Rivières
Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

SOMMAIRE

L'activité d'essai en vol prend une part majeure des investissements, de la main-d'œuvre et du temps de développement d'un nouvel aéronef. Il y aura une explication de la façon dont les essais en vol de développement sont planifiés, gérés et exécutés et les meilleures pratiques pour le dimensionnement du personnel, des prototypes, le nombre d'heures de vol, le coût global des opérations d'essai, et les variables de contrôle clés pour fournir des campagnes d'essais améliorées.

Une quantité raisonnable d'informations sur le développement des essais en vol a été recueillie, comme la durée totale des essais, depuis le premier vol du premier prototype, le nombre d'heures d'essais en vol effectuées par des prototypes, les types d'essais effectués pendant les exigences de démonstration pour la certification. Les résultats des plus grands constructeurs d'avions ont également été déposés et extrapolés. Pour parvenir à une conclusion pour les normes de l'industrie, au moins 60 différents développements d'avion ont été tracés et comparés, de sorte que le nombre minimal et optimal de professionnels spécialisés nécessaire pourrait être établi. Les données périphériques sont exclues de l'échantillon pour conserver le résultat le plus significatif et le plus approprié pour l'étude.

Les outils de gestion, comme Kaizen, 6Sigma et matrice de préparation sont utilisés, et les outils d'ingénierie sont également impliqués dans le processus de réduction du temps, du coût et de la main-d'œuvre, pour illustrer comment devenir une meilleure exploitation durable.

Le tableau des résultats résume le pourcentage des gains atteints dans la réduction des heures de vol, en utilisant ces outils, tels qu'extraits et en moyenne à partir de la liste initiale détaillée.

Table des matières

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC	i
MÉMOIRE PRÉSENTÉ À	i
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES	i
COMME EXIGENCE PARTIELLE.....	i
DE LA MAÎTRISE EN GESTION DE PROJET.....	i
SOMMAIRE	ii
LISTE DES TABLEAUX.....	v
LISTE DES FIGURES.....	vi
LISTE D'ABBREVIATIONS.....	vii
LISTE DES ANNEXES.....	x
REMERCIEMENTS.....	xi
1 Introduction.....	1
1.1 Contexte : l'industrie aéronautique internationale pour le XXIe siècle	
1	
1.2 Enjeux – Durabilité et Coûts	2
1.2.1 Investissements.....	2
1.2.2 Gestion des Essais.....	3
1.2.3 Réduction de la Consommation	3
1.3 Problématique.....	3
1.3.1 Problématique et Défi.....	5
1.4 Opérations d'essai en vol.....	6
1.5 Objectifs et description de la recherche	8
1.6 Périmètre	9
2 Des Méthodes, pratiques et enjeux associés	10
2.1 Processus de test et de certification	10
2.2 Définitions et complexité de L'environnement interne et externe.....	12

2.2.1	Structures de gestion d'essais.....	12
2.2.2	Client.....	15
2.2.3	Main-d'œuvre.....	18
2.2.4	Article de test.....	23
2.2.5	Exigences.....	26
2.2.6	Enregistrement des données.....	27
2.2.7	Visualisation et analyse de données.....	30
2.2.8	Dispositifs spéciaux.....	31
2.3	Gestion des Tests.....	34
2.3.1	Préparation.....	35
2.3.2	Exécution-vérification.....	44
2.3.3	Gestion des prototypes.....	45
2.3.4	Financement.....	48
2.3.5	Examen des opérations d'essais en vol.....	54
3	Discussion critique et propositions.....	61
3.1	Propositin 1: Outils d'ingénierie.....	62
3.2	Propositin 2: Outils de gestion.....	64
3.3	Exemple des Résultats.....	68
4	Conclusion.....	71
	Références.....	72
	ANNEXES.....	78

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Type et quantité de travailleurs pour les essais de la part 25.....	23
Tableau 2: Identification des coûts.....	51
Tableau 3: Exemple de matrice de preparation de Test.....	67
Tableau 4: Possibilité de réduction hv.....	70

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Nombre d'essais et complexité des tests	7
Figure 2: Objectifs de recherche	8
Figure 3: Outils pour les tests durables.....	10
Figure 4:Exemple de structure de projet de campagne de test.....	20
Figure 5:Exemple de planification macro	38
Figure 6:Exemple de Planification de niveau moyen.....	39
Figure 7:Exemple d'horaire mensuel détaillé	40
Figure 8:Exemple d'Horaire hebdomadaire détaillé	41
Figure 9:Exemple catégories de risques du projet	43
Figure 10:Exemple classification de risque des essais	43
Figure 11: Coût total de l'operation d'essai	51
Figure 12: Pourcentage du type de coût	53
Figure 13: Durée de la campagne de test et des heures de vol.....	59
Figure 14: Incidence de la durée de la campagne de test.....	60

Observation: Toutes les figures ont été faites par l'auteur

LISTE D'ABBREVIATIONS

	Signification originale	Signification en français
AFM	Aircraft Flight Manual	Manuel de vol de l'aéronef
AMM	Aircraft Maintenance Manual	Manuel d'entretien des aéronefs
ANAC	Agencia Nacional de Aviação Civil	Agence nationale de l'aviation civile
ASTM	American Society for Testing and Materials	Société américaine pour les essais et les matériaux
CAA	Civil Aeronautic Authority	Autorité aéronautique civile
CG	Center of Gravity	Centre de gravité
EASA	European Aerospace Safety Agency	Agence européenne pour la sécurité aérospatiale
FAA	Federal Aviation Administration	Administration fédérale de l'aviation
FAR	Federal Aviation Regulations	Règlementations fédérales d'aviation
Flops	Floating point operations / second	Opérations en virgule flottante par seconde
FMS	Flight Management System	Système de gestion de vol
FOC	First Operational Capacity	Première capacité opérationnelle
hv	Flight Hours	Heures de vol
FTE	Flight Test Engineer	Ingénieur d'essai en vol
FTI	Flight Test Instrumentation	Instrumentation d'essais en vol
FTP	Flight Test Pilot	Pilote d'essai en vol
TP	Test Proposal	Proposition d'essai
GPX	Embraer Gavião Peixoto Test facility	Installation d'essai Embraer chez Gavião Peixoto

GTF	Geard Turbo Fan	Turboréacteurs à engrenage double flux
IB	Iron Bird	Plateforme dédiée d'essais copiée
ILS	Instrument Landing System	Système d'atterrissage pour instruments
IFE	In Flight Entertainment system	Système de divertissement en vol
ICAO	International Civil Aviation Organization	L'Organisation internationale de l'aviation civile
IOC	Initial Operational Capacity	Capacité opérationnelle initiale
ITPS	International Test Pilot School	École internationale de pilotes de test
JAR	Joint Aircraft Regulations	Règlements sur les aéronefs communs
JPATS	Joint Aircraft Training System	Système conjoint d'entraînement des avions
KAI	Korean Aerospace Industries	Industries aérospatiales coréennes
LVDT	Linear variable differential transformer	Transformateur différentiel à variation linéaire
MIL	Military Specifications / Requirements	Spécifications/exigences militaires
MOC	Means of Compliance	Moyens de conformité
MRO	Maintenance and Repair Organization	Organisation d'entretien et de réparation
MTOW	Maximum Take-off weight	Poids maximum au décollage
NDA	Non-Disclosure Agreement	Accord de non-divulgence
NTPS	National Test Pilot School	École nationale de pilote de test
OEM	Original Equipment Manufacturer	Fabricant d'équipement d'origine

OMC	WTO – world trade organization	Organisation mondiale du commerce
OTS	Off-the-shelf	Produit prêt à porter
PCM	Pulse Code Modulation	Modulation par impulsions et codage
PFM	Production Flight Manual	Manuel de vol de production
PMBOK	Program Management Body of Knowledge	Document de référence en gestion de programme
PMI	Program Management Institute	Institut de gestion de programme
RVDT	Rotational Variable Differential Transformer	Transformateur différentiel à variation rotationnelle
SPO	Safety Performance and Operational requirements	Performances de sécurité et exigences opérationnelles
TCAS	Traffic Collision Avoidance System	Système d'évitement de collision de trafic
TCCA	Transport Canada Civil Aviation	Transports Canada
US	United States of America	États-Unis d'Amérique
UTC	United Technologies Corporation	Nom propre
WTO	World Trade Organization	Organisation mondiale du commerce
VB	Visual Basic	Langue pour programmer les ordinateurs

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE #1 – Tableau de référence : campagnes d’essais en vol avion

ANNEXE #2 – Article présentée au le congrès International Symposium for Sustainable Aviation 2018 – Università di Roma.

ANNEXE #3 – Article soumis au journal International Journal of Sustainable Aviation 2018

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier particulièrement Darli Vieira, professeur au Département de Management et responsable du programme de Maîtrise en gestion de projet, pour son encadrement et soutien avec les ressources de la Chaire de recherche en gestion de projets aéronautiques.

Un grand merci également au professeur Christophe Bredillet pour les discussions et les contributions au niveau de la méthodologie adoptée dans ce travail.

Merci aussi à Alencar Bravo qui a si généreusement accepté de collaborer à ce travail par des commentaires à différents niveaux de l'approche et du contenu.

Finalement, je voudrais remercier ma famille et mes amis pour leur constante affection et soutien.

1 Introduction

1.1 Contexte : l'industrie aéronautique internationale pour le XXIe siècle

Le 21e siècle a commencé avec la mort subite de deux constructeurs d'avions très traditionnels : Dornier (2002) et Fokker (1996), outre quelques rachats d'entreprises comme Boeing-McDonnell Douglas (1997), Northrop-Grumman (1994), Lockheed-Martin (1995), Bombardier-Learjet (1990). Ces sociétés ont abouti à des fusions ou extinctions (de la plus faible), principalement en raison de l'absence d'un produit approprié facilement disponible ou du moins avec une bonne chance d'atteindre le marché au niveau de la concurrence; en plus d'un faible flux de trésorerie pour soutenir les derniers efforts pour l'essai, la certification et l'entrée en service du produit sauveur.

Ce "bug du Millénaire" n'a pas atteint pleinement les quatre tout-puissant : Boeing, Airbus, Embraer et Bombardier, comme ils ont offert au marché des compagnies aériennes des avions de 50 à 500 sièges, parfois avec un produit exactement au même prix, de la même taille et performance ou avec plus de succès, remplissant un écart de part de marché, préalablement identifié et maîtrisé.

Le monde oriental a également eu ses revers, comme la nouvelle Russie a cessé de fournir des avions de ligne à l'Europe de l'est ou les autres pays communistes. La Chine, l'Inde, la Corée et le Japon ont commencé à investir dans leur propre industrie aérospatiale, mais ils seront dans l'activité de l'assemblage pendant un certain temps, car ils ne poursuivent pas encore l'ensemble du cycle de certification du développement, nécessaire pour l'assurance de la qualité dans le monde occidental.

Les vingt dernières années ont été utilisées pour globaliser la chaîne d'approvisionnement en produits aérospatiaux, avec de nombreux pays et leurs industries de pointe qui tentent de fournir aux grands constructeurs aéronautiques de nouveaux matériaux, machines, procédés et systèmes. De nombreux sous-

ensembles ont été développés dans plusieurs pays, la technologie a été transférée, et les investissements ont également été partagés. De sorte que le fardeau et le risque pour le lancement d'un nouveau produit serait divisé et partagé par les différentes parties, au lieu d'une seule méga entreprise responsable de tous le « bon et mauvais », comme cela a été fait avec les entreprises de l'après-guerre. Mitsubishi au Japon et Kai en Corée du Sud ont commencé à fournir de grandes structures (cadres de fuselage, pièces) à Boeing. GAMESA en Espagne et Sonaca en Belgique étaient des fournisseurs de cadres et d'ensembles d'aile à Embraer (Brésil). Shorts Brothers (en Irlande), Mitsubishi (Japon et Canada) et Spirit (aux États-Unis) peuvent également être considérés comme des grands fournisseurs des cadres partiels assemblés.

Les grands fabricants étendent leur capacité de production pour recevoir des incitations fiscales, de faibles frais de financement, pour surmonter les restrictions d'importation et les suppléments. Airbus a ouvert des usines en Chine et aux États-Unis (Caroline du Nord), Bombardier a ouvert des usines au Mexique et au Maroc, en plus des usines existantes en Irlande (Short Belfast) et aux États-Unis (Learjet), il partagera avec Airbus une usine de montage en Alabama. Embraer a mis en place des assemblages finaux à Harbin (Chine), Jacksonville et Melbourne (Floride).

1.2 Enjeux – Durabilité et Coûts

1.2.1 Investissements

Cette lecture indique que les principaux fabricants d'avions prospères, exigent de grands efforts pour développer de nouvelles technologies, jumelés avec un nouveau produit, éprouvé et sécuritaire, au bon moment, certifié et qualifié par le gouvernement et les agences de sécurité, de sorte que leurs produits peuvent rester en concurrence avec les plus petites dépenses de marché.

Cela signifie que les constructeurs d'avions n'ont jamais tant investi sur les essais, la qualification et la certification, les outils de test, les procédures et les prototypes, avant leur lancement de produit sur le marché.

1.2.2 Gestion des Essais

L'importance du processus de gestion des essais et des qualifications dans le cycle de production de l'aéronef est expliquée ainsi que comment elle contribue à l'assurance de la qualité des produits et à la réduction des problèmes opérationnels et post-livraisons.

1.2.3 Réduction de la Consommation

Enfin, la tendance à réduire la consommation de combustibles fossiles dans l'atmosphère, à réduire l'élimination des matières non biodégradables usagées dans le sol et à augmenter l'énergie réutilisable, a atteint les activités de transport aérien, exigeant de meilleures politiques, costumes, gestion et des solutions d'ingénierie.

1.3 Problématique

Le défi consiste à comprendre et documenter le processus connu pour le test et la certification d'un nouveau projet d'aéronef, et déterminer les meilleures solutions pour améliorer la durabilité et le coût de cette activité.

La durabilité a été utilisée comme un outil pour pousser la recherche scientifique et le développement de toute solution qui peut, d'une certaine manière, améliorer la consommation d'énergie, le stockage de l'énergie et la transformation de l'énergie, vers une réutilisation perpétuelle des biens (Agarwal, 2009).

Les activités aériennes mènent la percée des technologies et des sciences les plus récentes. Le terme d'aviation durable, rassemble autant de sujets que l'aviation est en cause: autant les moyens de stockage d'énergie, de nouveaux matériaux légers, des procédures de fabrication robotique, le cumul de l'information de vols internationaux et locaux, la simulation de flux informatisé de vert la combustion de carburant, parmi beaucoup d'autres moyens pour améliorer la perpétuation de l'énergie et l'utilisation consciencieuse, qui pourra seulement être utilisé par nos prochaines générations (Cook, 2009).

La plupart de ces solutions récentes ne sont pas d'une mise en œuvre facile, pas même moins cher que les moyens actuels, exigent souvent une longue période pour l'industrialisation et encore plus de temps pour la confiance et l'acceptation du marché (client) (Mohan Das Gandhi, Selladurai, & Santhi, 2006) .

L'un des défis pour l'avenir de l'aviation durable, est de transposer en toute sécurité des technologies et des solutions expérimentales de laboratoire à une navigabilité, au transport lucratif, pour les passagers payants et le fret.

La partie la plus importante du développement du nouveau produit d'aviation, après l'idée de conception elle-même, est le test et la qualification de ces changements de technologie. Des tests sont nécessaires pour prouver les données du projet déjà disponibles, recueillir des informations complémentaires sur le rendement complexe et prouver la conformité avec la sécurité et les exigences du marché (Ward, 1998).

Nous proposons d'envisager des tests durables répartis en « environnement durable » et « solution de soutien ». Deux procédures d'opération d'essai définies créées pour identifier la contribution, à différents niveaux à l'utilisation écologique et à la transformation de l'énergie. Le premier, est la nécessité de tester en vol un tout nouveau système, 100% aéroporté et durable.

La deuxième, c'est l'activité de fournir un environnement de test durable pour les propositions basées sur l'aviation: le développement actuel des produits, la qualification et la certification en vertu de la décision réelle.

L'article répertoriera le processus de test actuel, ses dépenses et de nouvelles solutions pour effectuer les mêmes activités requises, pour la « solution durable », qui se traduira par le coût, le temps et la réduction de la main-d'œuvre.

1.3.1 Problématique et Défi

Des tests d'aéronef sont nécessaires pour prouver les données du projet déjà disponibles, recueillir des informations complémentaires sur le rendement complexe, prouver la conformité avec la sécurité et les exigences du marché, ainsi que s'assurer que l'intégration des activités de production et d'entretien sont fonctionnel et sûr (Stoliker, 2005)

Les chiffres des vols d'essai (heures de vol) sont différents d'un opérateur à l'autre et leur taille d'aéronef entraîne différentes quantités de combustion de combustible. C'est une opération qui ne prend rien à nulle part pour de nombreuses fois, et il est souvent blâmé pour tenir l'avion hors du calendrier des profits (ICAO, 2003). Par conséquent, les essais en vol ne sont pas des vols payants car ils ne sont pas des activités naturellement durables non plus.

ICAO Circular 303-AN-176 énumère également les possibilités opérationnelles communes de minimiser l'utilisation du carburant et de réduire les émissions: a) voler le type d'aéronef le plus économe en carburant pour le secteur; b) taxi la route la plus économe en carburant; c) piloter la route la plus économe en carburant; d) voler à la vitesse la plus économe en carburant; e) fonctionner à l'altitude la plus économique; f) maximiser le facteur de charge de l'aéronef; g) minimiser la masse vide de l'aéronef; h) charger le carburant minimum pour effectuer le vol en toute sécurité; i) minimiser le nombre de vols hors recettes; et j) maintenir des châssis et des moteurs propres et efficaces.

Ces mêmes procédures ne sont pas valables pour les vols de développement et de certification puisque sa mission repose sur le soutien à la

sécurité de l'aéronef et non sur le transport de marchandises. Ces procédures sont souvent utilisées pour réduire les coûts dans les opérations d'aviation commerciale, mais cette initiative est rarement trouvée dans l'environnement d'essai et de certification aéronautique.

Le problème à résoudre est de réduire le nombre total d'heures d'essai de vol qui sont exigées de nos jours par tout nouvel aéronef de développement, de certification ou de vérification de vol.

Figure 1: Nombre d'essais et complexité des tests, affiche les articles de test utilisés pendant la campagne de test, les éléments testés (logiciels, matériel, aéronefs) et le nombre prévu d'essais, étant réduit comme la campagne de test progresse.

1.4 Opérations d'essai en vol.

Une opération durable, utilisant la définition de l'OECD (Organisation de coopération et de développement économiques) peut être envisagée lorsque l'utilisation d'une source d'énergie est en quelque sorte renouvelable (critère I), les taux d'assimilation dans les milieux récepteurs de polluants ne sont pas dépassés (critères III), comme lorsque tous les gains sont proches des dépenses (critères II), ou l'inverse (critères IV) (OECD, 2001), (Upham, 2003).

L'énergie peut être stockée dans les mécanismes cinétiques, les combustibles fossiles ou les banques chimiques, et être facilement disponible

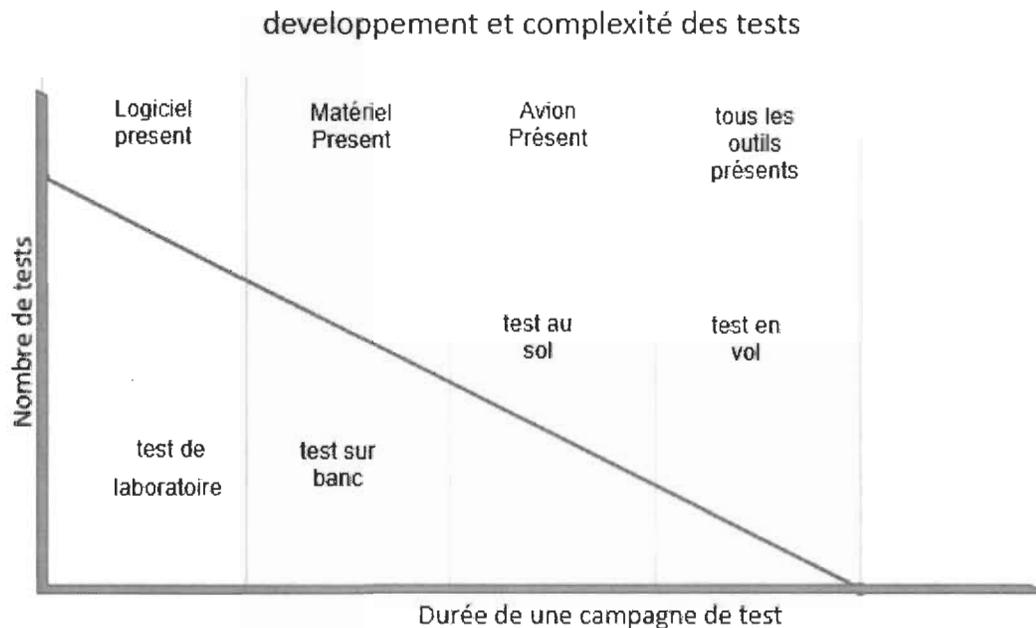


Figure 1: Nombre d'essais et complexité des tests

dans les panneaux solaires, les générateurs aérostatique et les réactions chimiques instantanées (Ibrahim, Ilinca, & Perron, 2008). Aujourd'hui, les combustibles fossiles augmentent les moyens de stockage de l'énergie non durable, car un jour il ne sera plus possible pour récupérer de l'environnement, donc nous concluons le problème général est de réduire l'utilisation des combustibles fossiles et ses émissions atmosphériques, si ce n'est totalement, mais en partie, autant que toutes les technologies disponibles aujourd'hui sont utilisées.

Les moyens résiduels pour améliorer la durabilité des combustibles de combustion sont:

- Réduire l'utilisation des combustibles fossiles;
- Réduire les rejets de gaz carboniques;
- Réduire l'utilisation de matériaux non recyclables ou non-renouvelables.

Lors de l'examen de l'exploitation d'un aéronef, nous pouvons indiquer que tous les vols d'essai ont pour but spécifique et immatériel d'assurer la qualité de sécurité du produit, de sorte que l'aéronef puisse atteindre son objectif final de transport de personnes/marchandises en toute sécurité.

Ces vols sans-recettes deviennent un effort pour tester et certifier une solution améliorée, réduisant par conséquent l'empreinte carbone, les dommages à la haute atmosphère et atteignant indirectement un nouveau niveau de durabilité dans cette activité. Ils sont les moyens qui justifient quelques pas en arrière, pour sauter dans une solution plus propre.

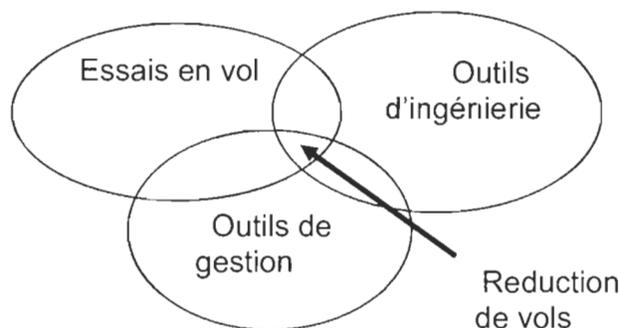


Figure 2: Objectifs de recherche

1.5 Objectifs et description de la recherche

La façon directe de réduire les tests, sont de réduire les activités liées au vol, réduisant ainsi la combustion de combustibles fossiles. Ces mesures peuvent être prises immédiatement, car toutes les technologies sont déjà disponibles, mais malheureusement, elles se trouvent dans plusieurs efforts isolés.

Des outils de gestion et d'ingénierie améliorés (ET) sont utilisés pour réduire les coûts, mais les résultats sont souvent un moyen de ramener le calendrier et le budget du projet dans les valeurs initiales dès le début du projet.

L'approche proposée consiste à rassembler les outils de gestion et les ET de manière coordonnée avec les exigences d'essai, de sorte que le calendrier initial et le budget sont au moins maintenus, sécurisés (garantis), tandis que les heures de vol et les coûts d'exploitation sont réduits.

1.6 Périmètre

Les opérations aériennes peuvent être divisées en: avions de ligne, fret, taxi aérien, secteur privé/nolisé, militaire et non-revenu. La OACI Circulaire 303-AN-176 (ICAO, 2003), classifie les vols hors recettes comme: formation, positionnement, ferry, vols d'essai, développement (essais) et essais moteurs. Cette étude porte sur les opérations aéronautiques pour les essais de développement et de certification. Cette activité spécifique est principalement réalisée par les constructeurs aéronautiques et refinancement (Organisation de maintenance et de réparation).

L'OACI a publié d'autres documents qui gouvernent la réduction des émissions de carbone pour Aircraft (ICAO, 2010), (ICAO, 2016) , mais ils ne s'adressent toujours pas aux d'essais en vol de certification sur ses «possibilités» pour minimiser la consommation de carburant et de réduire les émissions, et mentionne que les vols non-revenus sont «minimum». L'optimisation de l'activité de test est généralement effectuée après que les variables de contrôle de gestion de programme (horaire, coût, main-d'œuvre, qualité du service) sont touchées et récemment remarqué (Gardiner & Stewart, 2000).

Si nous considérons les « essais durables » comme toutes les activités d'essais en vol impliquant une sorte d'amélioration de l'utilisation de l'énergie, l' « environnement durable » est considéré comme toutes les situations et les activités restantes qui fournissent toute autre quantité de durabilité que 100%. La deuxième part de durabilité pour les opérations de test, est à travers l'activité de test lui-même, pour de nouvelles idées, de nouveaux systèmes, de nouveaux prototypes, qui permettra d'améliorer les niveaux actuels de durabilité. C'est des maths directes. Tout ce qui est dépensé, est un compte positif vers la durabilité. Par exemple, les outils d'ingénierie de la Figure 3: Outils pour les tests durables (Ex: propulsion électrique, carburants renouvelables).

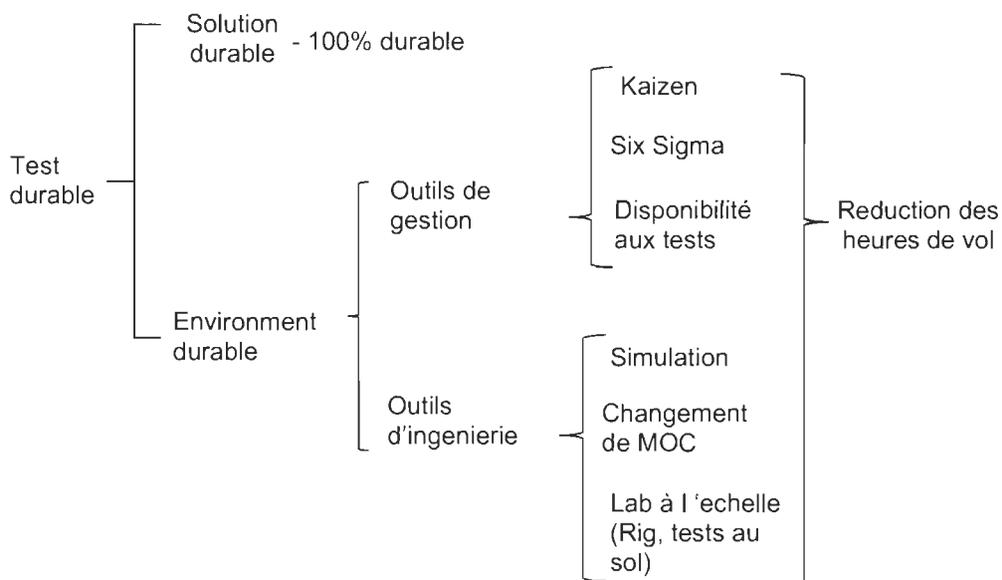


Figure 3: Outils pour les tests durables

Toutes les améliorations seront axées sur l'activité d'essai de l'aéronef, puisqu'il s'agit de la phase responsable de l'assurance de la qualité au cours du développement et non pas des études antérieures sur les dépenses de carburant.

2 Des Méthodes, pratiques et enjeux associés

La problématique managériale

2.1 Processus de test et de certification

Les activités de développement de l'aéronef sont réparties en plusieurs phases : le préprojet et les études de faisabilité, le lancement de produit (jalón), le projet détaillé, la fabrication de prototypes, les essais de développement, la certification/qualification, la production à l'échelle, la livraison du client et la navigabilité continue. L'organisation et la planification des activités de test et de certification doivent avoir une interaction avec toutes les phases de développement. Les membres de l'équipe de test devraient faire partie de l'avant-projet pour compléter le devis, le calendrier et la faisabilité technologique du produit.

L'équipe de test au point de conception est vraiment réduite afin de tester les chefs d'équipe et les principales parties technologiques, de sorte qu'un petit groupe obtient des possibilités de prise de décision. Les gestionnaires de programme doivent prévoir des réunions d'information d'équipe, pour niveler les connaissances du produit et les choix de compromis.

Cette phase est le moment où la plupart des décisions de coût sont prises. Le responsable de l'équipe de test doit équilibrer les devis, de sorte que les prévisions de coûts entrent dans le budget du programme. Le budget total disponible pour la phase d'essai ou même pour l'achat d'équipement d'essai, ne sera jamais publié par le gestionnaire de projet, sinon, le contrôle de la marge de manœuvre sera transféré aux personnes n'ayant qu'une connaissance partielle de l'organisation du projet.

La phase détaillée du projet comprend également une planification détaillée de l'instrumentation d'essai, des antennes de télémétrie et des émetteurs, des dispositifs d'essai spéciaux tels que des ballasts supplémentaires, des *spin chute* (*parachute de contre tourne*), de sortie de secours supplémentaire, des soutiens d'enregistrement vidéo, des sondes externes et du câblage supplémentaire pour tout cet équipement supplémentaire. Outre les prototypes (sol et vol), l'instrumentation de test et les dispositifs de test spéciaux font partie intégrante des investissements de développement.

Le calendrier des tests et la préparation de la documentation proposée sont les activités les plus exigeantes pour l'ingénierie des tests, compte tenu du temps, de l'expérience et du retravail. Le calendrier peut couvrir de 6 à 32 mois dans une période de développement de 60 mois. La planification des tests exige l'exécution des tests précédents, le contrôle des coûts et l'expérience de gestion avec l'intégration de l'équipe d'ingénierie.

La préparation de la proposition de test est nécessaire avant que les tests aient déjà commencé, et implique non seulement des ingénieurs de développement, mais au niveau de l'approbation, implique des représentants de

l'équipe d'essai, avec un niveau de gestion adéquat et aussi l'autorité de certification.

Le processus de gestion pour le développement, l'essai et la certification d'un aéronef est unique pour chaque produit et fabricant, devenant l'un des projets de gestion les plus complexes parmi l'industrie sérialisée, car il implique les technologies de pointe, les réglementations gouvernementales et les besoins des clients du monde entier. Les avions sont fournis aux compagnies aériennes, aux clients d'affaires et aux forces aériennes, et chacun a leurs propres complications d'utilisateur exigeant la meilleure exécution d'un investissement de plusieurs millions (Altfeld, 2010).

2.2 Définitions et complexité de L'environnement interne et externe

Processus de création d'aéronefs - Lancement du produit

2.2.1 Structures de gestion d'essais

2.2.1.1 Grandes industries

La structure disponible pour l'essai est proportionnelle à la taille du fabricant et la plupart du temps, proportionnelle à la taille de leur avion. Les quatre grands fabricants occidentaux: Boeing, Airbus, Embraer et Bombardier, opèrent plus d'une installation d'essai, car ils ont plusieurs (plus d'une) campagnes de test en même temps. Ils doivent surmonter les intempéries et les adversités saisonnières, le trafic aérien régulier et les zones survolées occupées, de sorte qu'ils choisissent de préférence des zones inhabitées avec plusieurs options d'atterrissage.

Les grands centres d'essais en vol sont souvent équipés d'une piste longue et large, d'antennes de télémétrie de données et de hangars d'entretien. La présence de l'ingénierie de développement pour le soutien des essais est fréquente, ainsi la structure complète de bureau est exigée avec tous les effets secondaires: équipe d'entretien, approvisionnement de carburant, outils spécialisés, véhicules de soutien, stockage de pièces de rechange, communication lourde de données, transport, nourriture et hébergement à

proximité. Les tests du système de navigation exigent des stations de radio calibrées et des émetteurs d'approche auxiliaire (ILS) qui augmentent les coûts d'exploitation et d'entretien de l'installation d'essai.

Boeing a des activités de test à toutes ses unités de fabrication : Seattle, Renton, Everett, Long Beach, St. Louis, outre les aéroports éloignés et non-proprétaires de Roswell (TX), Moses Lake (WA) et Fairbanks (AK).

Airbus effectue des essais à Toulouse (sud de la France), en Allemagne et en Espagne. Bombardier exploite des prototypes de Wichita (US), de Montréal, de Mirabel (Québec) et de Toronto.

Embraer effectue principalement des tests de São José dos Campos et de leur centre de test de vol dédié GPX près de Gavião Peixoto.

Il n'est pas possible de faire tous les tests « localement » à leur aéroport d'origine ou à leur base d'essai. Les tests météorologiques ou liés à la température dépendent de la saison et de la chaleur ou du froid que ces endroits peuvent obtenir au bon moment dans le calendrier de développement. Il y a de bonnes chances que le prototype de vol de certification devra être transporté à une région dans le monde qui correspondra à l'exigence météo.

Tous les fabricants de la «part 25 », catégorie de certification pour les grands avions transporteur, doivent soumettre leurs produits aux conditions froides (et chaudes) extrêmes, habituellement trouvées saisonnièrement si prises au bon endroit : les conditions d'hiver de pôle qui peuvent être trouvées artificiellement à Eglin US Air Force base, ou aéroports offrant des conditions environnementales désertiques.

2.2.1.2 Industries de petite et moyenne taille

Les coûts de développement et de certification des vols sont considérés comme élevés pour les plus grands constructeurs et encore plus pour les petites et moyennes entreprises aéronautiques puisque leur lancement de produits sont saisonniers et ne font pas directement partie des dépenses quotidiennes de production. Toute l'infrastructure d'essai est utilisée temporairement, ou juste

pendant l'effort de certification. Le personnel impliqué dans une activité de certification de 2-3 ans est hautement qualifié et demande une formation constante, entraînant ainsi des salaires élevés pour le soutien technique nécessaire.

Ces entreprises opèrent toujours sur avec un personnel minimal. Il peut être la meilleure et la plus rentable des équipes de test, et même un exemple de planification à suivre. Une structure de test optimisée est meilleure, si elle est construite et personnalisée pour une certaine situation de test ou un produit spécifique, qu'une structure qui est toujours disponible et prêt pour n'importe quel projet sur la ligne de production. Une équipe de test générique exige des professionnels hautement expérimentés, capables d'effectuer tous les tests requis pour la certification. L'alternative est d'embaucher un consultant, quand un problème insoluble survient.

En général, ces entreprises ne gardent pas toute l'équipe après l'achèvement de la certification, et elles réduisent constamment le nombre de personnes impliquées. L'embauche et le licenciement entraînent une condition de disponibilité risquée, où les tests peuvent être retardés ou ralentis en raison du manque de professionnels de l'essai formés.

Le dernier aéronef civil produit par Mitsubishi Aircraft (MITAC) a été à la fin des années 80 et leur nouvelle tentative de produire un avion de ligne régional 70-90 Pax, a apporté de nombreux nouveaux défis: personnel qualifié d'essai, comme équipe d'essai de vol, techniciens d'instrumentation et la mécanique de prototype, l'espace aérien au-dessus du Japon est vraiment bondé, en outre il n'y a aucun aéroport qui soutiendrait toutes les exigences de sécurité d'essai comme longue piste, voisinage clair et temps clair de 12 mois (Gates, 2015).

MITAC a choisi d'effectuer tous les tests dans une installation éloignée du Japon, mettant en place un ensemble complexe de soutien technique l'autre côté de l'océan dans l'état de Washington (États-Unis). L'installation d'essai est à Moses Lake et le corps d'ingénierie d'essai reste près de Seattle.

En tant que nouveau venu sur le marché de l'avion de ligne régional, MITAC a résolu certaines difficultés opérationnelles, a apporté d'autres questions comme effet secondaire. Pour surmonter le manque de devises sur le processus d'essai en vol, il a contracté un fournisseur de certification de test de vol, et AeroTec a été élevé pour apporter non seulement le savoir-faire du processus, mais aussi les rares personnes qualifiées, prêt-à-travailler.

2.2.1.3 Sous-traitant

Les entreprises qui ne sont pas financièrement capables de garder une équipe de test complet tout le temps, ou les connaissances capables d'avoir une équipe spécialisée pour les tests, maintiennent une petite équipe de base de et complètent temporairement avec des contractuels professionnels au cours de la haute saison d'essai de vol. Les avantages sont, qu'ils ne gardent pas une grande équipe sur la ligne de paie et peut contrôler les coûts plus facilement, et si la durée du test est contrôlée, le coût final sera contrôlé; et les inconvénients sont, que le taux horaire de l'entrepreneur est bien au-dessus du paiement que d'autres membres de l'équipe de base obtiennent pour le même travail.

Il y a quelques entreprises d'entrepreneur d'essai de vol en Amérique du Nord où il y a plus de personnel formé disponible. Quelques-uns sont liés aux écoles d'essai de vol (NTPS, ITPS), d'autres ont été partagés avec la recherche et le gouvernement (Qnetiq, Calspan,) et les dernières ont été adaptées aux besoins des clients (AeroTec, TTFS).

2.2.2 Client

Le marché de l'avion et la classification des clients peuvent être effectués, selon le type et la taille de l'aéronef en cours de fabrication. La séparation la plus fréquente se produit pour les clients militaires (défense) et civils.

2.2.2.1 Civil

Le marché des aéronefs civils est divisé en tailles d'avions (et en poids au décollage), comme ultralégers, légers, petits, moyens et grands. Plus récemment, une deuxième division a été vue dans l'organisation de l'industrie, qui est due à la part de marché. Il y a une segmentation de portefeuille « commercial » ou « compagnie aérienne » et « entreprise ». De cette façon, non seulement la gamme de produits est divisé, mais aussi la façon dont les exigences du client, les différences opérationnelles et financières sont bien entretenues.

Le client de compagnie aérienne porte habituellement les commandes les plus rentables et de nombreux avions si comparé au client d'affaires. Les compagnies aériennes fournissent habituellement des commandes d'au moins une demi-douzaine d'avions, car les vols réguliers exigent l'horaire régulier, le service normalisé, l'entretien prévu, les travaux communs d'entretien, l'approvisionnement de pièces communes et l'amortissement prévu de l'investissement de produit. Cela se fait plus facilement avec une flotte homogène.

Le client d'affaires cible le temps, le confort et le statut. Il peut s'agir d'officiers de haute entreprise, de hauts fonctionnaires ou de tout simplement des artistes de haut niveau, dont les tâches quotidiennes sont trop complexes pour s'intégrer dans un vol commercial.

L'essai d'un avion d'affaires, appelle à certaines différences opérationnelles que la mission de l'avion, la performance et l'intérieur sont de projets différents des avions de ligne, même si elles peuvent être à l'origine le même avion de base.

2.2.2.2 Militaire

Le marché militaire ou de défense (plus politiquement correct) est défini par les forces armées qui opèrent des véhicules aéroportés. Certains grands pays comme les États-Unis, la Chine et la Russie, exploitent des avions sur leur force aérienne, la marine, l'armée et la garde nationale, multiplient leur puissance d'action et les zones de chevauchement pour patrouiller et contrôler. Ces forces armées indépendantes et multiples ne sont pas la norme, car il conduit un

investissement très élevé et il est le résultant de l'historique et le contexte politique actuel de chaque pays.

Le gouvernement et le client militaire ont des exigences de mission très claires, mais en ce qui concerne les restrictions budgétaires, chaque gouvernement ou le client de l'État essaie d'adapter prêt à porter (OTS) de l'équipement à ces exigences.

Au cours des 30 dernières années, peu d'unités gouvernementales imposent de grandes exigences de conception au(x) fabricant(s), aussi gros que le lancement d'un nouveau produit. Un nouveau projet "feuille propre", a des chiffres qui reflètent la taille et la complexité de la technologie adoptée (USDOD, 2013).

Un chasseur furtif de nouvelle génération peut atteindre 10 milliards US \$, juste pour la phase de développement. « Au total, le Bureau du programme conjoint (US) estime que le développement et l'exécution continus des capacités (C2D2) du F-35 coûtera \$16,4 milliards au cours de cette période de sept ans, dont environ \$11 milliards vont vers le développement et \$5,4 milliards vers l'approvisionnement » (Reim, 2018), tandis qu'un avion d'entraînement primaire chiffres de développement est encore de 1 milliard US \$ à 3 milliards US \$ (Freed, 2017).

Le marché militaire a été l'un des premiers à produire et à adopter des normes et des exigences pour leurs achats, car les équipements financés par le gouvernement doivent avoir des informations pour niveler la qualité des fournisseurs et de leurs produits offerts. Spécifications MIL, normes MIL (exigences militaires américaines et spécifications pour la demande d'équipement) a commencé dans les années 1940 et dans les années 1960, il y avait plus de 6000 documents à cet effet (USDOD, 2013).

La normalisation est bénéfique pour la réalisation de l'interopérabilité, en veillant à ce que les produits répondent à certaines exigences, aux points communs, à la fiabilité, au coût total de possession, à la compatibilité avec les systèmes logistiques et aux objectifs similaires liés à la défense.

La plupart des équipements militaires fournis par le monde occidental ont été fabriqués par les exigences de MIL, et tous les avions militaires opérationnels aujourd'hui, suivent beaucoup de ces exigences de qualité. Récemment (20 dernières années), un mélange d'exigences civiles et militaires est utilisé pour les contrats d'avions militaires, qui venaient d'abord d'un but de la compagnie aérienne (civile) (USDOD, 2013).

FAA, EASA, ANAC, et TCCA (etc.) ont modifié leurs exigences de transport aérien pour améliorer les statistiques de sécurité. Pour chaque nouvel accident majeur, ces organismes de réglementation entament des discussions et des procédures de réglementation pour apporter un meilleur dossier de sécurité au transport de passagers. Comme les opérations militaires deviennent des opérations de « défense », ces clients exigent également une amélioration des résultats opérationnels de sécurité des avions, en partie et prudemment introduisant un mélange des exigences civiles et militaires à leur processus d'achat. Nous pouvons trouver de nouveaux contrats pour les aéronefs Cargo, pétrolier et formateur avec des besoins opérationnels civils, comme les KC-46, KC-390, JPATS, T-X et LAS (avion d'attaque légère).

2.2.3 Main-d'œuvre

La main-d'œuvre impliquée dans le développement, l'essai, la fabrication, la livraison et l'entretien d'un avion de ligne ou d'un aéronef militaire, est très diversifiée et rassemble toutes les sciences dans un effort très coordonné, isolé à très peu d'entreprises et de pays dans le monde. Le savoir-faire pour développer, tester et certifier un aéronef haut de gamme est encore plus particulier, compte tenu de la nécessité de démontrer son respect des réglementations de sécurité, nivelées par les pays occidentaux.

La taille et le nombre de personnes impliquées dans une équipe d'essai sont proportionnelles à la taille de l'entreprise qui fabrique et teste l'aéronef. Cette équipe de test se compose d'ingénieurs de test, de pilotes d'essai, d'ingénieurs

d'instrumentation et de techniciens, d'ingénieurs d'entretien et de techniciens, et enfin de quelques experts en gestion, comme détaillé sur Figure 4:Exemple de structure de projet de campagne de test.

Il est important de dimensionner le nombre minimum de personnes impliquées lors de l'exécution d'un test dans un article de test. Pour chaque article d'essai, nous devons considérer le responsable de l'essai (ingénieur d'essai de vol), l'opérateur d'article de test (pilotes, 1 ou 2), l'entretien de terrain de prototype et la préparation d'instrumentation d'essai de vol. Ce vol et l'équipage au sol changent très peu avec la taille de l'article de test, avion, simulateur ou plate-forme au sol, comme il le fait avec le coût associé à leur salaire, mais il change avec le nombre d'articles d'essai fonctionnant en même temps. Les employés ou les entrepreneurs à temps plein engagés, se traduiront par le coût fixe pour la fabrication pendant toute la durée de la phase de développement et de certification.

2.2.3.1 Équipe de gestion

La structure de l'équipe de gestion est également liée à la taille de l'entreprise, à son bagage et à son expertise, elle peut être de type fonctionnel ou matriciel (PMI, 2013) (comme indiqué par PMBOK). Les 15 dernières années, les entreprises en croissance comme Embraer et Bombardier ont subi des changements structurels de la gestion fonctionnelle à la matrice, tout en éprouvant une augmentation de la main-d'œuvre pour soutenir ces changements, a également perçu une meilleure performance du projet pour soutenir des produits et projets plus complexes simultanément.

L'exemple dans Figure 4:Exemple de structure de projet de campagne de test, affiche l'équipe de gestion des tests composée de fonctions (colonnes) et de projets (lignes) dans une organisation matricielle forte.

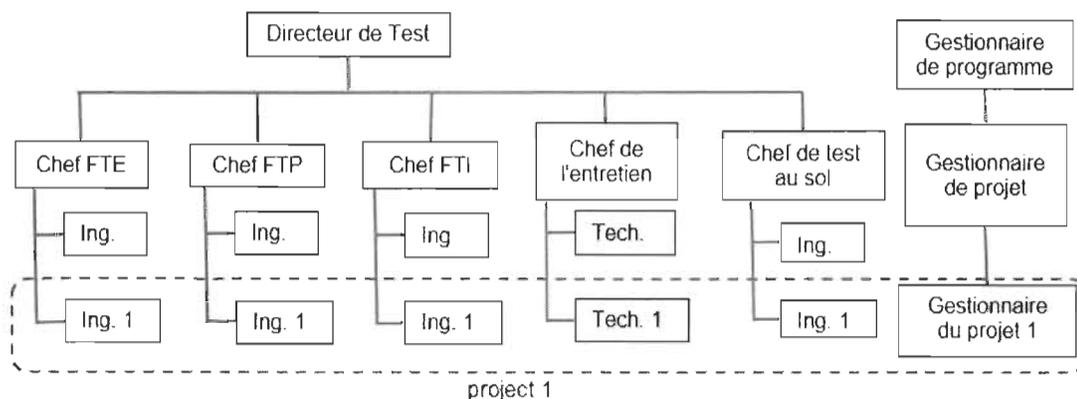


Figure 4: Exemple de structure de projet de campagne de test

2.2.3.2 Équipage

L'équipe d'essai de vol se compose d'un ou deux pilotes (FTP) et d'un ou deux ingénieurs d'essais (FTE), et ces chiffres dépendent de la taille et de la complexité de l'aéronef qu'ils testent. En plus d'une formation de pilote et d'ingénieur de haut niveau, ils doivent être spécialement formés pour l'activité d'essai. Ils doivent recueillir des connaissances en aérodynamique, qualités de vol, performance, systèmes aéroportés, projet d'aéronef, entretien, règlements, facteurs humains, évaluation des risques, instrumentation d'essai, fonctionnement de l'aéronef et météo. La plupart des pilotes et des ingénieurs impliqués dans l'activité de test ont une formation militaire de base, mais ce n'est pas une exigence formelle. Les fabricants d'avions traditionnels ont beaucoup d'équipiers d'essai qui étaient originaires d'autres spécialités d'ingénierie, et ont été transférés à l'interne pour effectuer des essais d'avion. Ils acquièrent de l'expérience « sur le tas » et sont qualifiés par leur propre travail et leur expérience passée par leurs collègues.

Seulement huit écoles de pilotage d'essai de vol professionnelles sont actuelles et reconnues pour la formation d'essai de vol dans le monde. Ils sont situés en Angleterre (École de pilotage de test de l'Empire - ETPS), France (École du personnel navigant essais et de réception - EPNER), États-Unis (École pilote d'essai de la Force aérienne - USAFTPS, École pilote d'essai de la marine - NAVYTPS, École nationale de pilotage d'essai - NTPS), Canada (International

Test Pilot School - ITPS), Brésil (Esquadrão de Formação em Ensaio em Voo), Russie (Fedotov Test Pilot School), Espagne (Escuela Española de Ensayos en Vuelo y Aeronavegabilidad) et Inde (Indian Air Force Test Pilot School). Ils offrent un cours complet de 10-12 mois qui est principalement consacré à l'équipage militaire, mais les deux écoles privées (ITPS et NTPS) exécuter une formation plus diversifiée avec des cours de spécialisation à court terme (2-4 mois), pour l'évaluation et la certification des avions commerciaux.

2.2.3.3 Équipe au sol

L'équipe d'essai au sol est configurée d'ingénieurs (FTI et maintenance), de techniciens mécaniciens et de techniciens électriciens, en plus de leurs gestionnaires. Ils prennent toutes les tâches pour assembler, ajuster, étalonner, maintenir, expédier et actionner les prototypes d'essai tant au sol et avant le vol d'essai.

Le taux d'essai de vol prévu ou planifié indiquera la taille de l'équipe. Pour une campagne à rythme lent (un vol/jour), il devrait y avoir une équipe pour la préparation et l'expédition pendant la journée, et une équipe pour après l'entretien d'essai et la préparation pour le lendemain. Il y a très peu d'essais de vol effectués la nuit, principalement pour des raisons de sécurité et de disponibilité de l'équipage de nuit.

Le personnel dédié à l'instrumentation de test a plusieurs spécialisations en tant que projet matériel et de configuration; création, installation et maintenance de logiciels d'acquisition et de visualisation; installation et maintenance de télémétrie de données; fidélité, enregistrement, stockage et diffusion de données en interne à l'ingénierie. Le nombre de membres du FTI n'est pas dicté que par le nombre de prototypes, mais aussi par la portée des activités menées par cette équipe, en ce qui concerne la manipulation des données. Si la visualisation de données et le logiciel de traitement est fait "maison", cette équipe est presque doublée.

L'équipe de technicien d'entretien est formée par le nombre de prototypes et le taux d'essai. Les techniciens mécaniques et électriques composent les disciplines de maintenance. Pour les réparations structurelles, qui ne sont pas communes, il doit y avoir d'autres personnes spécialisées impliquées, comme les tôles, les matériaux composites et les ouvriers du câblage.

Le nombre de personnes impliquées (équipe de test) n'est pas toujours linéairement proportionnel au nombre de prototypes (voir

Tableau 1). Il y a un bond dans le nombre d'ouvriers en augmentant le taux d'essai d'une à deux activités quotidiennes.

Un FTE peut gérer des tâches d'un prototype à la fois, mais sera limité à un test tous les deux jours, parce que le temps de préparation et de coordination est jusqu'à 80% du calendrier personnel. Un deuxième FTE de l'équipe alternera les tâches quotidiennes de vol, de sorte que le test « suivant » peut être préparé pendant que le test « en cours » se déroule.

Le nombre de pilotes dépend du type d'aéronef, mais généralement deux FTPs travail comme équipage minimum. Un pilote de secours et un pilote en chef doivent être ajoutés pour des programmes plus grands avec plus de prototypes volants (2 +) et un taux d'essai plus élevé (2 tests par jour).

Les ouvriers formés et expérimentés sont habituellement assez flexibles pour prendre plus d'activités pendant une période connue, ou pour agir en tant que secours en cas d'absence de collègue. Ce régime d'heures supplémentaires est possible dans un délai fixé et négocié, et devient un fardeau non seulement pour le travailleur, mais aussi pour le gestionnaire, en ce qui concerne les paiements en temps supplémentaire et le calendrier de travail de sécurité limitée.

Les prototypes volants nécessitent des ajustements, une maintenance programmée, la configuration et l'étalonnage des instruments, la configuration et l'étalonnage des systèmes aéroportés. Ces activités se font principalement juste après les tests et pendant la nuit, qui sont le seul temps libre disponible sur l'agenda du prototype. Après le taux d'essai de vol prévu, il devrait y avoir le quart

de travail pour le pré-vol et l'expédition, le quart de travail pour l'entretien après des essais et la configuration, avec l'autonomie pour fournir et être responsable de choix des solutions et s'assurer que l'avion prêt pour les tâches du lendemain. Le quart de travail de nuit avec une équipe de maintenance complète est également nécessaire pour fournir des inspections périodiques et des configurations de longue durée. Le premier changement de maintenance doit commencer plus tôt que le changement d'ingénierie, ce qui porte une optimisation sur le planning d'expédition, comme l'article de test sera rapide lorsque l'équipe d'ingénierie et de vol arrive tôt le matin.

Tableau 1: Type et quantité de travailleurs pour les essais de la part 25

# de prototypes	1		2		3		4	
# vol / jour	1	2	2	4	3	6	4	7
Ingénieur d'essai de vol	2	4	4	8	6	10	8	12
Pilote d'essai de vol	2	5	5	9	7	15	10	14
Ingénieur d'instrumentation de test	1	2	2	2	3	3	4	4
Technicien d'instrumentation de test	2	5	5	5	7	7	9	10
Mécanicien/électricien d'entretien	4	10	7	15	12	21	14	22
Ingénieur entretien	1	1	1	2	2	2	2	2
Ingénieur de configuration	1	1	1	2	2	2	2	2
Gestionnaire	1	1	1	1	1	1	2	2
Équipe totale de test	14	29	26	44	40	61	51	68

2.2.4 Article de test

Les articles de test ou les prototypes sont le premier produit assemblé ou des pièces de produit qui sont disponibles pour effectuer les ses tâches prévues. Ils peuvent être des plates-formes de système, des structures partiellement assemblées, des plates-formes d'essai interconnectées (oiseau de fer), des systèmes installés sur un autre segment aéroporté (banc d'essai d'air), des

simulateurs de sol, des générateurs de signal et le plus proche possible au produit final: Modèle.

Il y a un nombre optimal d'articles de test qui peuvent être ajoutés à la campagne de test. En utilisant plus de prototypes que la capacité de gestion des connaissances s'adapte, se traduira par le potentiel de main-d'œuvre inutilisée, inutilisés prototype d'investissement et de toute évidence des dépenses inutiles. Ce nombre optimal peut être fixé par le taux de test mensuel (à partir des données sur l'annexe #1), et il est limité par les investissements de plan d'affaires, dérivés de la date d'entrée en service pour le premier client. Les plus grands fabricants utilisent de 3 à 4 prototypes, ou 3 prototypes et le premier élément de production en série, et exceptionnellement un 5^e avion, mais cela change aussi l'investissement avec la main-d'œuvre.

La sage planification dans un projet complexe comme ce cas est: "si vous en avez un, vous n'en avez pas", et cela signifie que votre opération est trop cher pour être arrêté par un simple manque solution de rechange. Ce sujet peut être un instrument, un travailleur clé, un système, un prototype, un fournisseur ou une pièce détachée. Il doit y avoir un dimensionnement approfondi de l'investissement, les dates de livraison, les défis technologiques, et la planification de base pour préciser le nombre de prototypes volants.

L'utilisation d'un seul article de test entraîne une faible production d'essai d'un vol par jour, et une durée de campagne totale d'au moins 28 mois, pour voler 1800 heures de vol (hv). Cette alternative de test à faible coût conduit également à la condition de calendrier à risque élevé. Deux articles de test sont utilisés pour augmenter les possibilités de test, sur plusieurs sites d'essai comme conditions météorologiques différentes, des instruments de test, des configurations d'essai et peuvent être présents lors des événements de marketing en même temps que les tests ne sont alors pas interrompus.

Le troisième article d'essai est couramment utilisé avec des instruments de test réduits et un intérieur de passager conforme. S'il s'agit d'un avion de ligne ou d'un chariot d'affaires, il sera utilisé pour tester tous les articles intérieurs comme

les sièges, les compartiments à bagages, système de divertissement en vol (IFE), l'éclairage interne, l'insonorisation et l'isolation thermique.

Le premier prototype est souvent jeté (désassemblé ou emmené dans un musée) après que tous les tests aient été effectués. Les échantillons d'essai structurel sont conservés dans des essais en boucle, de sorte que la durée de vie de la flotte peut être assurée et peut-être même actualisée.

Lorsque vous démarrez la campagne de test, une augmentation progressive de la prise en charge doit être planifiée. Il est difficile d'avoir des décisions pour augmenter la main-d'œuvre, les systèmes de sauvegarde et de rechange, que ces éléments de réduire le risque, mais le coût augmente.

Tout le support d'essai deviendra soudainement inutile lorsque les essais sont finis. Les pièces de rechange peuvent être acheminées vers la chaîne de montage, mais les pièces prototypes de rechange seront jetés ou tout au plus, reconditionné. Les membres de l'équipe de test auront leurs activités réduites et probablement éliminées pour le temps « entre » les projets, ce qui est une excellente occasion de faire des rafraîchissements de l'équipe, de formation ou de repositionnement, mais parfois le déplacement est la seule solution, puisque le prochain rassemblement pour un test sera très loin dans le futur.

En analysant les données historiques, le taux mensuel moyen des campagnes d'essais productifs passe d'un test tous les deux jours, au maximum de deux sorties de test par jour et, exceptionnellement, il peut y avoir un troisième essai tardif ou de nuit. Ce taux plus élevé est seulement possible avec deux ou plusieurs équipes d'essai, et le plus important, le brouillage des données, le personnel de rédaction de rapports disponibles pour acheminer toutes ces informations à l'analyse et l'approbation.

Le prototype de vol est l'élément d'investissement le plus coûteux pour le développement et la certification. Il porte non seulement le fardeau d'être le premier article manufacturé, mais aussi d'être le seul, jusqu'à ce qu'il y ait assez de pièces produites disponibles pour le second.

Le succès total du produit est sur la façon dont le prototype a été planifié et construit, parce que tout changement au produit pendant la phase d'essai, retardera la mise en service, et alors, la livraison au client.

La quantité de prototypes doit être choisie en fonction de la complexité du produit, de la complexité du projet, de la durée prévue du projet, du risque global du projet et du budget disponible....

2.2.5 Exigences

Le produit doit être conçu à partir des besoins des clients, mais chaque client à ses propres exigences, de sorte que le produit doit refléter l'expertise du fabricant et l'utilisation du client et les objectifs de profit. Il y a cinq sources principales pour les exigences de produit: compagnie, marché, gouvernement, sécurité et exigences de client.

Les exigences internes de l'entreprise, proviennent de la tradition de l'entreprise et l'identité, de leurs fondateurs et les raisons fondamentales de base pour leur premier produit ou la ligne de produits. Leurs caractéristiques transmises à leurs produits se refléteront directement à l'image du produit, leurs qualités opérationnelles et la norme de qualité globale pour toutes les choses sortant de la ligne de production avec cette marque. Ces caractéristiques se rapporteront au nom du produit et seront connues des parties prenantes comme caractéristique intrinsèque de l'entreprise.

Les exigences du marché proviennent des études de marché et des tendances du marché qui montrent le manque ou l'excès d'une certaine caractéristique dans le produit à acheter. Le Marché est utilisé ici comme tous les clients, fournisseurs et partenaires qui peuvent être liés à la production et à l'utilisation du produit (Wand, 2009). L'innovation se produit habituellement dans les étapes, si peu de produits étant libérés sont vraiment innovateurs, et beaucoup suivent juste une technologie précédente, pour réduire le risque associé à cela. D'autre part, si le produit n'a pas de différentiel, la réponse du client sera terne.

L'exigence du gouvernement ou de l'organisme de certification est historiquement liée à la sécurité publique (FARs, JARs, MIL, ASTM) des machines et des véhicules. Depuis la création de l'Autorité Aéronautique Civile (CAA) à la fin des années 30, les réglementations documentées ont orienté les limitations et les exigences du projet pour les aéronefs civils (FAA, 2017). La plupart des directives et des règles ont été écrites à partir d'un problème de sécurité expérimenté ou d'un accident, si une telle mauvaise piste serait éliminée ou réduite à l'avenir.

Les États-Unis ont été les pionniers non seulement du transport aérien, mais aussi des règlements aériens qui discriminent les autorisations de vol pour les machines et leurs opérateurs (Thurber, 2006).

Les exigences du client sont classifiées en option offerte (changement cosmétique, visuel de produit, options de système) et demande spécifique (devis de coût et certification de demandes). Le produit de base est offert au lancement du produit, mais les exigences du client peuvent devenir catalogue optionnel, si l'idée n'est pas seulement différentielle de marque, et assez bon pour la mise en œuvre de la ligne de produits supplémentaires.

Les demandes spécifiques des clients peuvent venir tôt dans le projet, et ils diffèrent du nombre de sièges, la gamme, la vitesse et l'hébergement des passagers. Au début des années 30, Boeing construisit la tondeuse hydroplan spécifiquement pour Pan Am; Lockheed a produit le « Constellation » pour TransWorld Airlines dans les années 40, et beaucoup d'autres avions ont commencé comme demandes de client.

2.2.6 Enregistrement des données

Toutes les informations générées dans un test doivent être disponibles pour une analyse plus approfondie, qui se traduira par des rapports à la conclusion des exigences, commencer un projet d'amélioration, corriger ce qui se passe mal et même annuler le lieu si les choses sont totalement fausses. L'instrumentation de test de vol (FTI), qui est responsable de la perpétuation des données recueillies

lors des tests, prend la troisième place parmi les investissements les plus importants pour l'effort de certification des produits, juste après le coût du carburant de l'avion.

Il existe de nombreux types de capteurs disponibles qui transforment les actions physiques en signaux électriques. Un aéronef d'essai produira de la vitesse, qui peut être mesurée par le positionnement différentiel des orbites satellites (GPS) ou de la vitesse, qui peuvent être mesurés par pression d'air différentielle, par un système Pitot-statique; la température peut être mesurée par dilatation métallique différentielle (thermocouple); son qui peut être capturé par des microphones haute-fidélité; vibrations pouvant être mesurées par des accéléromètres; la force qui est mesurée par « strain-gauges ».

Le prototype doit avoir des modifications de câblage, de structure et d'installation supplémentaires pour recevoir tous ces capteurs qui sont équipés d'autres fils de sortie de l'unité ou des circuits de conversion de signaux. Chaque carte de circuit d'acquisition transformera les signaux électriques (DDP- différence de potentiel) en unités d'ingénierie qui seront enregistrées et analysées plus avant. Le poids du câblage de l'aéronef est presque doublé dans le cas du prototype.

Il existe plusieurs systèmes de matériel électronique nécessaires pour la détection, la transformation, l'enregistrement, la visualisation, la conversion, la transmission et la réception de toutes les données. Après que les signaux de capteurs sont transformés en unités d'ingénierie, ils sont transmis dans un signal de transmission, qui peut être via une interface de modulation de code d'impulsion, et plus tard inséré dans un protocole Internet pour la distribution. *"Les données binaires brutes des paramètres sont converties au format PCM en utilisant le logiciel d'application de convertisseur OEM fourni. Par conséquent, les données sont converties de forme binaire en forme d'unité d'ingénierie en utilisant des facteurs de conversion appropriés pour le traçage et l'analyse."* (G.Shekhar, 2015).

Les équipements suivants sont utilisés :

- *Air data booms* - sonde de données aériennes (droit et pivotante);
 - *Static trailing cones* - sonde de données aériennes suspendu;
 - g-mètres calibrés;
 - Jauges de force portatives;
 - Récepteurs GPS haut de gamme et antennes pour un positionnement précis de l'aéronef-mesure des distances de décollage, distances d'atterrissage, distances d'accélération-arrêt, performances de freinage, Minimum Vitesse de contrôle au sol (V_{mcg}) écart d'axe de la piste, Erreurs de l'altitude, de vitesse et position;
 - Capteurs de position - potentiomètres de piqûres, potentiomètres rotatifs, LVDTs, RVDTs;
 - Transducteurs de Pression;
 - Débitmètres;
 - Capteurs de température - thermocouple wire/probes/assemblies, RTD probes, thermistors, thermomètres en verre;
 - Cellules de charge, capteurs de force, capteurs de couple;
 - Stations météo portables - Vitesse / direction du vent, température de l'air extérieur, humidité relative;
 - Équipement d'enregistrement vidéo;
 - Conditionneurs de signaux;
 - Systèmes d'acquisition de données et enregistreurs de données.
- (Thompson, 2008)

Les données vidéo sont le type le plus récent d'enregistreur d'information qui apporte beaucoup de détails, mais nécessite une interprétation très profonde et l'utilisation d'experts, car il est très couteux en temps pour examiner et analyser les données. Il nécessite une grande partie de la capacité de stockage, en plus de filtrage rapide et des canaux de distribution.

Le système de télémétrie est utilisé pour transmettre le flux de données à une station réceptrice au sol, de sorte que toutes les informations relatives au vol peuvent être distribuées aux experts du système qui ne sont pas à bord de l'aéronef pendant le vol. Ceci est principalement fait pour réduire l'exposition aux conditions de vol du personnel d'ingénierie requis pour analyser des données pendant des manœuvres et pour fournir des réponses promptes à l'équipage de conduite. Ces actions sont nécessaires dans les tests de taux de données élevés, les tests à grande vitesse et les tests à haut risque.

Le système de télémétrie fait également partie d'un investissement initial élevé dans les installations d'essai, et a un coût élevé à maintenir, car il y a des antennes auto-repérage, récepteurs, navetteurs, radios communicateurs, système d'interphone, d'enregistrement de données et de la visualisation de matériel et de logiciels. Toute cette structure est sujette à l'opération et à la maintenance spécialisée constantes.

L'obsolescence technique des équipements informatiques électroniques doit être comptabilisée lors de la planification et de la fourniture de devis dans le domaine de l'instrumentation. Le délai pour lancer un nouvel avion et commencer à livrer des résultats (5-7 ans), résultat dans la nécessité de mettre à niveau la plupart de la gestion des données, l'enregistrement et l'équipement de compilation, avant de commencer à piloter le nouveau prototype, de sorte que vous éliminez la chance d'avoir à le faire dans le milieu des activités de test.

2.2.7 Visualisation et analyse de données

Le matériel et les logiciels nécessaires pour l'enregistrement des données de test, le traitement et la visualisation après le test est très spécifique et la demande d'un développement précoce, l'achat, la préparation et l'installation pour être disponible avant la campagne de test commence, de sorte que tous les ingénieurs et les techniciens impliqués sont familiers et formés avec l'opération et les procédures d'entretien.

Le logiciel de traitement des données et de visualisation, peut être acheté à des fournisseurs spécialisés disponibles, commandé pour une utilisation spécifique par le biais de fournisseurs de services de consultation et développé « maison », et totalement personnalisable par sa propre équipe de développement logiciel.

2.2.8 Dispositifs spéciaux

Ces systèmes sont généralisés comme spéciaux, parce qu'ils ne sont pas de l'équipement standard de l'aéronef, ils ne sont pas des équipements d'essai comme des systèmes de mesure, mais ils sont des exigences pour exécuter des essais en vol, dans leurs conditions de sécurité.

Les dispositifs de sécurité spéciaux peuvent être considérés :

- Tail (Spin) chute: c'est un parachute avec la forme spéciale, la zone, la longueur et la caractéristique d'ouverture pour fournir assez de traînée aérodynamique sur la queue de l'avion, comme pour forcer un tangage vers le bas l'attitude, dans le cas d'un angle d'attaque irréversible, sur des vitesses inférieures à la vitesse de décrochage pour cette configuration. Il est un peu obligatoire pour les tests d'enquêter sur les caractéristiques de contrôle à très faible vitesse, pour atténuer la situation de vol non récupéré.
- Sortie de secours supplémentaire: l'avion est déjà équipé de sorties normales (portes) et de sorties de secours (fenêtres), mais cet équipement supplémentaire est normalement installé en tant que dispositif supplémentaire, pour des situations exigeant la sortie prompte, même les conditions en vol. Il existe plusieurs façons de fournir une telle évacuation pour l'équipage de conduite, comme des leviers mécaniques, des tiges à ressort, des fenêtres fracturées et même des accords explosifs autour de la structure. Tous ces efforts et dépenses sont nécessaires pour un système de sécurité supplémentaire qui, heureusement, ne sera jamais utilisé.

- Ballast: tous les avions doivent passer par le poids extrême et les vérifications d'état de vol de centre de gravité (CG). Ces conditions sont seulement possibles pour réaliser avec une installation de poids supplémentaire, sur différentes positions internes, ainsi le CG peut être changé. Les réservoirs d'eau et les sacs de plomb sont normalement utilisés pour cela. Le ballast d'eau devient un système de sa propre complexité car il a besoin de changement de position pendant le vol, ainsi des pipes, des valves, des pompes, des compteurs de liquide et des commutateurs de commande doivent être ajoutés.

Tous ces systèmes exigent un investissement élevé qui tient son propre projet, développement, essais et processus de fabrication, outre la formation supplémentaire pour l'opération et l'entretien (Jo, 2016).

Le processus de création d'aéronefs commence par une exigence du marché, d'une enquête auprès des clients dans le monde entier ou une vérification constante des conditions opérationnelles et financières du produit des acheteurs possibles. Une étude de marché peut sembler simple, mais puisque le temps de gestation pour cette ligne de produit prend de 5 à 8 ans, cette étude de marché simple doit regarder de 10 à 12 ans dans l'avenir, ainsi cet outil, même ayant coût élevé pour le client dans la phase préliminaire, cette option d'investissement s'avère rentable.

Les constructeurs d'avions sondent constamment leurs clients actuels, futurs et potentiels. Ils planifient périodiquement des questionnaires clients-fournisseurs, qui fournissent une vue d'ensemble de la vie du produit, comme la livraison, l'exploitation, l'entretien, la mise à niveau et les problèmes des fournisseurs ainsi que la vérification des possibilités de lancement de nouveaux produits. Leur service de renseignement est toujours à sonder la situation financière du client, les plans d'investissement, les possibilités d'acheminement, les objectifs de gestion et les besoins d'expansion parmi d'autres indicateurs clés d'entreprise (Flouris & Lock, 2009).

Il y a aussi une grande enquête sur l'activité de leurs concurrents, tels que l'innovation technologique, la capacité de production, la fidélité des clients, les avantages de vente, les avantages des fournisseurs et la performance du produit, le coût, le prix et l'applicabilité de la technologie.

La plupart des partenaires et des fournisseurs ont également leurs propres prévisions publiques et des aperçus du marché, généralement publié avec les rapports financiers trimestriels ou semestriels. Les constructeurs de produits aériens dépendent beaucoup de ces positions de client et de fournisseur, pour enregistrer les activités passées et les taux de rendement, ainsi, de nouvelles tendances du marché et une prévision plus solide peuvent être tirées, pour le dimensionnement du produit et de la production, en plus des décisions stratégiques globales.

Le lancement de produit est officiellement fait en interne après que la recherche de marché est certaine de l'acceptation du produit et après qu'un plan d'affaires de produit soit approuvé pour le bénéfice prévu. Le rassemblement de personnes spécialisées est progressif et commence avec les professionnels les plus qualifiés plaçant leurs expériences et opinions sur un produit de base (Flouris & Lock, 2009).

Il doit y avoir des cycles de développement périodiques et partiels pour l'approbation du prototype pour les essais. Il devrait également y avoir un degré élevé de résultats de test acceptables pour approuver les pièces pour la production sérialisée ou les commandes des fournisseurs.

Les plus grands constructeurs d'avions sont en fait des assembleurs d'avions, car beaucoup de grandes pièces sont commandées pour la production sur des équipements de tiers, dispersant l'investissement, l'effort de projet et le risque pour les partenaires commerciaux et les fournisseurs de haut niveau (Altfeld, 2010).

2.3 Gestion des Tests

Dans l'industrie aéronautique, les essais des avions peuvent être classés en cinq types d'activités qui dépendent du type de véhicule et de l'objectif final du résultat de l'essai. Ce sont des tests fonctionnels, des tests de production, des tests de maintenance, des tests de qualification et de certification. La partie la plus importante est l'exigence de test, qui dirige toutes les tâches à faire, et les résultats escomptés.

Les tests fonctionnels sont toutes des activités faites dans une fonction ordonnée pour vérifier si l'équipement (machine) ou le système (interconnexion de l'équipement) remplit partiellement ou totalement sa fonction prévue.

Les tests de production sont la liste des activités effectuées sur un système ou un équipement pour vérifier sa fonction prévue après son assemblage et son démarrage pour la première fois. Ces tests sont effectués par le fabricant et sont la dernière partie des tâches de production. Les procédures de test dans ce cas doivent être suffisamment complètes pour prévoir tous les modes de fonctionnement et d'échec prévus dans le projet, même pour des situations d'utilisation de faible probabilité.

Les tests de maintenance sont la liste des activités effectuées sur un système ou un équipement, pour vérifier sa fonction prévue, après qu'il ait eu des mesures correctives. Cette procédure peut inclure également des procédures de test détaillé et de procédures de libération pour vol.

Les tests de qualification sont toutes des activités comparatives faites à un système ou à un équipement, afin de montrer les objectifs de rendement en tant qu'orientation par les objectifs du projet, du client, de la réglementation ou de l'organisme gouvernemental. Ils sont souvent exigés par les organismes gouvernementaux et les forces militaires, comme assurance de la qualité pour leurs exigences de mission (USDOD, 2013).

La capacité opérationnelle initiale (IOC), est la première atteinte à la capacité d'employer efficacement une arme, un élément d'équipement ou un système de caractéristiques spécifiques approuvées qui sont habitées ou

exploitées par une équipe adéquatement formée, équipée et soutenue par une unité militaire. Le pleine capacité opérationnelle (FOC), est la réalisation complète de la capacité d'exploiter ce système. Ce sont les jalons les plus importants du processus militaire de qualification et d'acceptation (USDOD, 2018).

Des tests de certification sont effectués pour prouver que le produit a atteint les exigences de qualité énumérées par les organismes gouvernementaux ou réglementaires. Ces activités prennent un temps considérable de développement du produit et sont préalables à la phase de production. Les tests de certification sont généralement effectués après que le fabricant est tout à fait sûr des résultats à obtenir et pas de nouvelles découvertes ou de nouvelles caractéristiques peuvent se présenter à partir de ces résultats d'essai, sinon les modifications apportées au produit déclenchera la longue chaîne de modifications exigées par la production sérialisée (Pavlock, 2013).

2.3.1 Préparation

La planification de la campagne d'essai de vol se fait très tôt sur le projet, et peut-être fait dès que la cotation des coûts et le plan d'affaires est fixé pour le projet, parce que le coût total des tests prend une tranche considérable de temps de développement et d'investissements.

La séquence des essais en vol est dictée par une approche de sécurité des restrictions de l'enveloppe de vol de compensation. Il devrait y avoir des jalons énumérés sur la planification macro concernant les limitations, et les tests qui prennent en charge une séquence de vitesse, le poids et le centre de gravité incrémente vers l'exécution de toutes les tâches d'enveloppe de vol.

La préparation pour le premier vol comprend l'instrumentation de test et les vérifications de télémétrie des données, de sorte que la surveillance et l'enregistrement des données sont disponibles avant que les tests de vérification des systèmes individuels ne commencent. Il devrait y avoir des essais pour assurer le contrôle au sol sûr à toutes les vitesses, avec la direction et la manutention de frein jusqu'à poids lourd. L'utilisation d'une piste plus longue que

la normale, d'une longueur de 2500m à 3000m, améliore les marges opérationnelles de sécurité pour l'accélération-arrêt au décollage et les performances de freinage faibles nécessaires à l'atterrissage ou au décollage avorté.

2.3.1.1 Horaire

Les activités de test de planification commencent par une inclusion de la planification de test dans le planning du projet principal. Au moins trois niveaux de planification sont nécessaires. La planification des macros se fait avec des tâches ventilées en mois (exceptionnellement effectuées en semaines), et montrant des orientations pour les jalons du projet les plus importants, comme les questions contractuelles, les problèmes de paiement, les livraisons des partenaires/entrepreneurs, les livraisons des clients et le développement des questions. Ces objectifs devraient être les plus solides et les plus inchangeables.

Tableau 2: Identification des coûts, est un exemple de programme macro pour la campagne de test de 5 prototypes d'avions, fait dans MS Excel. Ce logiciel fournit de bons indices visuels et le meilleur calcul, ainsi que personnalisation complémentaire de VB. Chaque barre horizontale représente un prototype différent. Les lignes verticales sont liées à l'heure de début et de fin de chaque tâche. La barre supérieure énumère l'unité de temps principale comme semaine ou mois. Des informations flottantes peuvent être ajoutées pour répondre aux jalons et aux détails de la cible.

Il existe plusieurs outils logiciels qui peuvent aider à ce but (Capterra, 2018) comme MS Project, Primavera, Wrike, MS Excell, MS PowerPoint etc..., et aussi longtemps qu'ils fournissent Dynamic Data Exchange, de nombreux autres logiciels de visualisation peut venir en aide.

Le deuxième niveau de planification (délais moyens) prend la plus grande quantité d'information sur le projet. Le temps et les tâches sont détaillés à l'ordre, la quantité, la quantité de temps, le nombre de travailleurs, les prérequis et les post-activités. Il est généralement arc-en-ciel de couleurs pour les types de tâches

groupées, et un couple de journées d'activité deviennent très petit dans un calendrier de 2 ans. Il devient très difficile de visualiser l'ensemble de l'outil si imprimé, de sorte que la version électronique doit être toujours disponible. Ce niveau de planification doit être revu chaque semaine. Les tâches retardées et les tâches terminées doivent être transmises à partir du calendrier à court terme. Figure 5:Exemple de planification macro, et Figure 6:Exemple de Planification de niveau moyen, sont un bon exemple complexe d'un planning de niveau moyen, effectué avec MS Excel avec les données importées de MS Project.

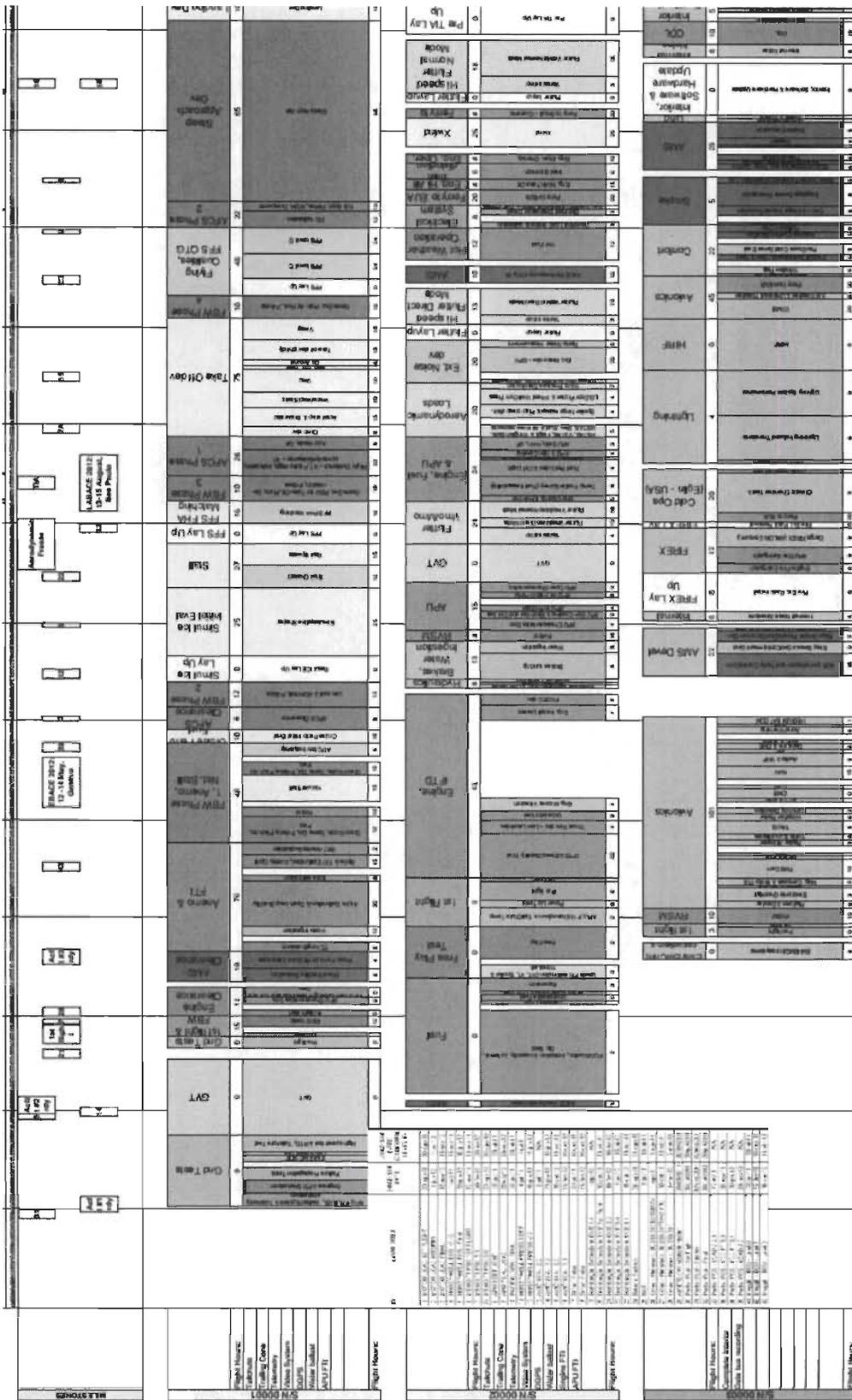


Figure 6: Exemple de Planification de niveau moyen

Le troisième niveau de planification est effectué quotidiennement, compte tenu de toutes les modifications apportées à la situation actuelle des tâches et de leur niveau d'achèvement. Des activités inattendues, des corrections d'urgence et même des modifications du niveau supérieur de planification sont effectuées à ce niveau de planification. Les tâches ont un statut volatile et doivent être « figées » ou fixées sur le calendrier pour le jour suivant. La réunion de programmation implique au moins un membre représentant de tous les secteurs opérationnels pour l'essai, comme les ingénieurs d'essai, les ingénieurs d'entretien, les ingénieurs de développement, et les gestionnaires de projet.

Un graphique Gantt peut être utilisé lorsque les tâches du prototype sont liées ou ont des tâches prédécesseurs ou successeurs. Figure 7:Exemple d'horaire mensuel détaillé, est un exemple de planification détaillée pour les tâches préalables pour un premier vol du prototype aéroporté.

Quand plus de détails pendant la journée sont exigés par les activités, il devrait y avoir une manière facile de déplacer des tâches dans cette semaine. Figure 7:Exemple d'horaire mensuel détaillé, est un exemple, pour un taux de test élevé, comme deux tests dans la journée et une période de maintenance de nuit devrait être fait tous les jours.

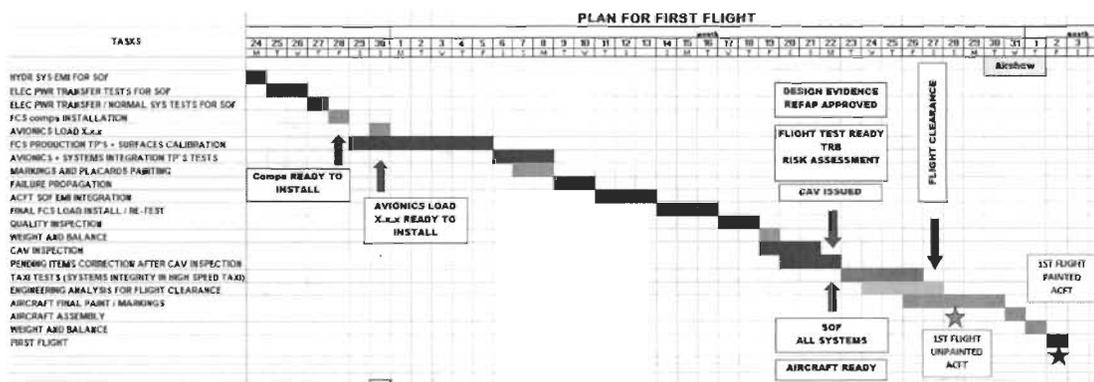


Figure 7:Exemple d'horaire mensuel détaillé

	Mon - 19/Nov/2012	Tue - 20/Nov/2012	Wed - 21/Nov/2012	Thu - 22/Nov/2012	Fri - 23/Nov/2012	Sat - 24/Nov/2012	Sun - 25/Nov/2012
AM	AIRCRAFT ASSEMBLY	1) FTI Check 2) Telemetry and Video link check (F-5 ramp)	FCS Load Install (Ommegang) OE 001204	FCS TP's	Skin Weaviness	Production Pending Items	Production Pending Items
PM	AIRCRAFT ASSEMBLY	1) Transfer F-23 2) Production TP RAT	FCS Load Install (Ommegang) OE 001204	FCS TP's	Cabin Safety	Production Pending Items	Production Pending Items
ON	AIRCRAFT ASSEMBLY	Transfer 07/2 Honeywell Reworked Bleed Duct Install	FCS Load Install (Ommegang) OE 001204	FCS TP's	Production Pending Items	Production Pending Items	Production Pending Items

Figure 8: Exemple d'Horaire hebdomadaire détaillé

2.3.1.2 Analyse des risques

Toutes les tâches du projet ont leurs propres risques. Plus d'options d'atténuation sont disponibles au début de la phase de planification du projet, que plus tard dans le cycle de vie du projet, et ils ont de meilleures chances de succès s'ils sont initiés tôt. Pour cette raison, l'analyse des risques devrait d'abord être faite dans les premiers stades de la planification du projet (Hullet, 2009).

Les catégories de risque du projet peuvent être classifiées en fonction du contexte, du produit, de la taille et de la complexité de l'entreprise. Pour les plans d'essai et de développement des aéronefs, les risques peuvent être caractérisés par: les changements externes (réglementaires, environnementaux, gouvernementaux ou de marché); interne (modification du temps, du coût ou de la portée); imprévisible (environ 10% inconnus) et technique. Les risques de gestion peuvent avoir sa source sur le calendrier, le coût, la qualité, la portée, les ressources ou la satisfaction des intervenants (Hullet, 2009).

Tests de performance, comme détermination de la vitesse de décrochage, sont souvent accompagnés de mesures d'atténuation des risques comme chute de traînée de queue, pour rétablir l'attitude de tangage sécuritaire après un départ; résultats de simulation précis des vitesses prévues et de l'angle d'attaque; caméras externes pour inspecter les conditions structurales de l'aéronef avant l'essai; un avion Chase pour aider à la récupération des attitudes anormales, la

comparaison des données aériennes, l'inspection de la structure externe, superviser les événements de sécurité critiques, la compensation de l'espace aérien (Ward, 1998).

Les tests de risques élevés, qui sont clairement minimisés et réduits (pour des raisons de sécurité) peuvent finir par être effectués une seule fois, et les témoignages des autorités de certification sont effectués par délégation, vérification à distance (télémétrie) et post-traitement des données d'essai enregistrées résultats comme mesures d'atténuation.

Les risques du projet sont différents des risques d'essais et sont traités par différents niveaux de la structure (Figure 9:Exemple catégories de risques du projet). Les risques liés au projet sont des possibilités organisationnelles et de gestion qui devrait être considérées, énumérées et minimisées pour le succès du projet, tandis que le risque de test, sont les facteurs technologiques, opérationnels et humains qui influent sur l'exécution de la sécurité des tests.

Même si le risque du projet est analysé avec les mêmes outils approximatifs que le risque de test, les objectifs des procédures d'atténuation des risques du projet sont vers le succès de l'ensemble de l'entreprise, tandis que l'évaluation du risque de test et les atténuations fonctionnent directement dans l'opération de prototype, en terrain, en vol ou toute situation impliquant la sécurité de la campagne d'essai. Ces outils sont la gravité de l'événement, la probabilité d'événement, l'expérience précédente, le défi technologique et les conditions de résultat atténuantes disponibles (voir Figure 10:Exemple classification de risque des essais).

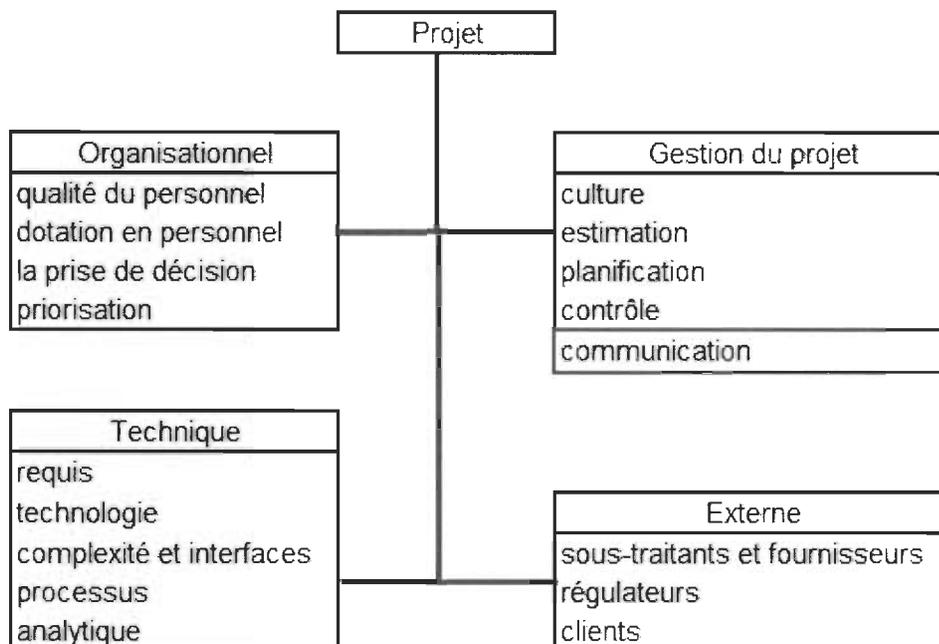


Figure 9:Exemple catégories de risques du projet

		matrice d'évaluation des risques			
		catastrophique	critique	marginal	négligeable
gravité probabilité	fréquent	haut	haut	sérieux	moyen
	probable	haut	haut	sérieux	moyen
	occasionnel	haut	sérieux	moyen	faible
	éloigné	sérieux	moyen	moyen	faible
	improbable	moyen	moyen	moyen	faible
	éliminé	éliminé			

Figure 10:Exemple classification de risque des essais

2.3.1.3 Proposition de test

La proposition d'essai est le document officiel produit pour détailler toutes les procédures d'essai, l'enregistrement des paramètres, les résultats escomptés,

le format des résultats et la conformité aux exigences pour tout test de développement, de certification, fonctionnel ou de production.

Ce document est normalement fait par l'ingénieur de développement, l'ingénieur d'essai et l'équipage de conduite. Il doit contenir toutes les informations nécessaires pour préparer, exécuter le test et rapporter les résultats au format correct.

Pour un projet de certification de test de la « part 25 » standard, il est normal d'avoir 1000 à 1500 différentes propositions de test.

2.3.2 Exécution-vérification

La configuration du prototype a le même niveau d'importance que l'exécution du test lui-même, car si le test est effectué à une configuration matérielle ou logicielle non conforme à l'exigence, les résultats ne sont pas comparables, donc peu concluant par la dissimilitude. C'est un test gaspillé.

Le contrôle de configuration doit être effectué sur la base d'une liste de numéros de pièce, qui doit être testé et qui sont considérés comme les meilleures et les plus récentes pièces à être disponibles sur le premier élément de production. Si une pièce énumérée est décidée à être améliorée après les essais de certification, tous les résultats d'essai affectés par cette partie doivent être répétés.

Le test consiste à exécuter une séquence détaillée de tâches avec l'aéronef et/ou ses systèmes, qui fournissent des informations à comparer avec les exigences. Sur certains tests de performance, il est possible de vérifier ces résultats avec des paramètres connus tout de suite, mais il devrait y avoir souvent une analyse de données post-test, qui donnera des graphiques, des limites et des changements opérationnels à inclure dans les rapports de certification.

La proposition de test (TP) est le premier niveau d'un script détaillé de test. Il s'agit d'une exigence pour les commandes de tâches internes que l'ordre d'ingénierie est, en outre il est utilisé dans le cadre du plan de test de certification. Il inclut moyens de conformité (MOC), description du prototype, description de

l'instrumentation, manœuvres, attentes de résultats d'essai et toutes les tâches pour actionner un système spécifique.

L'équipe d'essai utilise un document encore plus détaillé et convivial tout en effectuant des tests. Le « test card » effectue des actions pas-à-pas et est produit dans différents formats qui apporte la meilleure interaction possible entre l'équipe de test et les tâches à exécuter. La carte de test a d'abord été réécrite des tâches de la proposition d'essai, dans une genouillère à transporter à l'intérieur du cockpit. Aujourd'hui, il se trouve dans un format numérique, dans un ordinateur portable ou une tablette, de sorte que toutes les informations recueillies pendant le test sont rapidement téléchargées à une banque de données numériques, après le test, pour réduire le temps après l'analyse et la conclusion globale et les rapports de résultats.

2.3.3 Gestion des prototypes

La campagne de développement et d'essai de la « part 25 » exige des moyens de s'assurer que le produit final se comportera comme prévu. L'utilisation de prototypes de fabrication et d'essai est un moyen court de fournir des tests fonctionnels partiels de systèmes distincts, la jonction de systèmes complexes, réduit les copies des systèmes et des prototypes complets de l'aéronef livrable.

Les avantages d'un prototype sont la possibilité d'inclure la collecte de données et l'instrumentation d'enregistrement; utilisation des connexions, des structures et des liens qui sont encore en cours de cycle testé dans d'autres prototypes; fournir la qualification d'assemblage pour le procédé de fabrication; servir de dispositif de formation pratique pour les opérateurs et l'équipage; valider rapidement les procédures opérationnelles et les procédures d'entretien; et enfin, être le véritable dispositif de test pour les exigences de certification.

Un prototype peut être envisagé: un avion entièrement assemblé; un avion partiellement assemblé pour l'essai de fatigue structurale et de cycles; une plateforme complète du système, comme une cabine avec la tuyauterie de conditionnement d'air, halètements, ameublement, ventilateurs; tous les câblages

électriques avec connecteurs et LRU (unités de remplacement de ligne), système de carburant complet avec tous les tubes, tuyaux, vannes, robinets, filtres, événements et structure; toutes les commandes et surfaces de vol, avec actionneurs, amortisseurs, joints, interrupteurs et capteurs de position; une partie aérodynamique réduite ou un modèle à piloter dans une soufflerie et vérifier les calculs et les simulations effectués précédemment, numériquement ou graphiquement. Toutes ces informations provenant des prototypes aideront à sécuriser les conditions de sécurité pour les essais répétés (ou non) en vol.

2.3.3.1 Rigs

Le *Rig* c'est une plate-forme d'essai et est une reproduction du système, en dehors de l'avion, sur des conditions contrôlées, pour des essais finaux, des améliorations, des mesures et des comparaisons. Ces conditions contrôlées peuvent être considérées comme un laboratoire qui est équipé pour changer les conditions ambiantes comme température, pression, moite, vibration et paramètres principaux de configuration de système (ajustements), mesure et résultats d'enregistrement.

2.3.3.2 Iron bird

Le « *iron bird* » est un article d'essai statique qui rassemble plus d'un système d'avion, avec le câblage final, pneumatiques, actionneurs hydrauliques comme commandes de vol et engrenages pour des essais de cyclisme. C'est un laboratoire lourd, spacieux et complexe qui réplique la forme, les systèmes, les numéros de pièce et les cycles de vols réels, pour plusieurs fois successivement. La plupart du temps il porte les premiers prototypes de système, qui va dans le cycle d'essai pour être plus tard installé dans le premier prototype. L'analyse du cycle prévoit des problèmes structurels, de mouvement, de lubrification, de fatigue et de performance.

2.3.3.3 Prototype de vol

Le prototype de vol est en fait le produit réel, avec la plupart des pièces finales choisies pour être livrés au client, qui peut remplir la certification, entreprise, projet, la sécurité et les exigences du client. La plus grande différence entre le premier article de livraison et le premier prototype est le système d'acquisition de données et les pièces spéciales d'essai qui fournissent l'information pour des rapports de résultats sur des manœuvres de performance et de manipulation.

La quantité de prototypes de vol disponibles stipulera la sortie de test maximale, et par conséquent la durée de la campagne d'essai, et enfin la date de certification qui permet au client de recevoir et d'exploiter sa nouvelle flotte.

L'industrie utilise une moyenne de deux prototypes pour la campagne d'essai. Il supporte environ 4 vols par jour, des activités de test dans deux endroits différents, testés avec différentes configurations et différents instruments de test en même temps. Il réduit également le risque de stopper les activités d'essai si pour une raison quelconque sur le prototype est de force sur maintenance ou hors de travail.

2.3.3.4 Premier article de production

Le premier article de production en série est normalement également utilisé pour les tests, et il est le premier choix pour réduire les coûts de test, parce qu'il peut être vendu et exploité par le premier client, peut-être avec quelques allocations contractuelles et le prix réduit en raison de 200 à 400 heures déjà enregistrées. Les fabricants de petite et moyenne taille comptent sur leur premier produit à vendre, en plus de fournir des données et des conditions pour le test de conformité complète et la certification.

Cet article doit être entièrement conforme. Cela signifie que toutes les pièces, systèmes et assemblages sont les résultats finaux de la production, les meilleurs résultats qui ont été utilisés pour démontrer les exigences à des fins de certification. Il est également normal d'avoir ces premiers éléments de production

en mise à niveau et de recevoir des annonces (directive aéronautique), pour obtenir le meilleur et le système amélioré installé avant que le client le reçoive et commence le transport des passagers.

Le premier article est également normalement utilisé pour l'intérieur et l'ameublement test, la réception des premiers sièges passagers, l'éclairage, les nuances de fenêtre, air conditionné, gaspeurs (valve de ventilation), connecteurs, et la plupart du système de divertissement en vol (IFE), comme les moniteurs d'écran, les prises de courants, la sonorisation, etc.

2.3.4 Financement

Le développement complexe des avions est à peine pris entièrement par le fabricant seul. Le financement d'un nouveau développement de produit peut venir aussi des fonds de partenaire, de client, de gouvernement et d'entités de recherche. C'est une pratique courante, d'avoir un soutien partagé de toutes les parties mentionnées ci-dessus, comme le montant à investir atteint plusieurs milliards de dollars, et une seule partie ne sera guère le soutenir entièrement.

Tous les constructeurs d'aéronefs ont bénéficié d'un financement gouvernemental, dans une partie de leur vie, mais depuis les années 90, la décision de l'OMC exige une aide gouvernementale limitée dans des lieux privés, afin de maintenir les conditions du marché uniformément égales entre tous les concurrents au sein le même produit. Bombardier, Airbus, Embraer et Boeing ont été accusés (entre eux) d'un financement gouvernemental illégal de leurs produits. Cette question a été discutée et gouvernée par des panels de commerce, condamnant le pays d'infraction à surtaxer les pétitionnaires. Ces processus prennent habituellement plus de 5 ans pour être gouvernés au sein de l'OMC, et les pénalités peuvent disparaître avec une compensation du marché par une infraction du demandeur original.

Il y a des projets d'avions dont le succès n'a été possible que parce que le projet a été divisé entre d'autres investisseurs. Ils faisaient partie des fournisseurs ou des fabricants de systèmes qui profiteraient de l'utilisation de leur produit dans

le nouvel aéronef. Le ERJ-145 (avion régional 50 places) a été conçu au cours d'une période qu'Embraer appartenait au gouvernement, et son financement provient principalement de partenariat avec GAMESA de l'Espagne, qui a été initialement contracté pour la fabrication de l'aile ; Honeywell (pour l'approvisionnement en avionique) et Allison (Rolls-Royce) pour fournisseur de moteur. La cellule a également été divisée pour 2 autres fournisseurs : Sonaca et ENAER, qui ont pris les risques du développement, en plus du financement. En contrepartie, ces partenaires sont devenus des fournisseurs à vie pour ce produit.

La phase d'essai d'un aéronef exige au moins 1/3 des investissements énumérés pour l'ensemble du développement du produit et le début de la production. Ce financement est évolutif à la taille de l'aéronef pour la complexité du développement et la phase de production, mais les tests de certification ne sont pas. Quelle que soit la taille de l'aéronef, la main-d'œuvre nécessaire pour mener une campagne d'essais en vol peut être considérée comme la même, car les mêmes exigences doivent être démontrées. Les différences de temps et d'investissement constatées dans l'industrie sont le résultat du « savoir-faire des essais en vol » ou de l'expérience précédente, de la complexité du projet et des outils utilisés pour aplanir le processus décisionnel en matière de problèmes.

Il est très courant de voir la planification des tests sous-estimée. Dans le montant des heures de vol, le montant des tests de développement, le montant des tests d'intégration, et enfin le montant des investissements consacrés aux tests et à la certification. Il existe de nombreux exemples de petits (Cirrus, Lancair, Piper, Diamond, Sino-Sweringen, Grob...) aux entreprises de taille moyenne (Fairchild-Dornier), qui ont fait faillite ou ont abandonné leur produit, car ils ont dû étirer leur phase d'essai et de certification parce qu'il a pris plus de temps, plus d'heures de vol, et de façon concluante parce qu'il a coûté plus que prévu.

Les retards de développement et de la reprogrammation de la campagne de test se produisent également avec les grandes entreprises (Boeing, Airbus, Embraer, Bombardier), mais comme ils sont plus fortement financés, ces tronçons de calendrier imprévisibles sont moins ressentis par les clients. Pour ces tailles

d'entrepreneurs, les revers sont à cause d'un pépin de nouvelles technologies ou inconduite de nouveaux fournisseurs.

Les petits et moyens constructeurs d'avions sont ceux qui souffrent le plus. Parfois en raison du manque d'expérience de certification, du manque de maturité dans le produit, ou des problèmes de développement inattendus qui conduisent à beaucoup retravailler, néanmoins leur produit était une bonne idée de marché.

2.3.4.1 Coût des essais

Le coût des tests est catégorisé comme une somme des coûts fixes et des coûts variables (Shiozawa, 2016). La partie fixe peut être considérée comme le montant dépensé périodiquement, s'il y a des essais, des vols ou des progrès de calendrier. Il s'agit du salaire du travailleur, du coût des installations (immeubles, bureaux), des droits annuels, des permis d'exploitation, des assurances, des factures de communication, de l'eau et de l'électricité.

La partie variable est considérée comme le montant directement proportionnel à la quantité d'essais effectués, comme le nombre de vols et d'activités prototypes liés à consommables, comme le carburant, l'entretien, les pièces, les frais d'exploitation, les voyages, les locations de véhicules.

Les valeurs les plus importantes pour le développement et les essais sont attribuées pendant le fonctionnement des prototypes de vol comme combustible, main-d'œuvre (ingénierie, équipage de conduite, entretien) et installations (bureaux, hangars, aéroport).

Figure 12: Pourcentage du type de coût, indique le pourcentage du coût total des tests pour les coûts fixes et variables pour 3 tailles différentes d'avions. La taille de l'équipe de test et le coût des installations sont presque les mêmes pour la plupart des part 25 tests, même si le pourcentage total est augmenté. Le coût des heures de vol liées à l'utilisation de carburant, devient le coût le plus élevé que la taille de l'avion augmente trop.

Le temps de test entraîne la deuxième part des coûts : la main-d'œuvre de développement, comme le projet, le système et les ingénieurs d'essai, les

techniciens de système et d'entretien, les pilotes et l'équipe au sol. Plus il faut de temps pour résoudre les démonstrations d'exigence, plus le coût de la main-d'œuvre sera engagé.

Tableau 2: Identification des coûts

Variable	Description
n	Durée de la campagne d'essai (mois)
a	Coût des installations
b	Honoraires, licences
c	Factures
d	Taux horaire de travail
e	Nombre de travailleurs
f	Heures de travail mensuelles
j	Quantité de type de travailleurs
h	Heures d'essai en vol
g	Consommation de carburant
p	Prix du carburant
m	Maintenance / Pièces
o	Opérationnel / frais d'aéroport
t	Voyages
r	Location d'équipement

$$= (h.g.p) + (m + o + t + r) + n.(a + b + c) + n. \sum_{i=1}^j d_i.e_i.f_i$$

Coût variable
+
coûts fixes

Figure 11: Coût total de l'opération d'essai

La Figure 11: Coût total de l'opération d'essai, indique les détails du calcul du coût total de l'opération de test. Les éléments de coût sont identifiés au Tableau 2: Identification des coûts, comme des éléments de coût variable sur les éléments à gauche et à coût fixe sur le côté droit de l'équation. La combinaison de

l'opération se trouve à le Tableau 1: Type et quantité de travailleurs pour les essais de la part 25.

Le nombre d'heures d'essai pour une campagne de certification de la part 25 « efficace » peut varier de 1000 à 2500 heures de vol. La Figure 10:Exemple classification de risque des essais et l'annexe #1 afficher les données pour la durée x heures de vol (hv), qui peuvent être utilisées comme référence aux dépenses de taille. Les données ont été extraites de plus de 60 développements d'avions de ligne différents des 30 dernières années.

La campagne de test « efficace » est prise en compte lorsque le nombre de HV et sa durée prévue sont maintenus jusqu'à la fin des essais et qu'ils entrent dans le montant prévu dans le plan d'affaires.

Le coût du retardement du produit « entrée dans le marché » n'est pas communément prévu et devrait être inscrit comme risque de projet, avec un plan de sauvegarde et des procédures d'atténuation. Le délai de livraison peut être dû à des problèmes de développement et de certification, problèmes de fabrication ou problèmes de disponibilité de pièces.

Les contrats de vente stipulèrent généralement des pénalités de dommages pour retard de livraison, car après la clôture d'une vente, le client prend plusieurs mesures pour recevoir et faire fonctionner l'aéronef. Ces mesures comprennent l'embauche et l'entraînement des équipages et des navigants; location ou construction d'un hangar et d'un espace de rangement; achat et stockage de pièces détachées; vente de billets de voyage et de contrats de livraison de fret; achat d'outils d'entretien et de contrats d'installations aéroportuaires.

Ces mêmes contrats de vente stipulent également l'atténuation pour le client, comme prix inférieur par unité (escompte), le marketing et la publicité plus élevés et le financement spécial, qui devient un coût d'effet secondaire sans nom.

Plus vite vous montrez la conformité du produit, plus vite le fabricant peut commencer à produire et à livrer pour les clients.

La quantité d'essais à effectuer pour certifier un aéronef est mesurée selon des règles différentes.

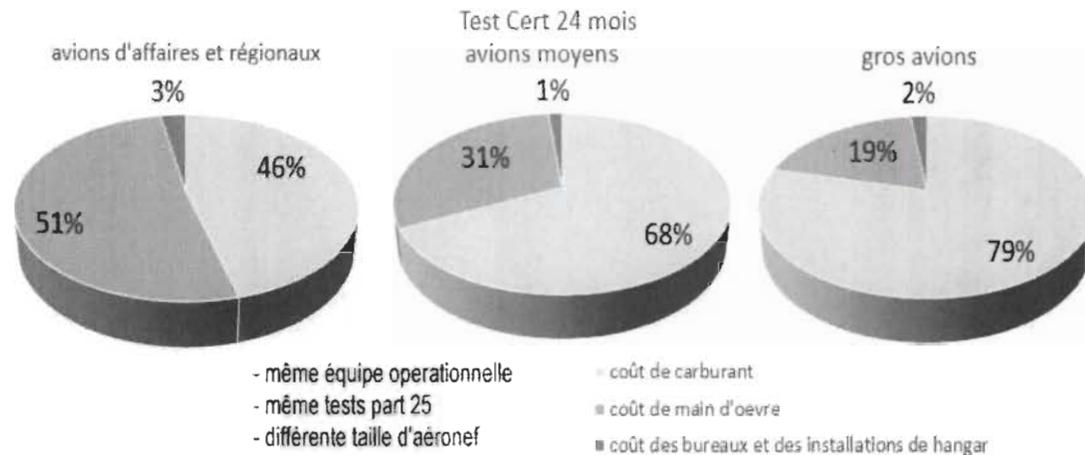


Figure 12: Pourcentage du type de coût

2.3.4.2 Cotation

La cotation est l'estimation des coûts qui comprends les marges de risque en fonction de la complexité du projet et du client cible, et de la marge bénéficiaire en fonction des besoins du marché, de la disponibilité des concurrents et des projections de rentabilité des investissements. Même si le client se trouve dans la même entreprise, la marge bénéficiaire doit être calculée et incluse dans le prix final offert.

Les méthodes suivantes pour l'estimation des coûts des tests sont utilisées:

L'estimation paramétrique (PE), est couramment utilisée à des stades très précoces de développement d'un aéronef. Il établit une corrélation entre les données géométriques statistiques de l'avion et son coût par une équation connue sous le nom de relation d'estimation des coûts (CER). Cela peut être fait pour l'ensemble du produit ou en décomposant les pièces ou les systèmes.

« Case Based Reasoning » (CBR) peut être utilisé pendant les phases ultérieures du projet, car il est construit sur l'expérience précédente et la base de données de l'historique des produits. Il utilise aussi des déductions en utilisant les nouvelles informations, testées et révisées.

« Activity based costing » (ABC) et « Detailed Cost Estimating » (DCE) ne peuvent pas être utilisés pendant les phases de produit précédentes, car ils exigent des informations qui pourraient ne pas être encore disponibles. L'ABC exige de mesurer le coût des activités dans le processus désiré, alors qu'ils sont tous identifiés, répertoriés et modélisés (Hellenbrand, Helten, & Lindemann, 2010). Même si l'objectif est un coût de produit, chaque sous-tâche sera évaluée par rapport aux dépenses connues, rendant possible une comparaison directe des estimations avec des résultats réels.

« Target Costing » (TC) est utile tout au long du cycle de vie du produit, cependant, cela n'est possible que lorsque d'autres techniques et outils d'estimation sont intégrés dans le cadre de TC. Il combine les données des outils existants de gestion des coûts et d'ingénierie des coûts, tels que Value Analysis (VA), Value Engineering (VE), Design to Cost (DTC) et gestion des risques. (Rush & Roy, 2000)

Les estimations des coûts de la campagne d'essai commencent tôt dans les études de faisabilité du projet, et peuvent déterminer à l'approbation du plan d'affaires, car il comprend une très grande partie de l'investissement total du programme.

2.3.5 Examen des opérations d'essais en vol

Les essais en vol sont les moyens les plus faciles de démontrer que l'aéronef est conforme aux exigences de sécurité, de performance et de fonctionnement (SPO). Ils peuvent être classés dans:

- Tests fonctionnels ou de production pour vérifier si un système fonctionne (générer des résultats comme prévu) comme ils le devraient (comme décrit dans l'AFM, PFM...);

- Les essais d'entretien effectués après que l'aéronef a échangé des pièces, passé par la procédure de maintenance et une vérification de sa fonctionnalité est nécessaire avant la libération pour une utilisation générale (AMM);

-Tests de certification/qualification pour démontrer l'ensemble du projet, le prototype ou la modification est conforme aux exigences du gouvernement/du marché (FAR, EASA, ANAC, Mil Spec.), liés à SPO reqs.

Tous les essais en vol exigent un article de test conforme, une proposition de test (Guide de demande), une routine (liste de contrôle) (USDOD, 1996), une personne responsable du test (demande et interprétation des résultats de données), une équipe de test formée et enfin un rapport de résultats de test.

Un article de test conforme signifie que cet article utilisé pour l'essai, est équivalent dans tous les détails importants à l'article qui sortira d'une ligne de production et sera à la disposition du client. L'état de conformité est le document de preuve résultant d'une inspection d'article et de son état actuel pour l'essai. Cette inspection d'article peut être une comparaison visuelle directe, ou une vérification de processus documentée, si ce processus est déjà qualifié et convenu avec l'agence de contrôle.

La proposition d'essai est le document qui contient et autorise toutes les activités qui doivent être effectuées pour démontrer que le produit est conforme aux règlements. Ces règlements peuvent être des exigences de projet de rendement interne, des exigences de régulateur, des questions de contrat de client et des améliorations de sécurité. La proposition de test est ensuite transcrite dans une routine de test détaillée (carte de test), donc chaque action de test se fait dans une séquence organisée, jusqu'à ce qu'un résultat valable soit trouvé à partir de ces actions.

L'équipe de test qualifiée est formée de pilotes d'avion spécialisés et d'ingénieurs, et leur formation exige une connaissance approfondie de l'aérodynamique, des systèmes aéronautiques, du projet et de l'exploitation, ainsi que de toutes les exigences et règles que l'aéronef sera testé. Ces ingénieurs et pilotes finissent par faire toute la planification, la préparation, la négociation et l'exécution de toutes les activités pour les articles d'essai.

Le rapport de résultat de test est le document qui vient comme sortie de tous les travaux de test. Il doit être préparé par les personnes qui ont participé à

ces tests et/ou ont été chargés d'analyser toutes les données collectées par ces tests.

Les essais en vol ne doivent pas se faire avec l'objectif principal de «découvrir» ou de «découverte de nouvelles choses», car il ne devrait pas être une procédure d'essai et d'erreur (Stoliker, 2005). Même si les essais en vol sont toujours considérés comme une activité expérimentale, c'est-à-dire que vous ne pouvez pas obtenir le résultat que vous voulez, c'est une activité qui devrait être fait pour prouver des résultats que vous connaissez déjà et attendez. C'est un processus de démonstration. Tous les résultats connus précédents, qui indiquent que le test sera couronné de succès, doivent être disponibles en tant que support de planification, de décision et de conformité par d'autres moyens d'ingénierie comme: simulation numérique, calculs, essais au sol, essais système distincts (plateformes), tests de laboratoire, essais de prototypes à l'échelle, et leur analyse des risques (Maggio, 1996).

Les exigences d'essai (certification ou qualification) viennent habituellement par des règlements d'organismes privés/gouvernementaux (FAA, ANAC, EASA, spécifications de mil, OIN, ABNT) (FAR, 2018) (EASA, 2013), demandes de contrat de client et politique de qualité d'entreprise.

Il y a des exigences pour tous les niveaux de la vie de produit: conception, développement, essai, fournisseur, acceptation, production, livraison, entretien et écart. Il est normal de voir les exigences utilisées d'un niveau à l'autre, comme par exemple les exigences de développement utilisées comme exigences de test, et la plupart du temps ils atteignent leur objectif, mais comme nous obtenons dans un projet complexe ou un produit, chaque niveau de vie du produit doit conserver sa caractéristique spécifique de l'exigence, ou il peut être au-dessus ou sous requis, ce qui entraîne un prix trop élevé ou un produit de mauvaise qualité.

Les essais en vol sont effectués par tous les opérateurs aéronautiques (Pavlock, 2013): Constructeurs d'avions (Boeing, Airbus, Embraer, Bombardier, Gulfstream, Lockheed-Martin, UTC, Pilatus, Leonardo, Mitsubishi, Kawasaki, Sikorsky, Sukhoi, Saab, Piper...); OEM (Honeywell, P&W, RR, GE, Rockwell-

Collins, Thales); MROs; Airlines; Commuter providers; Forces militaires; Propriétaires d'aéronefs privés.

Chaque type différent d'essais dure un temps différent. Plus l'avion est grand, plus il est coûteux de voler, de sorte que chaque minute moteur (s) en cours d'exécution doit produire la démonstration et les résultats escomptés. Un ajustement parfait de ce temps d'essai est de la plus grande importance à la planification primaire et finalement à la livraison globale.

Le test de production est effectué sur le produit, après l'assemblage terminé, et c'est la dernière activité du processus de production certifié. Un test de production peut prendre de 3 heures à jusqu'à plus de 20 heures de vol, puisque tous les problèmes, dysfonctionnements et pannes peuvent être résolus avant de livrer au client ou de revenir à l'exploitation des revenus. Habituellement, ces non-conformités, ou problèmes concernant la réponse correcte pour l'utilisation prévue, sont corrigées après l'essai en vol, par le personnel d'entretien sur le terrain. Très peu d'ajustements, habituellement liés aux corrections d'appareils intérieurs (portes, loquets, isolation, conduits d'air, alignement) sont possibles à faire en vol, de sorte que presque tous les résultats d'essai dépendent d'un rapport de résultat bien décrit, ainsi le diagnostic, les corrections et les substitutions sont effectuées dans un environnement contrôlé (sur terre).

La quantité de combustible brûlée lors d'une campagne d'essai en vol est directement proportionnelle à la taille de l'aéronef le poids maximale au décollage (MTOW) (annexe #1). Une campagne d'essai de certification d'un nouveau type fait en moyenne 2000 heures de vol et environ 18 mois à partir du premier vol, jusqu'à ce que la certification de type délivré par l'autorité de certification (Figure 13: Durée de la campagne de test et des heures de vol). Les données détaillées du graphique ont été trouvées directement à partir de chaque publication des médias du fabricant, comme leur propre site Web, magazines spécialisés périodiques et communiqués de presse. Ces valeurs déposées se trouvent à l'annexe #1.

Les facteurs suivants impliquent la durée de la campagne d'essai en vol: financement, météo/saison, savoir-faire corporatif, main-d'œuvre spécialisée, complexité du projet/intégration des systèmes et nouvelles technologies/maturité des produits.

L'indisponibilité de fonds pour un processus de certification de la « part 25 » qui peut atteindre 24 mois (ou plus), même si elle est incluse dans le plan d'affaires, peut rendre le projet infaisable si l'un des cinq autres facteurs d'implication submerge ses prédictions. Plusieurs industries au cours des 20 dernières années ont renoncé à de nouveaux projets lors des tests de certification, car le financement a été sous-estimé pour soutenir la complexité du projet ou la maturité du produit. Ex.: Fairchild-Dornier, Eclipse, Bombardier, Cessna, Piper.

Un nouveau fabricant, avec des connaissances récentes sur les procédures de certification et d'essai, ou une nouvelle technologie de pointe sur le marché, peut voir la période d'essai et de certification augmentée à jusqu'à 5 ans et 4000 f/h. ex.: HondaJet, Mitsubishi, Comac.

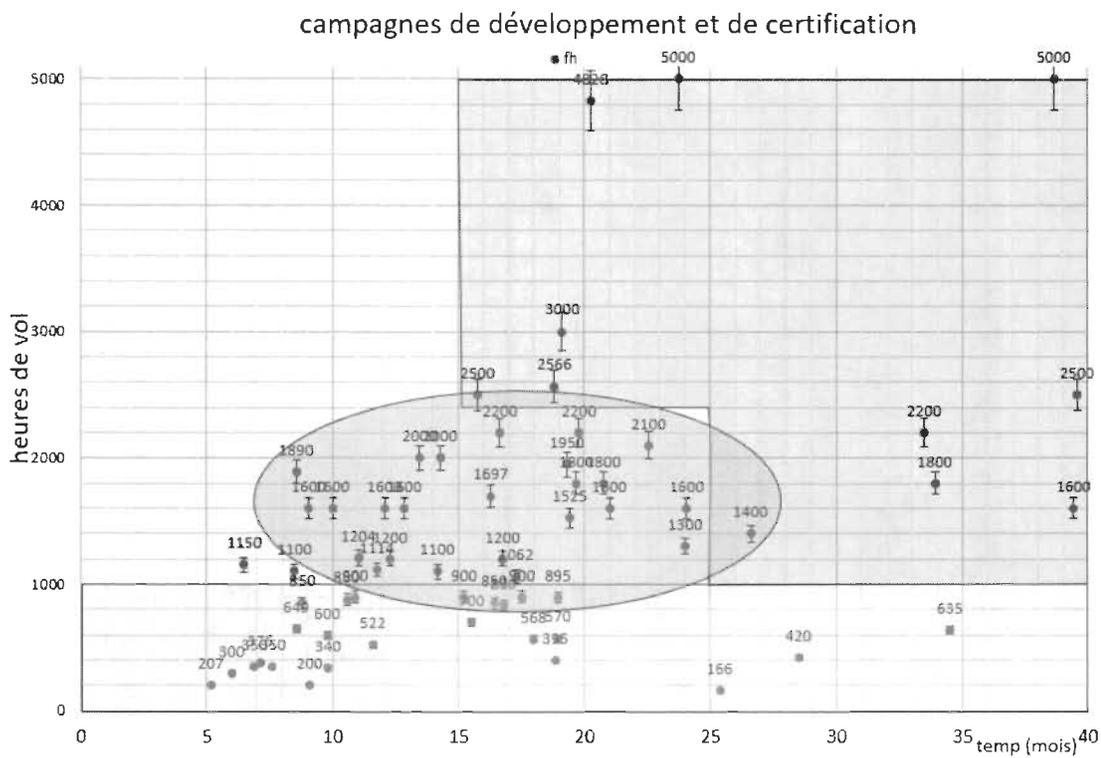


Figure 13: Durée de la campagne de test et des heures de vol

La Figure 13: Durée de la campagne de test et des heures de vol, illustre les campagnes de développement et de certification de nouveaux modèles d'avions, de 6 constructeurs d'avions différents (trouvés en détail dans le tableau de l'annexe #1).

La plupart des valeurs ci-dessus 2400hv, montrant des campagnes de vol qui durent plus de deux ans (polygone), peut indiquer les constructeurs d'aéronefs qui n'ont pas été entièrement préparés pour le lieu, en ce qui concerne la technologie, la main-d'œuvre, ou des investissements au moment de l'élaboration et démonstration de certification.

La zone ovale rassemble le temps de vol standard de l'industrie et la durée des essais en vol (plus grand que 1000hv et plus petit que 2400hv et d'une durée inférieure à 25 mois). Les valeurs de l'heure de vol sous 1000 (rectangle inférieur)

peuvent représenter un STC (certificat de type supplémentaire), c'est-à-dire qu'un modèle d'aéronef a été élaboré, basé sur un précédent certifié et existant, ou une campagne de certification hautement optimisée. Ce faible temps, les tests de faible nombre de vols sont la preuve finale et le résultat de nombreux MOC, des investissements élevés sur notre ingénierie soumise et les outils de gestion.

Le Figure 14: Incidence de la durée de la campagne de test, affiche le graphique de distribution de Pareto pour 63 campagnes de certification d'essais en vol. Nous voyons qu'environ 40% ont été effectués en vertu de 1000hv, qui est un petit nombre pour une campagne de certificat de type complet, donc ce sont considérés comme des nombres pour un aéronef des essais dérivés ou tout simplement une campagne de certificat de type supplémentaire de STC; 6% d'entre eux ont été faits avec plus de 3000hv, qui d'autre part est un signe de faible productivité. Les 54% restants peuvent être considérés comme une plage de données analysées: 1000 hv à 3000 hv.

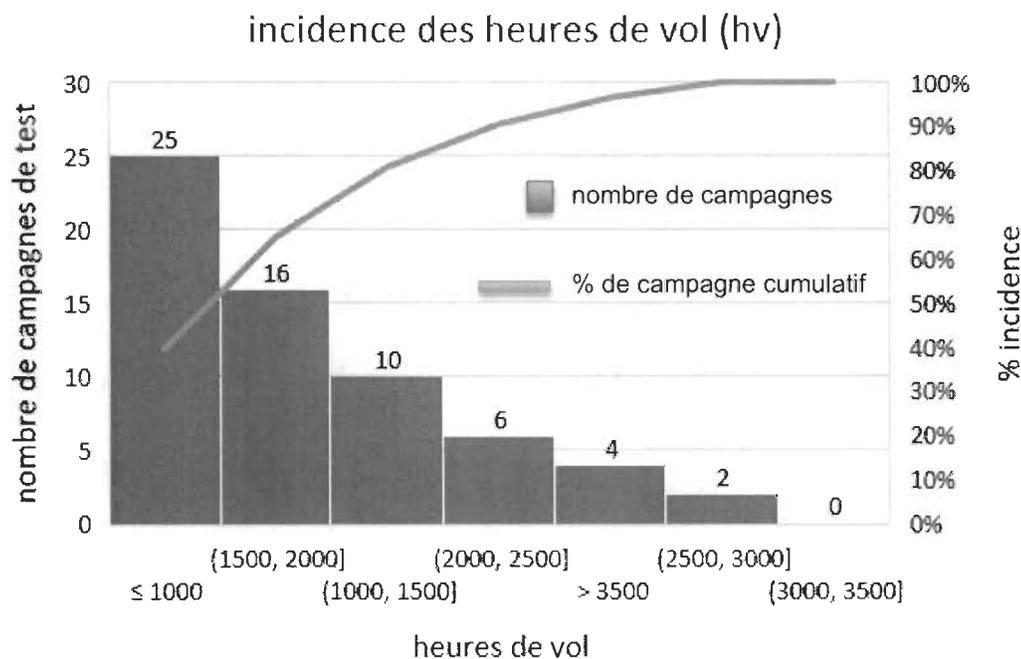


Figure 14: Incidence de la durée de la campagne de test

3 Discussion critique et propositions

Les règlements obligatoires de certification ou de qualification sont modelés pour assurer la sécurité des utilisateurs d'aéronefs, et pour ceux qui ne savent même pas ce qui se passe au-dessus : les gens au sol.

La réduction du nombre de vols est nécessaire, non seulement parce que les essais en vol sont coûteux, et ne semble pas ajouter de valeur directe au produit, mais parce qu'il s'agira d'une réduction directe de la combustion des combustibles fossiles et de la réduction indirecte de l'effet de serre par la production de gaz lourds de carbone (ICAO, 2010).

L'opérateur d'essai de vol vole une plus petite quantité de temps, si on le compare aux opérateurs de transport aérien ou de banlieue, puisque l'objectif principal n'est pas de transporter des marchandises, mais de remplir une exigence de sécurité, de performance ou d'exploitation. Le temps utile des prototypes est en corrélation directe avec la faible fiabilité des nouveaux systèmes, les systèmes non finis, les prototypes non configurés, les conditions météorologiques inégales, et toutes les variables qui déterminent la « préparation aux tests » et contestent la prévisibilité du programme d'essai.

Toutes les solutions doivent être testées en fonction de trois critères : déployabilité, durabilité et viabilité. Les solutions efficaces ne se limitent pas à la production d'énergies renouvelables. Ils englobent les produits, les services, les technologies propres et les processus qui sont rentables et soutiennent la croissance économique, tout en protégeant l'environnement et en optimisant l'utilisation des ressources naturelles.(Piccard, 2018) (solarimpulse.com).

La réduction de la quantité d'essais en altitude, réduisant par conséquent la combustion de combustibles fossiles dans l'atmosphère, peut être réalisée avec une campagne d'essai plus concise et améliorée, avec moins d'heures de vol, contestant la démonstration des exigences par des essais simulés (c.-à-d. analyse, simulations, essais au sol, tests de laboratoire...), et un nouveau rassemblement (changement) des exigences actuelles de navigabilité,(Kleiner, 2007).

Bon nombre de ces moyens alternatifs pour réduire les tests peuvent être obtenus grâce à des outils efficaces de gestion de programme adaptés aux essais en vol, tel que «Kaizen» corporatif, Barnes (1996) (Singh, J.; Singh, H., 2009), Six Sigma, (Pande, Neuman, & Cavanagh, 2000), Lean Operation (Bergmann & Priebisch, 2011), (Pepper & Spedding, 2010), Qualité du fournisseur et Test Readiness (Sandborn, 2013). Les moyens restants dépendent des outils d'ingénierie comme les simulations numériques (Edwards, Lombaerts, & Smaili, 2010), les simulateurs de mouvement, les laboratoires à l'échelle (tunnel de vent), Rigs et les essais au sol.

La gestion de projet et les outils d'ingénierie doivent être manipulés pour réduire les heures de vol (hv), qui sont une amélioration directe de la durabilité des essais en vol. Chaque type de vol a son propre outil d'amélioration possible, mais l'objectif final est d'exiger un rassemblement de tous les gains (Agarwal, 2009), pour bénéficier des tests processus de durabilité.

3.1 Proposition 1: Outils d'ingénierie

Les outils d'ingénierie peuvent être considérés comme toutes les manières techniques qui aident à recueillir des données en vue d'améliorer la prise de décision, tels que les connaissances techniques actuelles, l'algorithme de calcul, les logiciels informatiques, le matériel de test et le matériel de laboratoire.

Les tests de développement du système peuvent être partiellement remplacés par des simulations numériques sélectionnées et des essais au sol (plates-formes dédiées et plein avion "Iron Bird").

Les essais de développement et de certification des aéronefs peuvent être partiellement remplacés par des prototypes à échelle réduite, des simulations en ligne, des simulateurs de mouvement et peuvent être programmés le long des systèmes de test et de la certification du système, mais ils sont les plus difficiles à réduire puisque la cible principale, est d'évaluer les caractéristiques finales de sensation de contrôle du produit.

Des simulations de plusieurs types et niveaux sont utilisés pour améliorer les facteurs de sécurité des tests. Avec des résultats de simulation attendus plus proches de la réalité, l'analyse des risques pour chaque test est soutenue par des résultats numériques et graphiques, établissant les premières limites pour les tests réels de prototype à effectuer. L'approche par étapes dans un test à haut risque est également validée par le résultat du test précédent, si elle correspond aux résultats de simulation, en établissant des facteurs atténuants pour la classification des risques et en augmentant la confiance des équipages de vol (Ward, 1998).

Les situations de vol qui n'ont pu être obtenues que par des données expérimentales, comme les caractéristiques post-stalles de l'aile ou de l'aéronef, ont maintenant la possibilité d'être simulées avec une grande précision. Ces résultats incrémentés dépendent de la haute capacité informatique (superordinateur), car «les algorithmes conventionnels ne sont plus efficaces pour utiliser la quantité théorique d'opérations à virgule flottante par seconde (flops) disponibles à partir d'architectures informatiques modernes»(Ulmer, 2017). Le résultat de la nouvelle génération de CFD (dynamique des fluides computationnelle) fonctionnant sur le matériel informatique avec des processeurs graphiques, donne des conditions pour réduire la quantité d'essais en vol liés à des situations à risque élevé (Bai, Sun, Lin, Kennedy, & Williams, 2012).

Les essais de certification de système ont la flexibilité à se faire également dans un environnement de laboratoire (plate-forme) et en essais au sol (plates-formes dédiées ou un "iron bird" d'avion plein - IB).

Les tests de maintenance et tests de production les améliorations sont directement proportionnelles à la qualité du service, au protocole de recherche de pannes existant et aux pièces précédemment utilisées, au lieu des tests de dégagement pour le vol....

Les technologies récentes (outils d'ingénierie) comme les moteurs Geared Turbo Fan (GTF), les mélanges d'éco-combustibles et d'itinéraires d'approche réduits (Şahin & Usanmaz, 2016), sont des caractéristiques supplémentaires dans

l'environnement durable, pour améliorer la durabilité dans les opérations d'essai (Mrazova, 2014).

3.2 Proposition 2: Outils de gestion

Certains nouveaux outils de gestion, facilement accessibles aux grands constructeurs d'avions, sont des excellents moyens de vérifier les procédures actuelles, de mesurer l'effort actuel utilisé pour les campagnes de test, d'analyser les améliorations possibles et d'agir pour modifier les résultats. La première étape est d'utiliser de bonnes méthodes et de les suivre à chaque étape du processus d'amélioration. Dans notre cas, l'objectif principale est la réduction des coûts associés à la réduction du carburant par le biais de moins de vols d'essai, à commencer par les plus dangereux.

La proposition est d'avoir un événement Kaizen autour de l'équipe du projet entier, proposant « Lean », « Six Sigma », et la préparation des techniques de matrice, entre autres.

«Kaizen est un programme d'événements où les projets d'amélioration à court terme (événements Kaizen) sont systématiquement utilisés pour introduire un changement rapide dans les zones de travail ciblées ou un projet plus large, souvent en s'appuyant sur les principes du système de travail Lean.»(Van Aken, Farris, Glover, & Letens, 2010)

Le Six Sigma est une approche en cinq étapes (Processus DMAIC) qui évite une variation indésirable des produits et des processus. DMAIC est une collection d'outils d'amélioration de la qualité qui sont combinés en une approche en 5 étapes: Décrire-> Mesurer-> Analyser-> Améliorer-> Contrôler. Lorsque ces outils sont combinés avec l'intention de d'atteindre le six-Sigma d'un processus, alors un processus robuste et sans défaut est une attente réaliste.

Quelques prérequis pour commencer cette approche sont: une cible clairement définie d'essai d'horaire pour augmenter des chances de succès; données à l'appui de l'état actuel du processus; une équipe de projet composée de professionnels compétents; un chef d'équipe respecté avec une expérience

antérieure sur les bases de DMAIC qui peut garder l'équipe sur la bonne voie, et le soutien positif de la haute direction, afin que les membres de l'équipe aient le temps de collecter des données et de travailler sur le projet.(dmaictools.com, 2018)

La procédure de conclusion qui rassemble tous les outils d'ingénierie et les outils de gestion, pour fournir un point de contrôle d'organisation et de prise de décision aux opérations d'essai concernant un avion est la matrice de « préparation d'essai ». Cette procédure consiste à contrôler toutes les activités via une banque de données «kanban» (Sugimori, Kusunoki, Cho, & Uchikawa, 1977) (matrice de test élargie), nécessitant toutes les étapes de préparation pour chaque essai (couleur verte), avant la prochaine phase de vol. Les lignes de la matrice sont remplies de tâches, de jalons et d'activités. Chaque colonne de la matrice est remplie avec les exigences comme l'exemple sur Tableau 3: Exemple de matrice de preparation de Test. Les lignes « matrice de test » doivent être programmées sur les différents calendriers d'échéanciers: horaires longs, moyens et à court terme, pour produire une campagne de test de portée réduite. Cela réduit la possibilité d'une planification prématurée sur des tâches non complètes, réduisant ainsi les vols inefficaces.

L'élaboration de la « matrice de préparation des tests » exige la participation de tous les domaines du développement de produits (gestion, ingénierie, essais et fabrication) ou des zones de service (gestion, maintenance, contrats, essais et opérations) comme dans le Tableau 3: Exemple de matrice de preparation de Test.

Lors de l'exécution de la matrice de préparation des tests (Check-List), les tâches et les jalons peuvent être considérés pour l'exécution possible seulement si toutes les conditions de préparation ont été préalablement effectuées. Ça peut sembler un processus organisationnel très commun et naturel, mais si dans la gestion d'un projet moyen ou complexe comme le développement et l'opération d'essai d'avion, l'absence d'une activité de préparation, d'une tâche ou d'un jalon, se traduira par une situation no-Go (pas de vol). Le calendrier très coûteux et

complexe des opérations de l'aéronef est fortement dû à des manquements de calendrier.

Trois fabricants d'aéronefs d'importance élevée et de position sur le marché ont été considérés (mais non nommés en raison des exigences de la NDA), pour résumer la réduction possible des heures de vol (hv), en ce qui concerne l'utilisation cumulée des outils. Leurs améliorations et leurs procédures de pointe ont été répertoriées, comparées et tracées.

Les tests les plus importants ont été classés en trois types différents de groupes d'essais: la manutention, les performances et les tests du système, de sorte que leur MOC et les manières d'amélioration pourraient être homogénéisés, ainsi que les outils de gestion et les outils d'ingénierie utilisés pour réduire le temps de démonstration en altitude.

Trois campagnes d'essais en vol efficaces qui ont duré environ 1800 hv, de la banque de données sur l'annexe #1 ont été enregistrées, détaillées, comparées et mises en moyennes. La réduction en pourcentage des heures de vol a été enregistrée pour chaque type de groupe d'essai et pour chaque type de test de détail. Même si les noms exacts pour chaque test effectué étaient différents en quelques mots, en raison de la planification différente, de la tradition de la compagnie et du délai différent, toutes les informations disponibles étaient claires pour comparer et renommer ou re-classifier au sein de ces groupes de test et/ou les types de test.

Les résultats de cet échantillonnage se trouvent dans le Tableau 4: Possibilité de réduction hv. La première colonne de chaque groupe décrit le test, la deuxième colonne est le nombre moyen d'heures de vol prévues pour la première fois, avec la planification et la gestion en cours, avant tout essai a été commencé. La troisième colonne est le résultat moyen des heures réelles d'essai, après que les outils de gestion et les outils d'ingénierie ont été appliqués au plan d'essai.

3.3 Exemple des Résultats

Le développement du système et les tests de certification du système ont été répertoriés sur le Tableau 4: Possibilité de réduction hv. Ces types d'essais sont classés comme un système indépendant pour la vérification fonctionnelle, et s'ils sont qualifiés lorsqu'ils sont installés dans l'avion, ils sont soumis à leurs essais au sol et aux tâches liées au vol. Ces systèmes sont des équipements auxiliaires pour le confort (climatisation et pressurisation), la navigation (radios, GPS, FMS, transpondeur, Intercom, TCAS, ILS), l'indication des données (vitesse,

altitude, attitude, paramètres du moteur).

Certaines tâches d'essai sont énumérées sur le groupe de test de systèmes parce qu'elles sont liées aux systèmes de soutien comme l'antigel, dégivrage, détection d'incendie, extinction de feu, carburant, etc.

Les tests de « handling » sont tous des tests qui évaluent l'effort exigé pour contrôler l'avion et nécessitent l'évaluation du pilote des difficultés d'exécution de certaines manœuvres. Ces manœuvres sont généralement exécutées à la frontière de l'enveloppe de vol, comme poids de décollage élevé, centre de gravité arrière, vitesses élevées, ou les limites opposées de ces situations.

Il a été noté que la plupart des réductions du nombre d'heures de vol, étaient dues à des essais analogues préalablement planifiés, préparés et exécutés sur une simulation numérique ou par prototype, qui fournit des données extrapolées pour soutenir d'autres moyens de conformité à la manutention et le soutien aux décisions d'évaluation des risques et aux mesures d'atténuation.

Les résultats des essais en vol de production ont une courbe d'apprentissage. La première ligne de produits assemblés fera l'expérience de nombreux systèmes de « décès précoce » et des pièces, et qui est proportionnel à la façon dont le développement individuel de chaque partie a été fait. Ces défauts peuvent être trouvés à l'assemblage, lors des essais avant le vol, lors de l'inspection de réception, ou lors des procédures d'inspection avec le fournisseur. La redondance du projet pour la sécurité, ne peut être affectée en cas d'échec lors du premier vol.

Tableau 4: Possibilité de réduction hv, résume les nouveautés en gestion de projet et en ingénierie, ainsi que leur gain éventuel, réduisant les heures de vol (hv), ce qui peut améliorer la durabilité des essais en vol. Chaque type de vol a son propre outil d'amélioration possible, mais l'objectif final est d'exiger la combinaison de tous les gains au bénéfice de l'ensemble du processus de test.

Handling	planned fh	actual	%reduced
AFCS - Primary Monitor - Hardover	55	44	20%
AFCS - Inner Loop (Pitch, Roll, Yaw)	55	44	20%
AFCS flight controls Servo Sizing	11	8	25%
AFCS Monitor Evaluation - Failures - Cruise	48	36	25%
Artificial Ice Shapes Handling	22	15	30%
Control and Handling Development	11	9	20%
Controlability and Maneuverability	79	63	20%
crosswind Handling	9	8	5%
Data for Simulator	65	59	10%
FBW corrections	22	21	5%
High Speed Characteristics	26	21	20%
High Speed Taxi & Shimmy tests	9	8	10%
HQ up to Vfc/Mfc	20	18	10%
HQ with Natural Ice	79	75	5%
Maneuverability and Controlability	35	32	10%
Minimum Flight Crew	7	2	75%
Pitch/Roll Mistrim Threshold and failures	33	26	20%
Stability	66	53	20%
Stall Characteristics	64	61	5%
Taxi / steering handling	13	12	10%
Trim	33	23	30%
Vibration and Buffeting	20	16	20%
total / total / average	761	655	19%

Performance	planned fh	actual	%reduced
Accelerate-Stop / Braking Distance	33	27	20%
Artificial Ice Shapes Perf	56	46	18%
Climb AEO/OEI	33	25	25%
Cruise Performance	7	6	15%
Flutter Flight Test	84	80	5%
High Altitude Takeoff	18	15	18%
Landing Performance	40	32	20%
Mach Trim Calibration	13	11	20%
Malfunctions MUH/MEH	18	14	20%
Performance	4	3	25%
QTA Test	4	3	25%
RTO Test max Ec	4	3	25%
Stall Speeds	87	65	25%
Takeoff Performance	62	47	25%
Vdf/Mdf Determination	7	6	10%
VMCA/VMCL/VMCG	78	61	22%
Water Spray	22	19	15%
total / total / average	571	459	20%

Systems	planned fh	actual	%reduced
AMS	99	79	20%
Anemometric Calibration	51	40	20%
Audio	7	7	0%
Cold Weather Certification	13	13	0%
Detection Smoke/ Fire	18	18	0%
Electrical System Performance	9	8	10%
Lighting (External & Internal)	15	8	50%
External Noise	22	18	20%
Generator Cooling	4	4	0%
Hot Fuel	10	10	0%
Internal Noise Determination	18	14	20%
Landing Gear Operation	9	7	20%
Trailing Cone Length Determination	7	3	50%
Unusable Fuel and Zero Indication	2	2	0%
RVSM	15	3	80%
VOR / DME	11	7	40%
FMS (LNAV/VNAV) AHRS/IESI	55	28	50%
ILS (LOC + GS)	31	22	30%
RADALT	11	9	20%
TCAS	4	3	25%
Transponder	7	5	20%
VHF COM	7	5	20%
Powerplant Ctrl and Handling / Indication	24	19	20%
Powerplant Ctrl and Handling / Indication	9	4	60%
Powerplant Fire Ext/Prot System	13	11	20%
Powerplant Starting Characteristics	18	15	15%
Powerplant IFTD	44	31	30%
Powerplant Inlet Distorsion	17	14	15%
Powerplant Operating Characteristics	11	9	20%
Powerplant Vibration	13	11	18%
Powerplant crosswind testing	4	3	25%
total / total / average	458	429	23%

Tableau 4: Possibilité de réduction hv

4 Conclusion

L'avenir des d'essais en vol durables se penche vers une propulsion propre de 100% (Upton, 2006) et 100% contrôlés «by wire» (Favre, 1994), avec une modification majeure de la réglementation. Ces technologies, lorsque développées, vont changer une grande partie de la manutention, des performances et des besoins opérationnels, comme nous le savons aujourd'hui.

Même si les opérations d'essai en vol sont une partie négligée des opérations aéronautiques mondiales, elle a son importance en assurant que le projet et le développement de nouveaux produits, en plus de l'entretien et de la modification de ceux qui existent déjà, sont conformes aux attentes en sécurité, en performance et selon les règlements d'exploitation. Ce type d'opérations détermine également lorsque le client peut compter sur son aéronef pour des activités de revenu, car il s'agit d'un obstacle juridique.

La contribution clé est trouvée après que nous comparons (Benchmark) des campagnes de test de vol de nombreux joueurs et concluons quelles sont les meilleures combinaisons des outils de gestion et des outils d'ingénierie, pour la planification, la reprogrammation et le changement des moyens de conformité avec les règlements. Une quantité considérable de vols sera alors éliminée, en gardant le même niveau de sécurité des produits et la qualité de fonctionnement global.

La matrice de « préparation aux tests » est utilisée comme outil de gestion d'entreprise pour réduire les vols d'essai, de sorte que l'activité de certification finale est réduite au niveau de la démonstration, ce qui amène les dépenses de carburant, la main-d'œuvre et les ressources à un record optimal.

Une autre étude incrémentielle, y compris les détails de mise en œuvre pour chaque outil utilisé est conseillée, car les améliorations et l'expérience avec les opérations d'essai en vol sont mises à jour souvent. Il devrait y avoir aussi des résultats statistiques et de références détaillées de plus de constructeurs d'avions, en particulier des nouveaux sur le marché, de la Chine, le Japon, l'Ukraine et la Russie.

Références

- Agarwal, R. K. (2009). Sustainable (green) aviation: challenges and opportunities. *SAE International Journal of Aerospace*, 2(2009-01-3085), 1-20.
- Altfeld, H.-H. (2010). *Commercial aircraft projects : managing the development of highly complex products*. Farnham Angleterre ; Burlington, Verm.: Ashgate.
- Bai, Y., Sun, D., Lin, J., Kennedy, D., & Williams, F. (2012). Numerical aerodynamic simulations of a NACA airfoil using CFD with block-iterative coupling and turbulence modelling. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, 26(2), 119-132. <http://dx.doi.org/10.1080/10618562.2011.646997>
- Barnes, T. (1996). *Kaizen strategies for successful leadership : how to take your organization into the future*. London,: Pitman.
- Bergmann, S., & Priebisch, S. (2011). *Real-world solutions for developing high-quality PHP frameworks and applications*. Indianapolis, Ind.: Wiley Pub.
- Capterra. (2018, june 28 2018). The top 20 most popular Project Management Software. v7, jun 2018. Page consultée à <https://www.capterra.com/project-management-software/#infographic>
- Cook, S. W. a. M. (2009). The Contested Concept of Sustainable Aviation. *Sustainable Development Wiley InterScience*(Sust. Dev. 17, 378–390 (2009)). <http://dx.doi.org/10.1002/sd.400>
- dmaictools.com. (2018). What is Six Sigma? *DMAIC Tools - Process Improvement Tools and Templates*. Page consultée à <https://www.dmaictools.com/what-is-six-sigma>
- EASA, C. S. (2013). Acceptable means of compliance for large aeroplanes CS-25: Tech. Rep. Amendment 13, European Aviation Safety Agency.
- Edwards, C., Lombaerts, T., & Smaili, H. (2010). Fault tolerant flight control. *Lecture Notes in Control and Information Sciences*, 399, 1-560.
- FAA, F. A. A. (2017, January 04, 2017 4:42:03 PM EST). A Brief History of the FAA. Page consultée à https://www.faa.gov/about/history/brief_history/
- FAR, F. A. R. (2018, Page last modified: October 24, 2017 1:04:43 PM EDT). Standard Airworthiness Certification Regulations. *Federal Register*. Page consultée à

https://www.faa.gov/aircraft/air_cert/airworthiness_certification/std_awcert/std_awcert_regs/regs/

- Favre, C. (1994). Fly-by-wire for commercial aircraft: the Airbus experience. *International Journal of Control*, 59(1), 139-157.
- Flouris, T. G., & Lock, D. (2009). *Managing aviation projects from concept to completion*. Farnham, Surrey, England ; Burlington, VT: Ashgate.
- Freed, D. (2017, December 2017). Meet the Jets Competing to Become the Next Air Force Trainer. *Air & Space Smithsonian*.
- G.Shekhar, S. S. L. P. (2015). Flight Test Instrumentation System for a Typical Prototype Civil Aircraft. *International Journal of Computer Technology and Applications*, 8(3).
- Gardiner, P. D., & Stewart, K. (2000). Revisiting the golden triangle of cost, time and quality: the role of NPV in project control, success and failure. *International Journal of Project Management*, 18(4), 251-256. [http://dx.doi.org/10.1016/S0263-7863\(99\)00022-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0263-7863(99)00022-8)
- Gates, D. (2015, May 12, 2015 at 5:46 pm). Mitsubishi to create Seattle engineering center for MRJ jet, Web. *The Seattle Times*. Repéré à <https://www.seattletimes.com/business/boeing-aerospace/mitsubishi-aircraft-sets-up-seattle-engineering-center-for-mrj-regional-jet/>
- Hellenbrand, D., Helten, K., & Lindemann, U. (2010, May 17 - 20, 2010). *Approach for development cost estimation in early design phases*. Communication présentée DESIGN 2010, the 11th International Design Conference, Dubrovnik, Croatia.
- Hullet, D. T. (2009). *Practical Schedule Risk Analysis*. Farnham, Surrey, England: Gower Publishing.
- Ibrahim, H., Ilinca, A., & Perron, J. (2008). Energy storage systems— Characteristics and comparisons. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(5), 1221-1250. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.01.023>
- ICAO. (2003). *Operational Opportunities to Minimize Fuel Use and Reduce Emissions, Circular 303-AN/176* (Vol. 303-AN/176). ICAO, Montreal: ICAO.
- ICAO. (2010). ICAO Environmental Report 2010: Aviation Outlook (E. B. o. t. I. C. A. Organization, Trad.). Montréal, Québec, Canada: ICAO.

- ICAO. (2016). On Board a Sustainable Future - ICAO Environmental Report 2016 - Aviation and Climate Change (E. B. o. t. I. C. A. Organization, Trad.). Montreal, QC, Canada: INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION.
- Jo, J.-I. S. G.-S. (2016). Flight Data Visualization and Post-test Flight Data Analysis System by Using Database. *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering*, 16(2), 85-94.
- Kleiner, K. (2007). Civil aviation faces green challenge. *Nature*, Vol.448(7150),, p.120.
- Maggio, G. (1996). *Space shuttle probabilistic risk assessment: methodology and application*. Communication présentée Reliability and Maintainability Symposium, 1996 Proceedings. International Symposium on Product Quality and Integrity., Annual.
- Mohan Das Gandhi, N., Selladurai, V., & Santhi, P. (2006). Unsustainable development to sustainable development: a conceptual model. *Management of environmental quality: an international journal*, 17(6), 654-672.
- Mrazova, M. (2014). Sustainable development - the key for green aviation. *INCAS Bulletin*, Vol.6(1),, 109-122.
- OECD, O. f. E. C.-o. D. (2001). OECD Environmental Strategy for the First Decade of the 21st Century: Adopted by OECD Environmental Ministers (pp. 5-6). Paris: OECD-Organisation for Economic Co-operation Development.
- Organisation for Economic Co-operation Development, O. (2001). OECD Environmental Strategy for the First Decade of the 21st Century: Adopted by OECD Environmental Ministers (pp. 5-6). Paris: OECD-Organisation for Economic Co-operation Development.
- Pande, P. S., Neuman, R. P., & Cavanagh, R. R. (2000). *The six sigma way: How GE, Motorola, and other top companies are honing their performance*: McGraw-Hill (New York).
- Pavlock, K. M. (2013, Sep 19, 2013). *Aerospace Engineering Handbook Chapter 2 - Flight Test Engineering*. (20140010192). Purdue University, NASA Dryden Flight Research Center, Edwards, CA United States.
- Pepper, M. P., & Spedding, T. A. (2010). The evolution of lean Six Sigma. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 27(2), 138-155.

- Piccard, B. (2018). Solar Impulse Foundation World Alliance Solutions. Page consultée à <https://solarimpulse.com/world-alliance/solutions>
- PMI, P. M. I. (2013). *A guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® guide), fifth edition* (5th éd.). Newtown Square, Pa.: Project Management Institute.
- Reim, G. (2018, 08 MARCH, 2018). F-35 development and support to cost \$1 billion annually. Page consultée à <https://www.flightglobal.com/news/articles/f-35-development-and-support-to-cost-1-billion-ann-446565/>
- Rush, C., & Roy, R. (2000, July 17th-20th, 2000). *Analysis of cost estimating processes used within a concurrent engineering environment throughout a product life cycle*. Communication présentée 7th ISPE International Conference on Concurrent Engineering: Research and Applications, Lyon, France.
- Şahin, Ö., & Usanmaz, Ö. (2016). Arrival Traffic Sequence for Converging Runways. Dans T.H. Karakoc et al. (eds.) (Éd.), *Sustainable Aviation* (pp. 291-296): Springer International Publishing.
- Sandborn, P. (2013). *Cost analysis of electronic systems*. Singapore: World Scientific.
- Shiozawa, Y. (2016). The revival of classical theory of values *The Rejuvenation of Political Economy* (pp. 151-172): Routledge.
- Singh, J., & Singh, H. (2009). Kaizen philosophy: a review of literature. *IUP Journal of Operations Management*, 8(2), 51.
- Stoliker, F. N. (2005). RTO AGARDograph 300 - Introduction to Flight Test Engineering (Introduction aux techniques des essais en vol) (Vol. 14). The Flight Test Technical Team (FT3) of the Systems Concepts and Integration Panel (SCI) of the RTO.: NATO RESEARCH AND TECHNOLOGY ORGANIZATION NEUILLY-SUR-SEINE (FRANCE).
- Sugimori, Y., Kusunoki, K., Cho, F., & Uchikawa, S. (1977). Toyota production system and kanban system materialization of just-in-time and respect-for-human system. *The International Journal of Production Research*, 15(6), 553-564.
- Thompson, L. (2008, 2008). Course Title: Flight Test Instrumentation. Page consultée à <http://www1.rmit.edu.au/courses/030267>

- Thurber, M. (2006, December 18, 2006, 5:41 AM). The aircraft certification process. *AINOnline Business Aviation*. Page consultée à <https://www.ainonline.com/aviation-news/aviation-international-news/2006-12-18/aircraft-certification-process>
- Ulmer, S. (2017, Posted on 21 JUN, 2017). Simulating extreme aerodynamics. *Science Node*. Page consultée à <https://sciencenode.org/feature/simulating-extreme-aerodynamics.php>
- Upham, P. (2003). *Towards sustainable aviation*. Sterling, VA: Earthscan Publications.
- Upton, E. M., Dimitri N. (2006). Quiet, Clean, and Efficient, but Heavy-Concerns for Future Fuel Cell Powered Personal Air Vehicles: SAE Technical Paper.
- USDOD, U. S. A. D. o. D. (1996). Acceptance and Functional Check Flight Procedures and Checklist, MIL-PRF-5096F *Inspection and Maintenance Requirements*; (Vol. MIL-PRF-5096-F, pp. 84). Washington, DC: Air Force Product Data Systems Modernization (PDSM) Program Office (AFPPO).
- USDOD, U. S. A. D. o. D. (2013). *Operation of the Defense Acquisition System - interim instruction 5000.02*. (Interim DoDI 5000.02). Washington, DC: Repéré à [https://www.acq.osd.mil/fo/docs/DSD%205000.02 Memo+Doc.pdf](https://www.acq.osd.mil/fo/docs/DSD%205000.02%20Memo+Doc.pdf).
- USDOD, U. S. A. D. o. D. (Ed.) (2018) *DOD Dictionary of Military and Associated Terms* (June 2018 ed.). Washington, DC: Government Printing Office (GPO).
- Van Aken, E. M., Farris, J. A., Glover, W. J., & Letens, G. (2010). A framework for designing, managing, and improving Kaizen event programs. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 59(7), 641-667. <http://dx.doi.org/10.1108/17410401011075648>
- Wand, P. R. Y. (2009). A Proposal for a Formal Definition of the Design Concept. Dans P. L. Kalle Lyytinen, John Mylopoulos, Bill Robinson (Éd.), *Design Requirements Engineering: A Ten-Year Perspective* (pp. 103-136). Design Requirements Workshop, Cleveland, OH, USA: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Ward, D. T. S., Thomas W. (1998). *Introduction to Flight Test Engineering* (2nd éd.). Dubuque, Iowa: Kendall / Hunt Publishing Co.

Observation : Toutes les figures, les tableaux et l'annexe ont été réalisés par l'auteur.

ANNEXES

ANNEXE #1 – Tableau de référence : campagnes d'essais en vol avion

model	1st flight	TC date	day	montl	# fligh	fh	#pro
A318	15-Jan-2002	23-May-2003	433	16	350	850	2
A319	25-Aug-1995	10-Apr-1996	229	8	135	350	2
A320	22-Feb-1987	26-Feb-1988	369	12	530	1200	3
A320-271N	25-Sep-2014	24-Nov-2015	425	14	440	1100	1
A320-251N	19-May-2015	31-Mar-2016	317	11	352	880	1
A330-200	13-Aug-1997	27-Apr-1998	257	9	630	1890	6
A330-200F	5-Nov-2009	9-Apr-2010	155	5	180	207	1
A330-301	2-Nov-1992	21-Oct-1993	353	12	426	1114	6
A330neo-800	1-Jul-2018	28-Dec-2018	180	6	85	300	1
A330neo-941	19-Oct-2017	1-Jul-2018	255	9	313	1100	3
A340-200	21-Oct-1991	22-Dec-1992	428	14	568	2000	6
A340-500	11-Feb-2002	3-Dec-2002	295	10	113	340	2
A350-1041	24-Nov-2016	21-Nov-2017	362	12	457	1600	3
A350-941	14-Jun-2013	30-Sep-2014	473	16	714	2500	4
A380	27-Apr-2005	12-Dec-2006	594	20	629	2200	4
A400M	12-Dec-2009	13-Mar-2013	1187	40	714	2500	5
B737-300	24-Feb-1984	14-Nov-1984	264	9	283	850	3
B737-600	22-Jan-1998	24-Aug-1998	214	7	125	375	1
B737-900	3-Aug-2000	17-Apr-2001	257	9	296	649	2
B737-8 max	29-Jan-2016	8-Mar-2017	404	13	667	2000	4
B737-9 max	4/13/2017	1-Feb-2018	294	10	200	600	2
B767-200	26-Sep-1981	23-Jul-1982	300	10	533	1600	6
B767-400ER	9-Oct-1999	21-Apr-2000	195	7	383	1150	3
B777-200	12-Jun-1994	19-Apr-1995	311	10	4900	7000	9
B777-200LR	8-Mar-2005	2-Feb-2006	331	11	328	1204	2
B777-300ER	24-Feb-2003	16-Mar-2004	386	13	533	1600	2
B777-freiter	14-Jul-2008	6-Feb-2009	207	7	117	350	1
B787-8	15-Dec-2009	15-Aug-2011	608	20	1707	4828	6
B787-9	17-Sep-2013	16-Jun-2014	272	9	533	1600	5
B787-10	1-Mar-2017	22-Jan-2018	327	11	300	900	3
CRJ-700	27-May-1999	1-Dec-2000	554	21	640	1600	4
CRJ-900	21-Feb-2001	13-Sep-2002	563	19	347	835	2
CRJ-1000	3-Sep-2008	10-Nov-2010	798	27	470	1400	1
Challenger 601	1-Jan-2006	1-Oct-2006	273	9	80	200	2
Global 7500	4-Nov-2016	1-Jun-2018	574	19	1200	3000	4
CSeries 100	16-Sep-2013	16-Jun-2016	1,004	33	880	2200	5
CSeries 300	27-Feb-2015	11-Jul-2016	500	17	880	2200	2
Falcon 7X	5-May-2005	27-Apr-2007	722	24	600	1600	4
Falcon 8X	6-Feb-2015	24-Jun-2016	504	17	400	830	3
E135	1-Jun-2000	1-Jun-2001	348	12	348	522	2
E145SA	1-Jun-1999	1-Apr-2002	1,035	35	254	635	2
E145RS	16-Dec-1999	Apr-2002	855	29	168	420	2
E145H	1-Jul-2001	Aug-2003	761	25	120	166	1
E145XR	1-Jul-2001	1-Oct-2002	457	15	360	900	2
E170	19-Feb-2002	1-Feb-2004	712	24	2000	5000	10
E175	14-Jun-2003	31-Dec-2004	566	19	223	395	1
E190	12-Feb-2004	30-Aug-2005	565	19	1026	2566	5
E195	7-Dec-2004	29-Jun-2006	569	19	315	570	1
Legacy 600	31-Mar-2001	1-Sep-2002	519	17	570	1062	2
Legacy 500	27-Nov-2012	12-Aug-2014	623	21	720	1800	4
Legacy 450	28-Dec-2013	11-Aug-2015	591	20	720	1800	2
KC-330	3-Feb-2015	1-May-2018	1,183	33	640	1600	2
Phenom 300	29-Apr-2008	3-Dec-2009	583	19	852	1525	2
E2 190	25-Feb-2016	2-Jan-2018	677	23	840	2100	4
G280	11-Dec-2009	1-Dec-2011	720	24	650	1300	3
G500	18-May-2015	20-Jul-2018	1,159	33	1348	5000	5
G650	25-Nov-2009	7-Sep-2012	1,017	34	563	1800	5

Explication: L'information soulignée est extrapolée à partir des autres données connexes.

ANNEXE #2 – Article présentée au le congrès ISSA 2018 – Università di Roma.

Flight Test Operations Sustainable Management

Vieira, Darli R.; Quattrocchi, Paulo
University of Quebec at Trois-Rivières, C.P. 500
Research Chair in Management of Aeronautical Projects
darli.vieira@uqtr.ca; paulo.quattrocchi@uqtr.ca

SUMMARY

This article takes Flight Test Operations as a time consuming, fuel burning, expensive, unwanted, complicated requirement for aircraft that is not a natural sustainable aviation activity and separates "Sustainable Environment" from the "Sustainable Testing" for this specific study. Using current management and engineering tools that individually have its own gains, but if gathered into one sustainable effort, result in a greatly improved test activity, while reducing fossil fuel burn, cost, time and workforce, as expected today for a sustainable flight operation.

Keywords: Management Tools; Flight Tests; Engineering Tools, Test Readiness, Sustainable

SUSTAINABLE FLIGHTS

Sustainability has been used as a tool to push the scientific research and development of any solution that may, in some way, improve energy use, energy storage and energy transformation, towards a perpetual reutilization of goods (Agarwal, 2009).

Most of these recent solutions are not of easy implementation, not even cheaper than the current means, often demand a long period for industrialization (desired maturity) and even longer time for market (customer) trust and acceptance (Mohan Das Gandhi et al., 2006).

One of the challenges for future sustainable aviation, is to safely transpose technologies and experimental laboratory solutions to a flightworthy, profit-making transport, for revenue passengers and cargo, within existing certification requirements.

The most important part of the development of new aviation product, after the conception idea itself, is the test and qualification of those technology changes. Tests are needed to prove already available project data, gather complementary complex performance information and prove compliance with safety and market requirements (Ward, 1998).

This article deals with "sustainable solution" and "sustainable environment". Two test operation procedures definitions created to identify the contribution, in different levels to the ecological use and transformation of energy. The first, is the need to test in flight, a whole new, 100% sustainable airborne system. The second, is the activity to provide a sustainable test environment for aviation-based proposals: current product development, qualification and certification under the actual ruling.

SPECIFIC PROBLEM

Aircraft Tests are needed to prove already available project data, gather complementary complex performance information, prove compliance with safety and market requirements, as well as make sure that integration of production and maintenance activities are functional and safe (Stoliker, 2005)

Test Flights figures (flight hours) are different from one operator to other and their aircraft size results in different operation fuel burn quantities (figure #1). It is an operation that takes nothing to nowhere for many times, and it is often blamed for holding the aircraft out of the profit schedule

(ICAO, 2003). Therefore, Flight Tests are not revenue flights as they are not natural sustainable activities either.

ICAO Circular 303-AN-176 (ICAO, 2003) also lists the common operational opportunities to minimize fuel use and reduce emissions: a) fly the most fuel-efficient aircraft type for the sector; b) taxi the most fuel-efficient route; c) fly the most fuel-efficient route; d) fly at the most fuel-efficient speed; e) operate at the most economical altitude; f) maximize the aircraft's load factor; g) minimize the empty mass of the aircraft; h) load the minimum fuel to safely complete the flight; i) minimize the number of non-revenue flights; and j) maintain clean and efficient airframes and engines.

These same procedures are not valid for Development and Certification Flights since its mission relies on supporting the safety of the aircraft, and not transporting goods. These procedures are often used to reduce cost in commercial aviation operations, but this initiative is rarely found in the aviation test and certification environment.

A Sustainable Operation, using the OECD's definition (Organization for Economic Cooperation and Development) may be considered when the use of an energy source is somehow renewable (criteria I), the assimilation rates in pollutant-receiving media are not exceeded (criteria III), as when all gains are close to the expenditures (criteria II), or the other way around (criteria IV) (Organisation for Economic Co-operation Development, 2001), (Upham, 2003).

The remnant means to improve combustion fuel sustainability are to reduce fossil fuel use, reduce carbon gases releases and reduce utilization of non-recyclable or non-renewable materials.

When considering aircraft operation, we may list that all test flights have the subjective and intangible purpose of assuring the safety quality of the product, so the aircraft may reach its final objective of transporting people/goods safely and securely (Pavlock, 2013).

The problem to be solved is to reduce the total amount of flight test hours that are demanded nowadays by any new aircraft related development, certification or verification flight.

These un-revenue flights become an effort to test and certify an improved solution, consequently reducing carbon footprint, high atmosphere damage and indirectly reaching a new level of sustainability in this activity. They are the means that justify a few steps back, to jump into a cleaner solution.

OBJECTIVES

The direct way to reduce tests, are reducing flight related activities, thus reducing the fossil fuel burn. These measures may be done immediately, as all technology is already available, but unfortunately, they are found into several isolated efforts.

Improved Management and Engineering Tools (ET) are used to reduce costs, but results are often a way to bring the project schedule and budget back into the initial values from the start of the project.

The novelty approach is to gather PM tools and ET in a coordinated manner with test requirements, so the initial schedule and budget are at least maintained, secured (guaranteed), while flight hours and operational costs are reduced.

PERIMETER OF STUDY

Aircraft operations may be divided into: Airlines, Cargo, Air Taxi, Private/busyness, Military and Non-revenue. The ICAO Circular 303-AN-176 (ICAO, 2003), classifies non-revenue flights as: training, positioning, ferry, test flights, development (tests) and engine testing. This study is concerned with aircraft operations for Development and Certification Tests. This specific activity is mainly performed by aircraft manufacturers and MROs (maintenance and repair organization).

ICAO has issued other documents ruling carbon emission reduction for aircraft (ICAO, 2010), (ICAO, 2016), but they still do not address certification flight tests on its "opportunities" to minimize fuel use and reduce emissions, and mentions that non-revenue flights are "minimum". Optimization of the test activity is commonly done after program management control variables (schedule, cost, manpower, service quality) are affected and lately noticed (Gardiner & Stewart, 2000).

If we consider "Sustainable Testing" as all flight test activities involving some sort of improvement towards energy use, the "Sustainable Environment" is considered all remaining situations and activities that provide any other amount of sustainability than 100%. All improvements will focus the aircraft test activity, since it is the phase responsible for quality assurance during development and not accounted on earlier studies for fuel expenses.

FLIGHT TEST OPERATIONS

Flight Tests are the most common means to demonstrate the aircraft complies with safety, performance and operational requirements. They may be classified into:

- Functional or Production tests; Maintenance tests; Certification / qualification tests.

All flight tests demand a conformal test article, a test proposal (request guide), a routine (checklist) (USDOD, 1996), someone responsible for the test (request and data result interpretation), a trained test crew and finally a test result report.

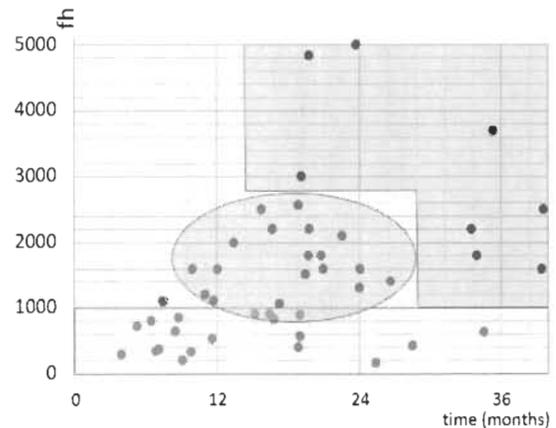
Flight Tests shall not be done with the primary target to "find out" or to "discover new things", as it should not be a trial & error procedure (Stoliker, 2005). Even though Flight Tests are still considered an experimental activity, i.e. you may not get the result you want, it is an activity that should be done to prove results you already know and expect. It is a demonstration process. All previous known results, that indicate the test will be successful, must be available as planning, decision and compliance support through other engineering means as: numerical simulation, calculations,

ground tests, separate system tests (Rigs), laboratory tests, scaled prototype tests, and their risk analysis (Maggio, 1996).

Test requirements (certification or qualification) usually come through government agencies regulations (FAA, ANAC, EASA, MIL specs, ISO, ABNT) (FAR, 2018) (EASA, 2013), customer contract demands and corporate quality policy.

Flight Tests are done by all aircraft operators: Aircraft manufacturers (Boeing, Airbus, Embraer, Bombardier, Gulfstream, Lockheed-Martin, UTC, Pilatus, Leonardo, Mitsubishi, Kawasaki, Sikorsky, Sukhoi, SAAB, Piper...); OEMs (Honeywell, P&W, RR, GE, Rockwell-Collins, Thales); MROs; Airlines; Commuter providers; Military forces and Private aircraft owners.

Each different type of tests lasts a different time. The larger the aircraft, the more expensive is to fly, so every minute running engine(s) must produce the expected demonstration and results. A perfect fitting of this testing time is of greatest importance to the primary schedule and finally to the overall delivery.



Graph #1 - Dev. & cert.flight test campaigns

The amount of fuel burned in a flight test campaign is directly proportional with the size of the aircraft (MTOW). A certification Test Campaign of a new type averages 2000 flight hours and about 18 months from the first flight, until the type certification issuance from the certification authority (graph #1). Detailed data for the graph was found directly from each manufacturer media publications, as their own website, specialized periodical magazines and press-releases.

The following factors imply on the duration of the flight test campaign: financing, weather/seasoning, corporate know-how, specialized manpower, project complexity / systems integration and new technology / product maturity.

The unavailability of funds for a part 25 certification process that may reach 24 months (or more), even though is included in the business plan, can turn the project infeasible if any of the other five implication factors overwhelms its predictions. Several industries in the past 20 years have given up new projects during certification tests, as financing was underestimated to support project complexity or product maturity. Ex.: Fairchild-Dornier, Eclipse, Bombardier, Cessna, Piper.

A new manufacturer, with recent knowledge on the certification and test procedures, or a new step up technology

on the market, may have the test and certification period increased up to 5 years and 4000 f/h. Ex.: Honda, Mitsubishi and COMAC.

The graph #1 plots several development and certification campaigns of new aircraft models, from 6 different aircraft manufacturers. The oval blue area gathers the industry standard flight time and duration time for Flight tests (larger than 1000fh and smaller than 2400fh and lasting less than 25 months). Flight hour values under 1000 (yellow rectangle) represent a partial certification as an STC (supplemental type certificate), that means an aircraft model was developed, based in a previous certified and existing one, thus performing a reduced demonstration.

Most of the values above 2400fh, that lasts more than two years (red polygon), may point out aircraft manufacturers that were not fully prepared for the venue, regarding technology, workforce, or investments at the time of the development and certification demonstration.

FLIGHT TEST MANAGEMENT

Mandatory certification or qualification regulations have become lengthier towards the safety of the users of aircraft, and for the ones who might not even know what's happening overhead: people in the ground.

Reduction on the number of flights are needed, not just because flight testing is expensive, and doesn't seem to add direct value to the product, but because it will be a direct reduction on fossil fuel burning and indirectly reduction over the greenhouse effect by the production of carbon heavy gases (ICAO, 2010).

The flight test operator flies a smaller amount of time, if compared to airline or commuter operators, since the main target is not transport goods, but to complete or fulfill a safety, performance or operational requirement. The useful time of the prototypes correlates directly with the low dependability of new systems, unfinished systems, unconfigured prototypes, unmatched weather conditions, and all variables that determine the "test readiness" and challenge the predictability of the test program.

RESULTS AND DISCUSSION

All solutions must be tested against three criteria: deployability, sustainability and viability. Efficient Solutions are not limited to the production of renewable energy. They encompass products, services, clean technologies and processes that are profitable and sustain economic growth, while protecting the environment and optimizing using natural resources.(Piccard, 2018).

The reduction of the amount of testing aloft, consequently reducing fossil fuel burn into the atmosphere, may be achieved with a more concise, improved test campaign, with less flight hours, challenging the demonstration of requirements by non-flying tests (i.e. analysis, simulations, ground tests, laboratory tests), and a new gathering of current airworthiness requirements.(Kleiner, 2007).

Many of these alternate means to reduce testing, may be achieved through effective Program Management tools tailored to Flight Tests, as a Corporate "Kaisen", Barnes (1996), (Singh & Singh, 2009), 6 Sigma, (Pande et al., 2000), Lean Operation (Bergmann & Priebisch, 2011), (Pepper & Spedding, 2010), Supplier Quality and Test Readiness (Sandborn, 2013). Remaining means depend on engineering tools as numerical simulations (Edwards et al., 2010), motion simulators, scaled labs (wind tunnel), Rigs and ground tests (Pavlock, 2013).

Table #1

Flight Test Type	Alternate means / tools	Possible fh reduction
System dev.	Rig; numerical sim.; improved supplier quality	25%
Handling dev.	Scaled lab; Online sim.; parallel with system test	25%
System cert.	Lab; Rig; Reports; Engineer Sim	25%
Handling cert.	Motion Sim.	20%
Maintenance	Ground tests; Test bench; Maturity	10-15%
Production	Assembly quality assurance	50%
All flight tests	Non-fossil fuel blend burn	20%
All flight tests	Low emission / + efficient powerplant	10-20%
All flight tests	Reduced Approach route	5-10%
All flight tests	Test Readiness* (Kanban, Agile, Kaisen)	20%

Project Management (PM) and Engineering Tools (ET), are handled to reduce flight hours (fh), which are a direct improvement on flight tests sustainability. Each flight type has its own possible improvement tool, but the final target is to demand a gathering of all gains (Mrazova, 2014), to benefit tests sustainability process.

System Development Tests may be partially replaced by selected numerical simulations and ground tests (dedicated Rigs and full airplane "iron bird").

System Certification Tests have the flexibility to be done also in a laboratory environment (Rig) and as ground tests (dedicated Rigs and full airplane "iron bird").

Aircraft Handling development and certification tests may be partially replaced by scaled prototypes, online simulations, motion simulator, and may be scheduled along system tests and system certification, but they are the most difficult to be reduced since the main target, is intrinsically for evaluating the final product control feeling characteristics.

Maintenance Tests and Production Tests improvements are directly proportional with the quality of the service, the existent fault search protocol and parts previously used, instead of the clearance tests for flight.

Recent technologies (Engineering Tools) as GTF engines, eco-fuel blends and reduced approach routes (Şahin & Usanmaz, 2016), are additional features to improve sustainability in test operations, (Mrazova, 2014).

The conclusion procedure that gathers all engineering tools and management tools, to provide an organization and decision-making checkpoint to related aircraft test operations is the "Test Readiness Matrix". This procedure consists controlling all activities through a "kanban" (Sugimori et al., 1977) data bank (test readiness matrix), requiring all preparation steps for each test to be ready (green colored), before next phase schedule for flight. The Lines of the matrix are filled with tasks, milestones and activities. Each column of the matrix is filled with requirements. The "test matrix" lines are prompt to be scheduled on its different time frame calendars: long, medium and short-term schedules, to

produce a reduced scope test campaign. This reduces possibility of premature planning over non-complete tasks, thus reducing ineffective flights.

The elaboration of the "Test Readiness Matrix" demands involvement of all areas of product development (management, engineering, test and manufacture) or service areas (management, maintenance, contracts, test and operation).

When running a "test readiness matrix" / checklist, tasks and milestones may be considered for possible execution only if all preparation requirements were previously performed. It may seem a very common and natural organizational process, but if looking at medium to complex project management as aircraft test development and operation during these tests, missing one preparation activity, task or milestone, will result in a no-go (no-flight) situation. The very costly and complex aircraft operations schedule suffers heavily due to schedule foul-outs.

Three aircraft successful manufacturers of high importance and market position were considered (NDA apply), to summarize the possible flight hours (fh) reduction, regarding the cumulated use of tools. Their improvements and leading procedures were listed, compared and plotted.

The table #1 lists possible flight hour % reduction for different project management, engineering novelties and Flight Test Type, as result of the data compilation from the previous mentioned matrix.

CONCLUSION

The key contribution is found after comparing (benchmark) flight test campaigns from many players and conclude that the most productive ones combine management tools and engineering tools, for scheduling, reprogramming and changing means of compliance with regulations. A considerable amount of flights will be eliminated, keeping the same level of product safety and overall operation quality.

The Test Readiness Matrix contribution, which may be detailed also, is used as a corporate management tool to release test flights, so the final certification activity is reduced at the demonstration level, bringing fuel expenses, manpower and resources to an optimum record.

A further incremental study, including implementation details for each tool used, is advised, since improvements and experience with flight test operations may come out often. There should be also detailed statistical and benchmark results from more aircraft manufacturers, especially from China, Japan, Ukraine and Russia.

REFERENCES

- Agarwal, R. K. (2009). Sustainable (green) aviation: challenges and opportunities. *SAE International Journal of Aerospace*, 2(2009-01-3085), 1-20.
- Altfeld, H.-H. (2010). *Commercial aircraft projects : managing the development of highly complex products*. Farnham Angleterre ; Burlington, Verm.: Ashgate.
- Bai, Y., Sun, D., Lin, J., Kennedy, D., & Williams, F. (2012). Numerical aerodynamic simulations of a NACA airfoil using CFD with block-iterative coupling and turbulence modelling. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, 26(2), 119-132. <http://dx.doi.org/10.1080/10618562.2011.646997>
- Barnes, T. (1996). *Kaizen strategies for successful leadership : how to take your organization into the future*. London,: Pitman.
- Bergmann, S., & Priebsch, S. (2011). *Real-world solutions for developing high-quality PHP frameworks and applications*. Indianapolis, Ind.: Wiley Pub.
- Capterra. (2018, June 28 2018). The top 20 most popular Project Management Software. v7, Jun 2018. Page consultée à <https://www.capterra.com/project-management-software/#infographic>
- Cook, S. W. a. M. (2009). The Contested Concept of Sustainable Aviation. *Sustainable Development Wiley InterScience*(Sust. Dev. 17, 378–390 (2009)). <http://dx.doi.org/10.1002/sd.400>
- dmaictools.com. (2018). What is Six Sigma? *DMAIC Tools - Process Improvement Tools and Templates*. Page consultée à <https://www.dmaictools.com/what-is-six-sigma>
- EASA, C. S. (2013). Acceptable means of compliance for large aeroplanes CS-25: Tech. Rep. Amendment 13, European Aviation Safety Agency.
- Edwards, C., Lombaerts, T., & Smaili, H. (2010). Fault tolerant flight control. *Lecture Notes in Control and Information Sciences*, 399, 1-560.
- FAA, F. A. A. (2017, January 04, 2017 4:42:03 PM EST). A Brief History of the FAA. Page consultée à https://www.faa.gov/about/history/brief_history/
- FAR, F. A. R. (2018, Page last modified: October 24, 2017 1:04:43 PM EDT). Standard Airworthiness Certification Regulations. *Federal Register*. Page consultée à https://www.faa.gov/aircraft/air_cert/airworthiness_certification/std_awcert/std_awcert_regs/regs/
- Favre, C. (1994). Fly-by-wire for commercial aircraft: the Airbus experience. *International Journal of Control*, 59(1), 139-157.
- Flouris, T. G., & Lock, D. (2009). *Managing aviation projects from concept to completion*. Farnham, Surrey, England ; Burlington, VT: Ashgate.
- Freed, D. (2017, December 2017). Meet the Jets Competing to Become the Next Air Force Trainer. *Air & Space Smithsonian*.
- G.Shekhar, S. S. L. P. (2015). Flight Test Instrumentation System for a Typical Prototype Civil Aircraft. *International Journal of Computer Technology and Applications*, 8(3).
- Gardiner, P. D., & Stewart, K. (2000). Revisiting the golden triangle of cost, time and quality: the role of NPV in project control, success and failure. *International Journal of Project Management*, 18(4), 251-256. [http://dx.doi.org/10.1016/S0263-7863\(99\)00022-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0263-7863(99)00022-8)
- Gates, D. (2015, May 12, 2015 at 5:46 pm). Mitsubishi to create Seattle engineering center for MRJ jet, Web. *The*

Seattle Times. Repéré à
<https://www.seattletimes.com/business/boeing-aerospace/mitsubishi-aircraft-sets-up-seattle-engineering-center-for-mri-regional-jet/>

Hellenbrand, D., Helten, K., & Lindemann, U. (2010, May 17 - 20, 2010). *Approach for development cost estimation in early design phases*. Communication présentée DESIGN 2010, the 11th International Design Conference, Dubrovnik, Croatia.

Hullet, D. T. (2009). *Practical Schedule Risk Analysis*. Farnham, Surrey, England: Gower Publishing.

Ibrahim, H., Ilinca, A., & Perron, J. (2008). Energy storage systems—Characteristics and comparisons. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(5), 1221-1250. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.01.023>

ICAO. (2003). *Operational Opportunities to Minimize Fuel Use and Reduce Emissions, Circular 303-AN/176* (Vol. 303-AN/176). ICAO, Montreal: ICAO.

ICAO. (2010). ICAO Environmental Report 2010: Aviation Outlook (E. B. o. t. I. C. A. Organization, Trad.). Montréal, Québec, Canada: ICAO.

ICAO. (2016). On Board a Sustainable Future - ICAO Environmental Report 2016 - Aviation and Climate Change (E. B. o. t. I. C. A. Organization, Trad.). Montreal, QC, Canada: INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION.

Jo, J.-I. S. G.-S. (2016). Flight Data Visualization and Post-test Flight Data Analysis System by Using Database. *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering*, 16(2), 85-94.

Kleiner, K. (2007). Civil aviation faces green challenge. *Nature*, Vol.448(7150), p.120.

Maggio, G. (1996). *Space shuttle probabilistic risk assessment: methodology and application*. Communication présentée Reliability and Maintainability Symposium, 1996 Proceedings. International Symposium on Product Quality and Integrity., Annual.

Mohan Das Gandhi, N., Selladurai, V., & Santhi, P. (2006). Unsustainable development to sustainable development: a conceptual model. *Management of environmental quality: an international journal*, 17(6), 654-672.

Mrazova, M. (2014). Sustainable development - the key for green aviation. *INCAS Bulletin*, Vol.6(1), 109-122.

OECD, O. f. E. C.-o. D. (2001). OECD Environmental Strategy for the First Decade of the 21st Century: Adopted by OECD Environmental Ministers (pp. 5-6). Paris: OECD-Organisation for Economic Co-operation Development.

Organisation for Economic Co-operation Development, O. (2001). OECD Environmental Strategy for the First Decade of the 21st Century: Adopted by OECD Environmental

Ministers (pp. 5-6). Paris: OECD-Organisation for Economic Co-operation Development.

Pande, P. S., Neuman, R. P., & Cavanagh, R. R. (2000). *The six sigma way: How GE, Motorola, and other top companies are honing their performance*. McGraw-Hill (New York).

Pavlock, K. M. (2013, Sep 19, 2013). *Aerospace Engineering Handbook Chapter 2 - Flight Test Engineering*. (20140010192). Purdue University, NASA Dryden Flight Research Center, Edwards, CA United States.

Pepper, M. P., & Spedding, T. A. (2010). The evolution of lean Six Sigma. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 27(2), 138-155.

Piccard, B. (2018). Solar Impulse Foundation World Alliance Solutions. Page consultée à <https://solarimpulse.com/world-alliance/solutions>

PMI, P. M. I. (2013). *A guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® guide), fifth edition* (5th éd.). Newtown Square, Pa.: Project Management Institute.

Reim, G. (2018, 08 MARCH, 2018). F-35 development and support to cost \$1 billion annually. Page consultée à <https://www.flightglobal.com/news/articles/f-35-development-and-support-to-cost-1-billion-ann-446565/>

Rush, C., & Roy, R. (2000, July 17th-20th, 2000). *Analysis of cost estimating processes used within a concurrent engineering environment throughout a product life cycle*. Communication présentée 7th ISPE International Conference on Concurrent Engineering: Research and Applications, Lyon, France.

Şahin, Ö., & Usanmaz, Ö. (2016). Arrival Traffic Sequence for Converging Runways. Dans T.H. Karakoc et al. (eds.) (Éd.), *Sustainable Aviation* (pp. 291-296): Springer International Publishing.

Sandborn, P. (2013). *Cost analysis of electronic systems*. Singapore: World Scientific.

Shiozawa, Y. (2016). The revival of classical theory of values *The Rejuvenation of Political Economy* (pp. 151-172): Routledge.

Singh, J., & Singh, H. (2009). Kaizen philosophy: a review of literature. *IUP Journal of Operations Management*, 8(2), 51.

Stoliker, F. N. (2005). RTO AGARDograph 300 - Introduction to Flight Test Engineering (Introduction aux techniques des essais en vol) (Vol. 14). The Flight Test Technical Team (FT3) of the Systems Concepts and Integration Panel (SCI) of the RTO.: NATO RESEARCH AND TECHNOLOGY ORGANIZATION NEUILLY-SUR-SEINE (FRANCE).

Sugimori, Y., Kusunoki, K., Cho, F., & Uchikawa, S. (1977). Toyota production system and kanban system materialization of just-in-time and respect-for-human

system. *The International Journal of Production Research*, 15(6), 553-564.

Thompson, L. (2008, 2008). Course Title: Flight Test Instrumentation. Page consultée à <http://www1.rmit.edu.au/courses/030267>

Thurber, M. (2006, December 18, 2006, 5:41 AM). The aircraft certification process. *AINOnline Business Aviation*. Page consultée à <https://www.ainonline.com/aviation-news/aviation-international-news/2006-12-18/aircraft-certification-process>

Ulmer, S. (2017, Posted on 21 JUN, 2017). Simulating extreme aerodynamics. *Science Node*. Page consultée à <https://scienode.org/feature/simulating-extreme-aerodynamics.php>

Upham, P. (2003). *Towards sustainable aviation*. Sterling, VA: Earthscan Publications.

Upton, E. M., Dimitri N. (2006). Quiet, Clean, and Efficient, but Heavy-Concerns for Future Fuel Cell Powered Personal Air Vehicles: SAE Technical Paper.

USDOD, U. S. A. D. o. D. (1996). Acceptance and Functional Check Flight Procedures and Checklist, MIL-PRF-5096F *Inspection and Maintenance Requirements*; (Vol. MIL-PRF-5096-F, pp. 84). Washington, DC: Air Force Product Data Systems Modernization (PDSM) Program Office (AFPPPO).

USDOD, U. S. A. D. o. D. (2013). *Operation of the Defense Acquisition System - interim instruction 5000.02*. (Interim DoDI 5000.02). Washington, DC: Repéré à <https://www.acq.osd.mil/fo/docs/DSD%205000.02 Memo+ Doc.pdf>.

USDOD, U. S. A. D. o. D. (Ed.) (2018) *DOD Dictionary of Military and Associated Terms* (June 2018 ed.). Washington, DC: Government Printing Office (GPO).

Van Aken, E. M., Farris, J. A., Glover, W. J., & Letens, G. (2010). A framework for designing, managing, and improving Kaizen event programs. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 59(7), 641-667. <http://dx.doi.org/10.1108/17410401011075648>

Wand, P. R. Y. (2009). A Proposal for a Formal Definition of the Design Concept. Dans P. L. Kalle Lyytinen, John Mylopoulos, Bill Robinson (Éd.), *Design Requirements Engineering: A Ten-Year Perspective* (pp. 103-136). Design Requirements Workshop, Cleveland, OH, USA: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Ward, D. T. S., Thomas W. (1998). *Introduction to Flight Test Engineering* (2nd éd.). Dubuque, Iowa: Kendall / Hunt Publishing Co.

ANNEXE #3 – Article soumis au journal IJSA 2018

Sustainable Flight Test Project Tools

Abstract: For the largest and most successful passenger aircraft manufacturers, identifying procedures to optimize certification flight test campaigns is essential for this most troublesome and unpredictable aspect of aircraft development. The selection and ordered utilization of the latest engineering and management tools will result in a considerable reduction in fossil fuel expenses as well as in overall product certification cost and time.

Keywords: Management Tools; Flight Tests; Engineering Tools, Cost Reduction, Sustainability

1 Introduction

1.1 Sustainable flights

Sustainability has been used as a goal to promote the scientific research and development of any solution that may, in some way, improve energy use, energy storage and energy transformation toward a perpetual reutilization of goods (Agarwal, 2009).

Advances in aviation technologies and sciences are among the top and most recent breakthroughs in sustainability. The term "sustainable aviation" encompasses many topics involved in aviation, including energy storage, the development of light and strong materials, robotic manufacturing procedures, intercontinental and local flight data links, computerized flow simulations and green fuel combustion, among many other means for conserving energy that may only be available for the coming generations (Walker & Cook, 2009).

Most of these recent solutions are not easy to implement, not cheaper than the current means, and often require a long period for industrialization and even longer time for market (customer) trust and acceptance (Mohan Das Gandhi, Selladurai & Santhi, 2006).

One of the challenges for future sustainable aviation is to safely transpose technologies and experimental laboratory solutions to a flightworthy, profit-making transport for revenue passengers and cargo.

The most important aspect of the development of a new aviation product, after the conception of the idea itself, is the testing and verification of the technological changes introduced. Tests are needed to confirm existing project data, gather complementary performance information and demonstrate compliance with safety and market requirements (Ward, Strganac & Niewoehner, 1998).

The present article addresses the "sustainment solution." As a test operation procedure, the methodology presented here was developed to identify the contributions of new advances in aviation at different levels to the sustainable use and transformation of energy. This approach provides an environment for testing the sustainability of aviation-based proposals, including current product development, applicability and certification under existing regulations.

This article will list current test processes and their expenses as well as new solutions to perform the same required activities, which, when performed following a sustainable approach, will result in cost, time and workforce reductions.

1.2 Specific Problem

Aircraft tests are needed to verify existing project data, gather complementary complex performance information, and demonstrate compliance with safety and market requirements and to ensure that the integration of production and maintenance activities is functional and safe (Stoliker, 2005).

Test flight data (flight hours) are different from one operator to another, and differences in aircraft size result in different quantities of fuel burned during operation. Test flights are an activity that transports nothing to nowhere many times, and they are often the reason that an aircraft is prevented from maintaining a profitable flight schedule (International Civil Aviation Organization, 2003). Therefore, flight tests are neither revenue-producing flights nor sustainable activities.

ICAO Circular 303-AN-176 lists the common operational opportunities to minimize fuel use and reduce emissions: a) fly the most fuel-efficient aircraft type for the sector; b) taxi the most fuel-efficient route; c) fly the most fuel-efficient route; d) fly at the most fuel-efficient speed; e) operate at the most economical altitude; f) maximize the aircraft's load factor; g) minimize the empty mass of the aircraft; h) load the minimum fuel to safely complete the flight; i) minimize the number of non-revenue flights; and j) maintain clean and efficient airframes and engines.

These same procedures are not valid for development and certification flights because the purpose of such flights is to support the safety of the aircraft rather than transporting goods. These procedures are often used to reduce cost in commercial aviation operations but are rarely applied in the aviation test and certification environment.

The problem, therefore, is determining how to reduce the total number of flight test hours that are currently required for any new aircraft-related development, certification or verification flight.

1.3 Localization: Flight Test Operations

A sustainable operation, according to the definition provided by the Organization for Economic Cooperation and Development (OECD), exists when the use of an energy source is renewable in some way (criterion I) and the assimilation rates in pollutant-receiving media are not exceeded (criterion III) as well as when all gains are close to the expenditures (criterion II) or vice versa (criterion IV) (Organisation for Economic Co-operation Development, 2001), (Upham, 2003).

Energy may be stored in kinetic mechanisms, fossil fuels or chemical banks and can be readily provided by solar panels, aerostatic generators and instant chemical reactions (Ibrahim, Ilinca & Perron, 2008). Currently, fossil fuels are the primary means of unsustainable energy storage, and these resources will at some point be impractical to retrieve from the environment. Thus, we conclude that the general problem is to reduce fossil fuel use and emissions to the extent possible as long as currently available technology is used.

The means to improve the sustainability of combustion fuel are as follows:

- reduce fossil fuel use,
- reduce the release of carbon gases, and
- reduce the utilization of non-recyclable or non-renewable materials.

When considering aircraft operation, all test flights have the subjective and intangible purpose of ensuring the safety quality of the product so that the aircraft will reach its final objective of transporting people/goods safely and securely.

These non-revenue flights represent an effort to test and certify an improved solution, consequently reducing carbon footprint and atmospheric pollution and indirectly contributing to a new level of sustainability in this activity. These flights are the means that

Author

justify a short-term reduction in sustainability to move toward a more sustainable long-term solution.

1.4 Objectives and Research Description

The direct way to reduce tests is to reduce flight-related activities, thus reducing the burning of fossil fuel. These measures may be taken immediately, as all technology is already available, but unfortunately, they have been undertaken only in several isolated efforts.

Improved management and Engineering Tools (ETs) are used to reduce costs, but the results are often applied to return the project schedule and budget back to the initial values estimated at the start of the project.

TA novel approach is to combine PM tools and ETs in a coordinated manner with test requirements so that the initial schedule and budget are at least maintained and ensured while flight hours and operational costs are reduced (Figure 1).

1.5 Parameters

Aircraft operations can be divided into the following categories: airliners, cargo, air taxi, private/business, military and non-revenue. ICAO Circular 303-AN-176 (International Civil Aviation Organization, 2003) classifies non-revenue flights as follows: training, positioning, ferry, test flights, development (tests) and engine testing. The present study is concerned with aircraft operations for development and certification tests. This specific activity is mainly performed by aircraft manufacturers and maintenance and repair organizations (MROs).

ICAO has issued other documents regarding carbon emission reductions for aircraft (International Civil Aviation Organization, 2010), (International Civil Aviation Organization, 2016), but these guidelines still do not address certification flight tests as among the opportunities to minimize fuel use and reduce emissions. Instead, the guidelines only mention that non-revenue flights should be minimized. Optimization of a test activity is commonly achieved after program management control variables (schedule, cost, manpower, service quality) are affected and subsequently noticed (Gardiner & Stewart, 2000).

If we consider "sustainable testing" as all flight test activities involving some sort of improvement in energy use, the "sustainable environment" is considered all remaining situations and activities that provide any level of sustainability less than 100% (Figure 2). The second sustainability component for test operations is to examine the testing activity itself for new ideas, new systems, and new prototypes that will help improve current levels of sustainability. Whatever resources are expended provide a positive benefit toward sustainability (e.g., electrical propulsion, renewable fuels).

All improvements will focus the aircraft test activity because this is the phase responsible for quality assurance during development and has not been included in earlier studies of fuel expenses.

2 Review of Flight Test Operations (literature review)

Flight tests are the most common means to demonstrate that an aircraft complies with safety, performance and operational requirements (SPO requirements). These tests can be classified into the following categories:

- Functional or production tests to verify whether a system is working (generating results as expected) as it should (as described in the Airplane Flight Manual and Production Flight Manual);

- Maintenance tests performed after the aircraft has gone through maintenance and verification of its functionality is required before its release for general use (Aircraft Maintenance Manual);

- Certification/qualification tests to demonstrate that the whole project, prototype or modification complies with government/market requirements (Federal Aviation Administration- FAA, European Aviation Safety Agency- EASA, Agência Nacional de Aviação Civil - ANAC, Military Standards and Specifications – MIL Specs) related to SPO.

All flight tests require a conformance test article, a test proposal (request guide), a routine (checklist) (United States Air Force, 1996), a person responsible for the test (request and data result interpretation), a trained test crew and a final test result report.

A conformance test article indicates that the item used for the test is equivalent in all important details to the item that will come out of a production line and will be available to the customer. The “state of conformity” is the proof document resulting from an article inspection and its current condition for the test. This article inspection may be a visual direct comparison or a documented process verification if the process is already qualified and agreed upon by the control agency.

The test proposal is the document that contains and authorizes all activities that must be performed to demonstrate that the product is compliant with regulations. These regulations may govern the internal performance of the project, regulator demands, customer contract issues and safety improvements. The test proposal is then transcribed into a detailed test routine (test card), in which each test action is performed in an organized sequence until a desirable result is found from those activities.

The trained test crew is composed of specialized airplane pilots and engineers, and their training demands a thorough knowledge of aerodynamics, aircraft systems, the project and its operation, as well as all requirements and rules for the aircraft being tested. These engineers and pilots conduct the planning, preparation, negotiation and execution of all activities for the test articles.

The test result report is the document that serves as output from all test work. This report must be prepared by the persons who participated in the tests and/or were responsible for analyzing all data gathered by these tests.

Flight tests should not be performed with the primary aim of “finding out” or “discovering new things,” as they should not be a trial-and-error procedure (Stoliker, 2005). Although flight tests are still considered an experimental activity (i.e., the desired results may not be obtained), they should be performed to prove expected results: the flight test is a demonstration process. All previous known results that indicate the test will be successful must be available for planning, decision and compliance support through other engineering means, including numerical simulations, calculations, ground tests, separate system tests (Rigs), laboratory tests, and scaled prototype tests, and their risk analysis (Maggio, 1996).

Test requirements (certification or qualification) are usually based on private/government agencies regulations (FAA, ANAC, EASA, MIL specs, ISO, ABNT) (Regulation-FAR25 & Federal Aviation, 2000) (EASA & Certification Specification, 2013), customer contract demands and corporate quality policies.

There are requirements for all stages of the product life, including conception, development, testing, supplier selection, production, delivery, maintenance and discarding. It is normal to see requirements used from one stage to another, such as development requirements used as testing requirements, and typically, the objective is achieved. However, for a complex project or product, each stage of the product life must meet its specific

Author

requirements; if the process exceeds or falls short of the requirements at a given stage, an overpriced or under-qualified product might result.

Flight tests are performed by all aircraft operators: aircraft manufacturers (Boeing, Airbus, Embraer, Bombardier, Gulfstream, Lockheed-Martin, UTC, Pilatus, Leonardo, Mitsubishi, Kawasaki, Sikorsky, Sukhoi, SAAB, Piper), Original equipment manufacturer (OEMs) (Honeywell, P&W, RR, GE, Rockwell-Collins, Thales), Maintenance, Repair, and Overhaul Facility (MROs), airlines, commuter providers, military forces, and private aircraft owners.

Each different type of test has a different duration. The larger the aircraft, the more expensive it is to fly; thus, every minute of running engine(s) must produce the expected results. A perfect fit for this testing time is of great importance to the primary schedule and finally to the overall delivery.

The production test is performed on the product after it has been assembled, and it is the last activity of the certified production process. A production test may take from 3 to more than 20 flight hours because all problems, malfunctions and failures must be resolved before delivering it to the customer or returning it to revenue-generating operation. Usually, these non-conformities or problems regarding the correct response for the expected use are corrected after the flight test by maintenance personnel on the ground. Very few adjustments, usually those related to correcting interior fixtures (doors, latches, insulation, air ducting, alignment), can be performed in flight; therefore, almost all of the test results depend on a detailed result report, ensuring that diagnosis, corrections and substitutions are completed in a controlled environment (on the ground).

The amount of fuel burned in a flight test campaign is directly proportional to the size of the aircraft maximum take-off weight (MTOW). A certification test campaign for a new type of aircraft averages 2000 flight hours and approximately 18 months from the first flight until the type certification is issued by the certification authority (Figure 3). Detailed data for the graph can be found directly from each manufacturer's media publications, such as their own website, specialized periodical magazines and press-releases. These tabulated values are provided in ANNEX #1.

The following factors impact the duration of the flight test campaign: financing, weather/season, corporate knowledge, specialized manpower, project complexity/systems integration and new technology/product maturity.

A lack of funds for any part of a 25-part certification process that may require 24 months (or longer), even though it is included in the business plan, can render the project unfeasible if any of the other parts exceeds its predicted cost. Several companies (e.g., Fairchild-Dornier, Eclipse, Bombardier, Cessna, Piper) in the past 20 years have abandoned new projects during certification tests because financing to support project complexity or product maturity was underestimated.

A new manufacturer with recent knowledge of the certification and test procedures or a new step-up technology on the market may have the test and certification period increased up to 5 years and 4000 fh (e.g., HondaJet, Mitsubishi, COMAC).

Figure 3 plots several development and certification campaigns for new aircraft models from 6 different aircraft manufacturers (shown in ANNEX #1). The oval area includes the industry standard flight time and duration time for flight tests (greater than 1000 fh and lesser than 2400 fh and lasting less than 25 months). Flight hour values under 1000 (lower rectangle) represent a partial certification as a supplemental type certificate (STC), which indicates that an aircraft model was developed based on a previously certified and existing model, requiring a less-intensive demonstration.

Most of the values above 2400 fh that last more than two years (upper polygon) may highlight aircraft manufacturers who were not fully prepared for the project in terms of

technology, workforce, or investments at the time of the development and certification demonstration.

3 Discussion: Flight Test Management

Mandatory certification or qualification regulations have become lengthier for the safety of both the aircraft users and people on the ground, who might not even be aware of what is happening overhead.

RA reduction in the number of flights is needed not only because flight testing is expensive and does not seem to add direct value to the product but also because it will directly reduce fossil fuel burning and indirectly reduce the greenhouse effect caused by the production of carbon-heavy gases (International Civil Aviation Organization, 2010).

The flight test operator flies a shorter amount of time than do airline or commuter operators because the main target is not to transport goods but to complete or fulfill a safety, performance or operational requirement. The useful time of the prototypes correlates directly with the low dependability of new systems, unfinished systems, unconfigured prototypes, unmatched weather conditions, and all variables that determine the "test readiness" and challenge the predictability of the test program.

3.1 *Are there ways to improve these numbers?*

All solutions must be tested against three criteria: deployability, sustainability and viability. Efficient solutions are not limited to the production of renewable energy; rather, such solutions encompass products, services, clean technologies and processes that are profitable and sustain economic growth while protecting the environment and optimizing the use of natural resources (Piccard, 2018) (solarimpulse.com).

Reducing the duration of testing aloft, consequently reducing the burning of fossil fuels and the resulting emissions, may be achieved with a more concise, improved test campaign with fewer flight hours, relying more heavily on the demonstration of requirements through non-flying tests (e.g., analysis, simulations, ground tests, laboratory tests), and the development of a new set of current airworthiness requirements (Kleiner, 2007).

Many of these alternate means to reduce testing may be achieved through effective program management tools tailored to flight tests, such as a corporate "Kaizen." Barnes (1996) (Singh, J.; Singh, H., 2009), 6 Sigma (Pande, Neuman & Cavanagh, 2000), lean operation (Bergmann & Pribsch, 2011) (Pepper & Spedding, 2010), and supplier quality and test readiness tools (Sandborn, 2013). Additional approaches depend on engineering tools as numerical simulations (Edwards, Lombaerts & Smaili, 2010), motion simulators (Celere, Varoto & Maciel, 2007), scaled labs (wind tunnel), rigs and ground tests.

Project management (PM) and engineering tools (ETs) are employed to reduce flight hours (fh) and thereby directly improve the sustainability of flight tests. Each flight type has its own possible improvement tool, but the final target is to achieve an aggregation of gains (Agarwal, 2009) to maximize the sustainability of the test process.

System development tests may be partially replaced by selected numerical simulations and ground tests (dedicated rigs and full-airplane "iron birds").

System certification tests have the flexibility to be performed in a laboratory environment (rig) and as ground tests (dedicated rigs and full-airplane "iron birds").

Aircraft handling development and certification tests may be partially replaced by scaled prototypes, online simulations, and motion simulators. These tests may be scheduled alongside system tests and system certification, but they are the most difficult to reduce because the main target is intrinsically to evaluate the characteristics of the control and handling of the final product.

Author

Maintenance test and production test improvements are directly proportional to the quality of the service, the existent fault search protocol and parts that have been previously certified instead of undergoing the initial clearance tests for flight readiness.

Recent technologies (engineering tools) such as GTF engines, eco-fuel blends and reduced approach routes (Şahin & Usanmaz, 2016) are additional means to improve sustainability in test operations (Mrazova, 2014).

The final procedure that combines all available engineering tools and management tools to provide an organization and decision-making checklist for related aircraft test operations is the "test readiness" procedure. This procedure involves controlling all activities through a "kanban" (Sugimori, Kusunoki, Cho & Uchikawa, 1977) data bank (test readiness matrix), requiring all preparation steps for each test to be ready (green colored) before the next phase is scheduled for flight. The lines of the matrix are filled with tasks, milestones and activities. Each column of the matrix is filled with requirements as shown in Table #1 (arrows). The "test matrix" lines are scheduled on different time frame calendars, including long-, medium- and short-term schedules, to produce a reduced-scope test campaign. This procedure reduces the likelihood of premature planning over incomplete tasks, thus reducing ineffective flights.

The elaboration of the "test readiness matrix" requires the involvement of all areas of product development (management, engineering, testing and manufacture) or service areas (management, maintenance, contracts, test and operation). See example on Table 1.

When running a "test readiness matrix"/checklist, tasks and milestones may be considered for possible execution only if all preparation requirements have been previously performed. This may seem a very common and natural organizational process, but for medium to complex project management such as aircraft test development and operation during these tests, missing one preparation activity, task or milestone will result in a no-go (no-flight) situation. The very costly and complex aircraft operations schedule suffers heavily due to schedule foul-outs.

Three successful aircraft manufacturers of high importance and market position were considered (but are not named due to NDA requirements) to summarize the possible reduction in flight hours (fh) regarding the cumulative use of tools. Their improvements and leading procedures were listed, compared and plotted.

Table 2 summarizes project management and engineering novelties and their possible gain, i.e., reduced flight hours (fh), which may improve the sustainability of flight tests. Each flight type has its own possible improvement tool, but the final target is to combine all gains to benefit the whole testing process.

4 Conclusion

The future of sustainable flight tests is moving toward 100% clean propulsion (Upton & Mavris, 2006) and 100% "by wire" controls (Favre, 1994) with major modifications to the regulations. These technologies, whenever they come, will change the handling, performance and operational requirements as we know them today.

Although flight test operations are a neglected aspect of aircraft operations worldwide, their importance lies in ensuring that research and development of new products, as well as the maintenance and modification of existing ones, meet safety, performance and operation regulations. This type of operation also determines when the customer can return an aircraft to revenue-generating activities and is a legal requirement.

The key contribution of this paper is achieved through a comparison (benchmark) of flight test campaigns from many players and concluding that the most successful approaches combine management tools and engineering tools for scheduling, reprogramming and changing means of compliance with regulations. A considerable number of flights can be

eliminated while maintaining the same level of product safety and overall operation quality, as in Figure 4.

The test readiness matrix is used as a corporate management tool to release test flights so that the final certification activity is reduced at the demonstration level, thus bringing fuel expenses, manpower and resources to optimal levels.

A further incremental study, including implementation details for each tool used, is advised because improvements and experience with flight test operations may emerge more frequently. Detailed statistical and benchmark results from additional aircraft manufacturers, especially the new manufacturers in the market from China, Japan, Ukraine and Russia, should also be considered.

References

- Agarwal, R.K. (2009) 'Sustainable (green) aviation: challenges and opportunities', *SAE Int. J. Aerosp.*, Vol. 2, No. 2009-01-3085, pp. 1-20.
- Barnes, T. (1996) *Kaizen Strategies for Successful Leadership: How to Take Your Organization into the Future*. London: Pitman.
- Bergmann, S. & Priebsch, S. (2011) *Real-World Solutions for Developing High-Quality PHP Frameworks and Applications*. Indianapolis: Wiley.
- Celere, A., Varoto, P. & Maciel, C. 2007. Verifying pilot gain in PIO flight test.6640.
- EASA & Certification Specification (2013) *Acceptable means of compliance for large aeroplanes cs-25*.
- Edwards, C., Lombaerts, T. & Smaili, H. (2010) 'Fault tolerant flight control'. *Lect. Notes Cont. Inf. Sci.*, Vol. 399, pp. 1-560.
- Favre, C. (1994) 'Fly-by-wire for commercial aircraft: the Airbus experience', *Int. J. Cont.*, Vol. 59, No. 1, pp. 139-157.
- Gardiner, P.D. & Stewart, K. (2000) 'Revisiting the golden triangle of cost, time and quality: the role of NPV in project control, success and failure', *Int. J. Proj. Manag.*, Vol. 18, No. 4, pp. 251-256.
- Ibrahim, H., Ilinca, A. & Perron, J. (2008) 'Energy storage systems—Characteristics and comparisons', *Renew. Sust. Energ. Rev.*, Vol. 12, No. 5, pp. 1221-1250.
- International Civil Aviation Organization (2003) *Operational Opportunities to Minimize Fuel Use and Reduce Emissions, Circular 303-AN/176*. ICAO, Montreal: International Civil Aviation Organization.
- International Civil Aviation Organization (2010) *ICAO Environmental Report 2010: Aviation Outlook*. Montréal, Québec, Canada.
- International Civil Aviation Organization (2016) *On Board a Sustainable Future - ICAO Environmental Report 2016 - Aviation and Climate Change*. Montreal, QC, Canada.
- Kleiner, K. (2007) 'Civil aviation faces green challenge', *Nature*, Vol. 448, No. 7150, pp. 120.
- Maggio, G. 1996. Space shuttle probabilistic risk assessment: methodology and application. Las Vegas, NV:121-132.
- Mohan Das Gandhi, N., Selladurai, V. & Santhi, P. (2006) 'Unsustainable development to sustainable development: a conceptual model', *Manag. Environ. Qual.*, Vol. 17, No. 6, pp. 654-672.
- Mrazova, M. (2014) 'Sustainable development - the key for green aviation', *INCAS Bulletin*, Vol. 6, No. 1, pp. 109-122.
- Organisation for Economic Co-operation Development (2001) *OECD Environmental Strategy for the First Decade of the 21st Century: Adopted by OECD Environmental Ministers*. Paris: [Online] Available from:

Author

- <http://www.oecd.org/env/indicators-modelling-outlooks/l863539.pdf> [Accessed: 1/5/2018].
- Pande, P.S., Neuman, R.P. & Cavanagh, R.R. (2000) *The Six Sigma Way: How GE, Motorola, and Other Top Companies are Honing their Performance*. McGraw-Hill (New York).
- Pepper, M.P. & Spedding, T.A. (2010) 'The evolution of Lean Six Sigma', *Int. J. Qual. Reliab. Manag.*, Vol. 27, No. 2, pp. 138-155.
- Piccard, B. 2018. *Solar Impulse Foundation World Alliance Solutions*. [Online] Available from: <https://solarimpulse.com/world-alliance/solutions> [Accessed.
- Regulation-FAR25 & Federal Aviation (2000) 'Title 14 CFR Part 25 including Amendment 25-101',
- Şahin, Ö. & Usanmaz, Ö. (2016) 'Arrival traffic sequence for converging runways', In Karakoc, T.H., Ozerdem, M., Sogut, M., Colpan, C., Altuntas, O. & Açıkkalp, E. (Eds.). *Sustainable Aviation*. (291-296). Cham: Springer International Publishing.
- Sandborn, P. (2013) *Cost analysis of electronic systems*. Singapore: World Scientific.
- Stoliker, F.N. (2005) *RTO AGARDograph 300 - Introduction to Flight Test Engineering (Introduction aux techniques des essais en vol)*. The Flight Test Technical Team (FT3) of the Systems Concepts and Integration Panel (SCI) of the RTO: [Online] Available from: www.rta.nato.int.
- Sugimori, Y., Kusunoki, K., Cho, F. & Uchikawa, S. (1977) 'Toyota production system and kanban system materialization of just-in-time and respect-for-human system', *Int. J. Prod. Res.*, Vol. 15, No. 6, pp. 553-564.
- United States Air Force (1996) 'Acceptance and functional check flight procedures and checklist, MIL-PRF-5096F', United States Air Force, MIL-PRF-5096.
- Upham, P. (2003) *Towards Sustainable Aviation*. Sterling, VA: Earthscan Publications.
- Upton, E. & Mavris, D.N. (2006) *Quiet, clean, and efficient, but heavy-concerns for future fuel cell powered personal air vehicles*.
- Walker, S. & Cook, M. (2009) 'The contested concept of sustainable aviation', *Sust. Dev.*, Vol. 17, No. 6, pp. 378-390.
- Ward, D.T., Strganac, T.W. & Niewoehner, R. (1998) *Introduction to Flight Test Engineering*. Dubuque IA: Hunt.

Tables captions

Table 1: Test Readiness Matrix example.

Table 2: Possible fh reduction / possible gain.

Table 1

Test Readiness Condition Checklist	required	available
FTP created		
Test released for "macro" schedule		
FTP released for discussion		
FTP negotiated		
Aircraft modification needed?		
EO released for mod		
FTP checked by FTE		
Test on "medium-term" schedule?		
FTP checked by leader		
FTP approved by Test leader		
FTP approved by leader		
Engineering Order mod installed?		
Specific Software Requirement		
Specific Hardware Requirement		
Test on "weekly" schedule?		
Configuration on schedule?		
Aircraft configured?		
Meteorological Conditions		
Test Location Cond. & Resources		
Engineering support		
Authority delegate		
Telemetry		
Engineering Validation Tools		
Post-test data recorders (FDR, QAR)		
Spare parts available		
Ground support during test		

Table 2

Flight Test Type	Alternate Means/Tools	Possible fh reduction
System development	Rig; numerical sim.; improved supplier quality	25%
Handling development	Scaled lab; Online sim.; parallel with system test	25%
System certification	Lab.; Rig; Reports; Engineer Sim	25%
Handling certification	Motion Sim.	20%
Maintenance	Ground tests; Test bench; Maturity	10-15%
Production	Assembly quality assurance;	50%
All flight tests	Non-fossil fuel blend burn	20%
All flight tests	Low emission / + efficient power plant	10-20%
All flight tests	Reduced Approach route	5-10%
All flight tests	Test Readiness* (Kanban, Agile, Kaisen)	20%

Figure legends

Figure 1: Main improvement tools.

Figure 2: Sustainable testing classification.

Figure 3: Flight test duration with flight hours.

Figure 4: Improvement on flight test campaigns.

Figure 1

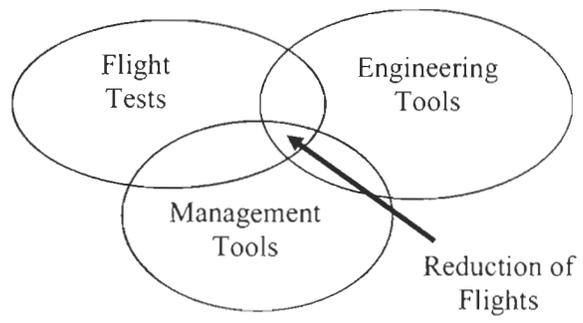


Figure 2

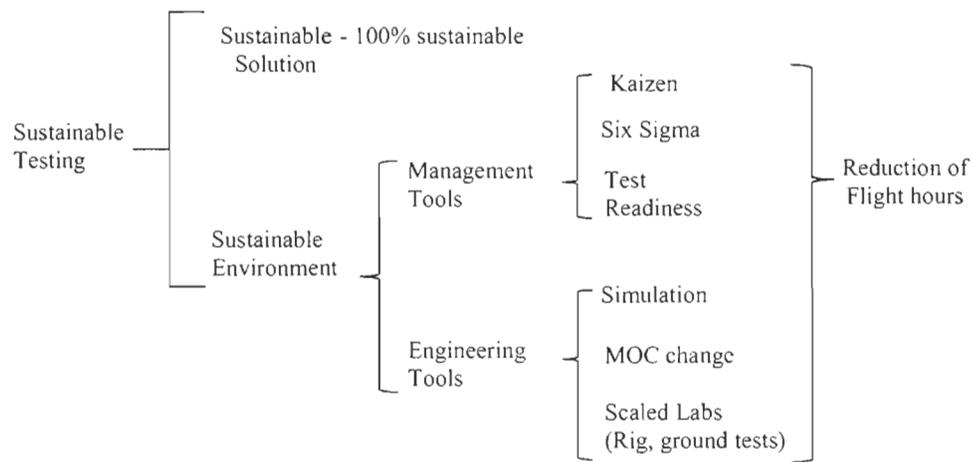


Figure 3

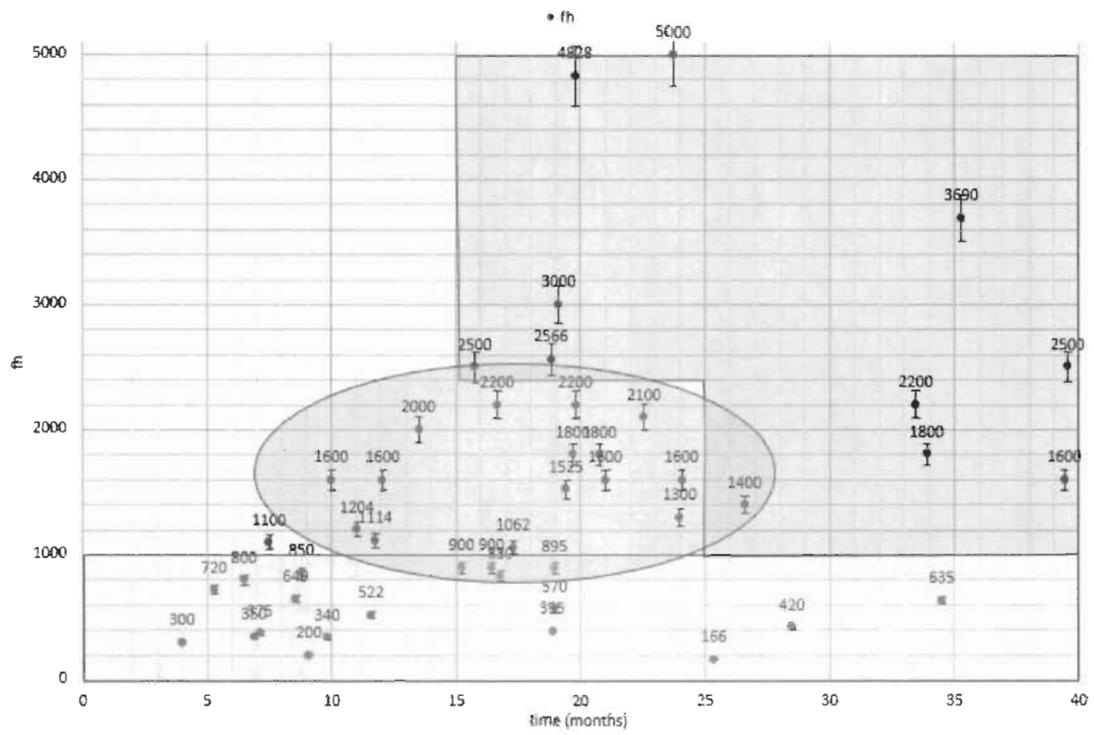
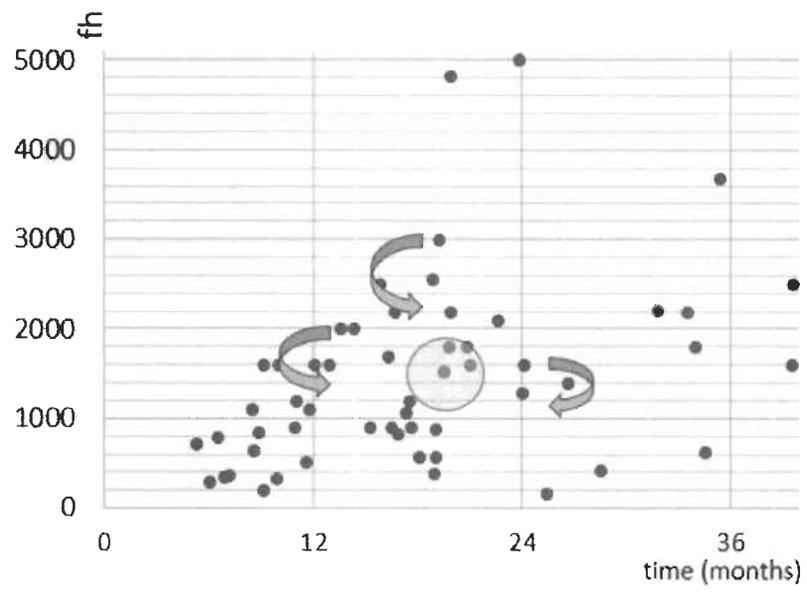


Figure 4



ANNEX #1 – Benchmark table: aircraft flight test campaigns

model	1st flight	TC date	days	months	# flights	fh	#prots	JET A1 kg/h	fuel burn
A318	15-Jan-2002	23-May-2003	493	16	350	900	2	2374	2136600
A330-300	2-Nov-1992	21-Oct-1993	353	12	426	1114	6	5700	6349800
A330-200F	5-Nov-2009	13-Apr-2010	159	5	180	<u>720</u>		5600	4032000
A330neo-900	19-Oct-2017	<u>1-Jun-2018</u>	225	8	<u>367</u>	1100	3	4592	5051200
A340-500	11-Feb-2002	3-Dec-2002	295	10		340	2	8000	2720000
A400M	12-Dec-2009	13-Mar-2013	1187	40		<u>2500</u>	5	<u>4000</u>	10000000
A380	27-Apr-2005	12-Dec-2006	594	20	<u>550</u>	2200		11000	24200000
A350-900	14-Jun-2013	30-Sep-2014	473	16	<u>833</u>	<u>2500</u>	4	5800	14500000
A350-1000	24-Nov-2016	21-Nov-2017	362	12	<u>533</u>	1600	3	12000	19200000
B737-300	24-Feb-1984	14-Nov-1984	264	9		850	3	2400	2040000
B737-600	22-Jan-1998	24-Aug-1998	214	7		375	1	2400	900000
B737-900	3-Aug-2000	17-Apr-2001	257	9	296	649	2	2530	1641970
B737-8 max	29-Jan-2016	9-Mar-2017	405	14	<u>500</u>	<u>2000</u>	4	<u>2151</u>	4301000
B767-200	26-Sep-1981	23-Jul-1982	300	10		1600	6	4500	7200000
B767-400ER	9-Oct-1999	21-Apr-2000	195	7		800	3	5100	4080000
B777-200LR	8-Mar-2005	2-Feb-2006	331	11	328	1204	2	6800	8187200
B777-freiter	14-Jul-2008	6-Feb-2009	207	7		350		6800	2380000
B787-8	15-Dec-2009	1-Aug-2011	594	20	1707	4828	6	5600	27036800
Challenger 605	1-Jan-2006	1-Oct-2006	273	9		200	2	1016	203250
CRJ-700	27-May-1999	1-Dec-2000	554	21		1600	4	1450	2320000
CRJ-900	21-Feb-2001	13-Sep-2002	569	19	347	895	2	1600	1432000
CRJ-1000	3-Sep-2008	10-Nov-2010	798	27	470	1400	1	1740	2436000
Global 7000	4-Nov-2016	<u>1-Jun-2018</u>	574	19		<u>3000</u>	4	1295	3883500
CSeries 100	16-Sep-2013	16-Jun-2016	1,004	33	<u>880</u>	<u>2200</u>	5	1800	3960000
CSeries 300	27-Feb-2015	11-Jul-2016	500	17	<u>880</u>	<u>2200</u>	2	1950	4290000
Dassault 7X	5-May-2005	27-Apr-2007	722	24	600	1600	4	968	1548800
Dassault 8X	6-Feb-2015	24-Jun-2016	504	17	400	830	3	1091	905455
E135	1-Jun-2000	1-Jun-2001	348	12	348	522	2	1000	522000
E145SA	1-Jun-1999	1-Apr-2002	1,035	35		635	2	1100	703000
E145RS	16-Dec-1999	Apr-2002	855	29		420	2	1100	462000
E145H	1-Jul-2001	Aug-2003	761	25	120	166	1	1100	182600
E145XR	1-Jul-2001	1-Oct-2002	457	15	360	<u>900</u>	2	1100	990000
E170	19-Feb-2002	1-Feb-2004	712	24		<u>5000</u>	10	1530	7650000
E175	14-Jun-2003	31-Dec-2004	566	19	223	395	1	1650	651750
E190	12-Feb-2004	30-Aug-2005	565	19		2566	5	1970	5055020
E195	7-Dec-2004	29-Jun-2006	569	19	315	570	1	2000	1140000
Legacy 600	31-Mar-2001	1-Sep-2002	519	17	570	<u>1062</u>	2	1100	1168640
Legacy 500	27-Nov-2012	12-Aug-2014	623	21		1800	4	757	1362600
Legacy 450	28-Dec-2013	11-Aug-2015	591	20		<u>1800</u>	2	680	1224000
KC-390	3-Feb-2015	<u>1-May-2018</u>	1,183	39		1600	2	<u>2300</u>	3680000
Phenom 300	29-Apr-2008	3-Dec-2009	583	19	852	1525	2	455	693685
E2 190	25-Feb-2016	2-Jan-2018	677	23		2100	4	1970	4137000
G280	11-Dec-2009	1-Dec-2011	720	24		1300	3	<u>710</u>	922409
G500	18-May-2015	11-Apr-2018	1,059	35	995	3690	5	1970	7269300
G650	25-Nov-2009	7-Sep-2012	1,017	34		1800	5	1400	2520000

Obs.: underlined information is extrapolated from other related data.