TABLE DES MATIÈRES

Page

INTRODUCTION 1

CHAPITRE 1 ÉTAT DES CONNAISSANCES.....3
1.1 L'industrie de l'hélicoptère.....3
1.1.1 Appareil et marché 3
1.1.2 Modèle d'affaire industriel, opération et cycle de vie 5
1.1.3 Aviation, hélicoptères et environnement 8
1.2 Les chaines logistiques inverses dans l'industrie.....12
1.2.1 Définition et applications industrielles 13
1.2.2 Potentiel technique, économique et environnemental 13
1.2.3 Remise à neuf et mise à niveau en aéronautique 15
1.3 Mesure de la performance et outils applicables.....17
1.3.1 Concept d'éco-efficience 18
1.3.2 Mesure de la performance économique 19
1.3.3 Mesure de la performance environnementale 20

CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE.....23
2.1 Définition structurelle du système à l'étude 23
2.1.1 Cadre fonctionnel..... 23
2.1.2 Découpage et définition des processus 24
2.1.3 Agencement des processus 25
2.2 Évaluation de l'éco-efficience 28
2.2.1 Performance des processus 28
2.2.2 Performance des cycles d'exploitation 31
2.3 Étude de cas : mise à niveau d'un hélicoptère 32
2.3.1 Scénarios considérés 32
2.3.2 Acquisition des données accessibles..... 34

CHAPITRE 3 RÉSULTATS ET ANALYSE 37
3.1 Méthode développée 37
3.1.1 Bilan des données des appareils et des processus..... 38
3.1.2 Bilan de la méthode d'évaluation 41
3.2 Résultats de l'étude de cas 43
3.2.1 Paramètres spécifiques..... 44
3.2.2 Données appareils et considération en fin de vie..... 47
3.2.3 Performances des processus d'assemblage et de mise à niveau 49
3.2.4 Performance des cycles d'exploitation 53

CHAPITRE 4 DISCUSSION 63
4.1 Cas de la mise à niveau d'hélicoptères 63
4.1.1 La mise à niveau : alternative éco-efficiente à la fin de vie ?..... 63

4.1.2 Scénarios et hypothèses initiales considérés 65
4.1.3 Potentiel en tant que modèle d'affaire 66
4.1.4 Recommandations 68
4.2 Méthodologie développée 69
4.2.1 Potentiel pour l'industrie et la recherche 70
4.2.2 Perspectives de développements futurs 71
4.2.3 Potentiel d'application à d'autres industries 73

CONCLUSION 75

ANNEXE I IDENTIFICATION DES ENTITÉS FONCTIONNELLES ET DES FLUX À L'ÉCHELLE DU SYSTÈME 77

ANNEXE II FEUILLE DE COLLECTE D'INFORMATION SUR L'APPAREIL DU PROJET ENV-412 (ÉTUDE DE LA FIN DE VIE) 79

ANNEXE III MESURE DE LA COMPOSITION DES MATÉRIAUX PAR SPECTROMÉTRIE DE FLUORESCENCE X 81

ANNEXE IV CONSOMMABLES IDENTIFIÉS ET CONSIDÉRÉS DANS L'ÉTUDE DE CAS 83

ANNEXE V MATÉRIAUX ET ÉLÉMENTS DE FIXATION CONSIDÉRÉS DANS L'ÉTUDE DE CAS 85

ANNEXE VI DONNÉES GÉNÉRÉES POUR LES PROCESSUS D'INSPECTIONS ANTICIPÉS DANS LE CADRE DE L'ÉTUDE DE CAS 87

ANNEXE VII DONNÉES BRUTES GÉNÉRÉES (CYCLES D'EXPLOITATION) 89

ANNEXE VIII STRUCTURE DU MODÈLE LOGICIEL IMPLÉMENTÉ POUR L'ÉTUDE DE CAS 91

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 93

LISTE DES TABLEAUX

Page

Tableau 1.1 Exemple de rétention de la valeur d'un hélicoptère au cours du temps 8

Tableau 1.2 Principales activités liées au cycle de vie d'un hélicoptère présentant des effets négatifs sur l'environnement 10

Tableau 2.1 Variables et indicateurs employés pour les processus 30

Tableau 3.1 Paramètres spécifiques à l'étude de cas 44

Tableau 3.2 Valeurs monétaires considérées pour les appareils.....46

Tableau 3.3 Différences dans les nombres d'occurrence de maintenance pour A et B.....47

Tableau 3.4 Étude massique lors de la fin de vie de l'appareil A.....48

Tableau 3.5 Bilan du premier niveau d'évaluation de l'étude de cas 49

Tableau 3.6 Comparaison des indicateurs pour les cycles de références 55

Tableau 3.7 Variation du nombre d'occurrences de maintenance de A et de B 55

Tableau 3.8 Bilan de l'évaluation des cycles étudiés (300 h/an).....57

Tableau 3.9 Bilan de l'évaluation des cycles étudiés (600 h/an).....57

Tableau 3.10 Bilan de l'évaluation des cycles étudiés (1 200 h/an).....58

Tableau 4.1 Bilan de l'atteinte des objectifs d'éco-efficience par la mise à niveau 64

LISTE DES FIGURES

Page

Figure 1.1 Proportion résiduelle de matériaux et composants 12

Figure 1.2 Économies réalisées à travers la remise à neuf d'appareils d'impression Xerox 14

Figure 1.3 Approche par bilan de flux 22

Figure 2.1 Représentation du cycle d'exploitation 24

Figure 2.2 Découpage des processus.....25

Figure 2.3 Paramètres opérationnels des cycles d'exploitation 26

Figure 2.4 Flux considérés pour l'inventaire des processus.....29

Figure 2.5 Évaluation de la performance des cycles d'exploitations.....31

Figure 2.6 Unités fonctionnelles employées pour l'évaluation 32

Figure 2.7 Illustration des deux niveaux de considérations pour les scénarios étudiés 33

Figure 2.8 Provenance des données de l'étude de cas.....35

Figure 3.1 Découpage fonctionnel de la méthode.....38

Figure 3.2 Bilan du découpage des processus.....40

Figure 3.3 Bilan de la méthode développée 42

Figure 3.4 Illustration des deux niveaux de considération de l'étude de cas.....43

Figure 3.5 Bilan des coûts selon le processus sélectionné 51

Figure 3.6 Bilan massique des composants pour les processus de mise à niveau et d'assemblage à neuf.....52

Figure 3.7 Récapitulatif des scénarios étudiés 54

Figure 3.8 Variations dans les coûts d'exploitation des deux appareils A et B.....56

Figure 3.9 Variation des coûts d'exploitations en fonction du moment de la décision.....59

Figure 3.10 Détails de l'évolution du coût total des opérations (scénario M_1200_10 et R_1200_10) 60

Figure 3.11 Détails de l'évolution du coût total des opérations (scénario M_1200_20 et R_1200_20) 60

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AFRA	Aircraft Fleet Recycling Association
ASA	Aircraft Supplier Association
ASL	Above Sea Level
CR&O	Component Repair and Overhaul Manual
CRIAQ	Consortium de Recherche et d'Innovation en Aéronautique du Québec
CTA	Centre Technologique en Aérospatiale
DfD	Design for Disassembly
DfE	Design for Environnement
DfR	Design for Reassembly
ÉNA	École Nationale d'Aérotechnique
EPA	Environmental Protection Agency (USA)
FAA	Federal Aviation Administration
FM	Flight Manual
IATA	International Air Transport Association
IPB	Illustrated Parts Breakdown
LCA	Life Cycle Analysis
LCC	Life Cycle Cost
LCI	Life Cycle Inventory
LCIA	Life Cycle Impact Assessment
M&O	Maintenance and Overhaul Instructions
MM	Maintenance Manual
MRO	Material Recovery Opportunities
OACI	Organisation de l'Aviation Civile Internationale
PAMELA	Process for Advanced Management of End-of-Life Aircraft
RAC	Règlement de l'Aviation Civile Canadienne
SI	Service Instructions
STEPPE	Station Expérimentale des Procédés Pilotes en Environnement
TBO	Time Before Overhaul

Rapport-Gratuit.com

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

UNITÉS DE MESURE

Énergie

MJ	Mégajoule
kWh	Kilo Watt par heure

Masse

lb	Livre américaine (US Pound)
kg	kilogramme
kg-CO_2 eq	kilogramme de CO_2 équivalent

Volume

m^3	Mètre cube
USGAL	Gallons américains

Monétaire

CAD	Dollar canadien
USD	Dollar américain

Temps

min	Minute
h	Heure
HV	Heure de vol

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

INTRODUCTION

Influencé par la prise de conscience grandissante des effets environnementaux des activités de production, le concept d'éco-efficience industriel prône la limitation de l'usage de ressources nouvelles ainsi que la diminution de la génération de matières résiduelles qui en résulte (WBCSD, 1996). Dans une volonté d'atteindre l'éco-efficience des processus de production, de nouveaux paradigmes industriels émergent progressivement, tels que les systèmes de production en chaine logistique inverse[1]. Parmi ceux-ci, la remise à neuf d'un produit permet de contribuer à l'atteinte de systèmes de production souvent plus éco-efficients que les systèmes de production standards (Adler et al., 2007; Center for Remanufacturing & Reuse, 2009). Cependant, la contribution de ces processus peut être limitée par la proportion d'un produit à être remis à neuf (Ljomah et al., 2004; Kerr et Ryan, 2001).

Contrairement aux avions commerciaux pressurisés, souvent remplacés dès lors qu'ils ne satisfont plus les besoins de leur opérateur ou après avoir atteint leur fin de vie technique, les hélicoptères sont plus à même d'être maintenus en vol pour une durée indéterminée, tant que leurs performances et leur intégrité permettent leur exploitation rentable et sécuritaire. Cependant, un opérateur peut être amené à exprimer le désir d'acquérir un nouvel appareil dans l'éventualité d'un nouveau besoin d'ordre économique, opérationnel ou réglementaire.

Les hélicoptères légers non pressurisés ont notamment démontré une forte réceptivité à la remise à neuf et la mise niveau partielle ou totale. Ces processus permettent d'allonger la durée de vie de l'appareil, de moderniser ses systèmes, et d'augmenter ses performances opérationnelles, souvent pour une fraction du coût d'un appareil neuf équivalent. Plusieurs

---

[1] Rogers et al. (1999) définissent une chaine logistique inverse comme étant : « Le processus de planification, d'implémentation et de contrôle efficace des coûts des flux de matières premières, des inventaires en fabrication, des produits finis, ainsi que de l'information associée, du point de consommation vers le point d'origine, dans le but de récupérer ou de créer de la valeur ou d'en disposer proprement » (Traduction libre).

fabricants d'appareils proposent des programmes civils et militaires de mise à niveau, permettant à un ancien appareil d'évoluer vers les mêmes standards que la dernière version en date. Un opérateur peut ainsi décider de mettre à niveau son appareil plutôt que d'acquérir un appareil neuf.

La présente recherche vise à effectuer un premier niveau d'évaluation de l'éco-efficience de la mise à niveau d'hélicoptères, en comparaison au remplacement par un appareil neuf, afin de déterminer la chaine de production la plus éco-efficiente. Elle se concentre particulièrement sur les processus de maintenance, d'assemblage, de mise à niveau et de gestion en fin de vie d'un hélicoptère, afin d'analyser le cycle de vie utile d'un appareil d'un point de vue opérationnel. La méthode s'appuie notamment sur le concept d'éco-efficience en tant que base comparative, ainsi que sur les principes liés à l'analyse de cycle de vie pour la mise en place des données d'inventaires et des bilans de performance. La construction de la méthode s'est effectuée en trois étapes, soit la collecte de l'information sur les appareils et les processus, l'agencement des différents processus selon des cycles représentatifs de la vie utile d'un appareil, ainsi que la génération de bilans économiques, techniques et environnementaux.

Le premier chapitre présente un état des connaissances présentant l'industrie de l'hélicoptère et ses particularités. Il aborde notamment les problématiques environnementales rencontrées lors de la fabrication et de l'exploitation d'hélicoptères, avant de présenter le principe de chaine logistique inverse et ses bénéfices industriels. Il présente finalement le concept d'éco-efficience, ainsi que ses différentes méthodes de mesures applicables. Le second chapitre présente tout d'abord la méthode mise en place pour l'évaluation de l'éco-efficience des processus rencontrés au cours de la vie utile de l'appareil. Il présente par la suite les détails de l'étude de cas employée pour aborder la problématique de recherche. Le troisième chapitre expose les résultats générés, reprenant en premier lieu les détails de la méthode construite, et, dans un second temps, les résultats de l'étude de cas. Enfin, le dernier chapitre aborde les implications en termes d'éco-efficience des résultats générés, et permet d'amorcer un retour sur la méthode et ses limites, ainsi que son potentiel d'application.

CHAPITRE 1

ÉTAT DES CONNAISSANCES

Ce premier chapitre présente l'état des connaissances utiles dans le cadre de l'étude et se divise en trois parties. La première partie introduit l'industrie de l'hélicoptère et ses spécificités. Une seconde partie introduit ensuite les concepts de chaines logistiques inverses et de mise à niveau d'un produit, ainsi que leur potentiel économique et environnemental. Finalement, une dernière partie présente le concept d'éco-efficience et les différents outils applicables permettant de l'évaluer.

1.1 L'industrie de l'hélicoptère

Cette première section offre tout d'abord un aperçu de l'industrie des aéronefs à voilure rotative et sa place au sein du secteur aéronautique. Elle aborde par la suite les particularités des modèles d'affaires de manufacture et d'exploitation d'hélicoptères. En dernier lieu, cette section présente les différentes problématiques environnementales rencontrées par l'industrie.

1.1.1 Appareil et marché

Un hélicoptère est un aéronef dont la sustentation est assurée via une voilure rotative, contrairement aux avions dont la portance est assurée via une voilure fixe. Un hélicoptère peut notamment entrer en vol stationnaire, ainsi qu'atterrir et décoller avec une vitesse horizontale nulle, lui offrant la possibilité d'évoluer au sein de zones impossibles d'accès avec un aéronef à voilure fixe, ou encore à des zones non équipées d'installations aéroportuaires (FAA, 2012). L'hélicoptère est souvent considéré informellement comme étant *« The pick-up truck of Aviation »,* en référence à ses capacités à s'adapter à de nombreux types de missions (Lloyds Asset Services, 2014). En 2012, les principaux constructeurs d'hélicoptères civils en termes de parts de marché étaient Airbus Helicopters

(32,1 %), Bell Helicopter Textron (28,8 %), Russian Helicopters (21,6 %), Agusta Westland (7 %) et MD Helicopters (5 %) (Frost & Sullivan, 2012).

En 2001, 29 700 unités militaires étaient en service mondialement, majoritairement en Amérique du Nord (33,5 %) et en Europe (21,1 %) (GAMA, 2014). La flotte mondiale d'hélicoptères civils en service en 2014 (moteurs à pistons et turbines confondus) était quant à elle estimée à 29 669 unités (GAMA, 2014). L'Amérique du Nord et l'Europe représentent les deux plus gros marchés, avec respectivement 46,1 % et 18,2 % des appareils civils en service en 2001 (Visiongrain, 2015). Les hélicoptères légers monomoteurs représentaient, en 2012, 58 % du total des hélicoptères civils en service (Frost & Sullivan, 2012). La plupart d'entre eux sont non pressurisés et évoluent majoritairement dans l'espace aérien inférieur, en dessous de 10 000 pieds ASL. Du côté de l'Amérique du Nord, les États-Unis faisaient état, en 2013, de 9 765 hélicoptères civils, dont 6 628 équipés de turbines (GAMA, 2014). Au Canada et en 2014, la flotte d'hélicoptères, tout type confondu, était estimée être composée de 2 871 unités immatriculées, sur un total de 36 375 aérodynes en 2014 (dont 32 045 avions). Celle-ci représentait ainsi environ 7,9 % du total des aérodynes en service au Canada. (GAMA, 2014).

À la fin de l'année 2015, la valeur globale annuelle de l'industrie de l'hélicoptère est estimée atteindre 7,4 milliards de dollars américains (Visiongrain, 2015). Une croissance globale de 3,08 % annuellement est par ailleurs attendue entre 2013 et 2023 (Strategic Defence Intelligence (SDI), 2013). Une mise en service globale de 11 650 appareils civils neufs devrait intervenir au cours des dix prochaines années, pour une valeur totale évaluée à 75 milliards de dollars américains (Ascend Flightglobal Consultancy, 2014). Les marchés nord-américains et européens semblent à présent saturés; ceux-ci ne devraient pas enregistrer un nombre aussi important d'appareils neufs, comparé aux marchés émergents tels l'Asie Pacifique, le Moyen-Orient ou l'Amérique du Sud (Visiongrain, 2015). La Chine, à elle seule, devrait immatriculer environ 2 000 hélicoptères à l'horizon 2023, conduisant à la formation d'au moins 6 300 pilotes.

Comme tout type d'aéronefs, les hélicoptères sont soumis à de nombreuses réglementations nationales et internationales, régissant leur exploitation et opération dans divers contextes. L'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI), dont le siège social est situé à Montréal (Québec), est une agence spécialisée de l'ONU responsable de l'élaboration des normes de standardisation du transport aérien international (OACI, 2004). Au niveau national, le Canada s'appuie sur la Réglementation de l'Aviation Civile (RAC), réunissant le règlement de l'air et les ordonnances de la navigation aérienne en une seule publication (Transport Canada, 2014).

1.1.2 Modèle d'affaires industriel, opération et cycle de vie

La chaine logistique de fabrication d'un hélicoptère est un système complexe, incluant de nombreuses étapes de production des différents composants, réparties entre le constructeur et plusieurs parties prenantes internationales (Source confidentielle). Les sous-systèmes sont produits au sein d'usines spécialisées du constructeur ou via des contrats avec de nombreux sous-traitants. La construction de l'appareil est ensuite finalisée dans un complexe d'assemblage spécialisé du constructeur. Contrairement à l'industrie des aéronefs à voilures fixes, qui réalise une part très importante de son chiffre d'affaires avec la vente d'aéronefs, les constructeurs d'hélicoptères tendent à générer une part plus importante de profits à travers la vente de composants destinés à la maintenance (Source confidentielle). Les constructeurs se sont ainsi orientés vers des modèles d'affaires permettant de maintenir en vol les appareils de leurs clients-opérateurs le plus longtemps possible.

Les opérateurs d'hélicoptères emploient les hélicoptères pour divers types de missions aéroportées dans de nombreux domaines, à la fois dans le secteur privé et le secteur public. En 2014, un sondage conduit par l'entreprise Honeywell en 2014 auprès de ses clients a permis d'estimer les types d'usage attendus de 275 nouveaux appareils entrants en service d'ici 2018 (Honeywell, 2014). Ceux-ci concernent notamment le transport privé ou commercial de personnes (31 %), le transport médical d'urgence aéroporté (19 %), l'usage par les forces de police (15 %), l'utilisation par l'industrie pétrolière en mer (9 %), la

couverture médiatique ou la télévision (1 %) et d'autres types d'utilisations générales (25 %) (Honeywell, 2014). Ils trouvent également leur place dans de nombreuses applications militaires, notamment le transport de troupes et de matériel, la reconnaissance et le soutien armé aérien (GAMA, 2014). Une enquête conduite par la FAA entre 1998 et 2013 auprès d'opérateurs américains d'hélicoptères civils fait état, pour les 15 années étudiées, d'une moyenne de 220 heures de vol annuelles pour les appareils équipés de moteurs à pistons et de 385 heures de vol annuelles pour les appareils équipés de turbines (GAMA, 2014). Cependant, il n'est pas rare selon les usages qu'un appareil à turbine accumule de grandes quantités d'heures de vol annuellement. Une étude du registre des vols d'un appareil en fin de vie faisait notamment état de 740 heures de vol durant sa dernière année d'exploitation, avec une moyenne annuelle de l'ordre de 630 heures de vol durant 37 ans de service continu (ENV-412, 2014). Certains usages spécifiques, tels que les applications pétrolières en mer, exigent qu'un hélicoptère soit exploité de manière plus intense que pour d'autres types d'applications. Dans ce dernier cas, celui-ci peut parfois accumuler entre 1 200 et 1 800 heures de vol annuellement (Lloyds Asset Services, 2014).

De manière à maintenir un appareil dans une condition de vol satisfaisant aux exigences techniques et réglementaires, et ainsi obtenir l'autorisation de voler, différentes opérations récurrentes de maintenance doivent être effectuées (Transport Canada, 2014; OACI, 2004). Celles-ci sont décrites dans les manuels de maintenance (MM) des constructeurs d'hélicoptères et des motoristes. Ces opérations incluent notamment des inspections et tests planifiés, ainsi que des remplacements anticipés de certains composants, sujets à l'usure ou à une durée de vie limitée. Ces composants sont remplacés progressivement dès lors que leur condition n'est plus jugée satisfaisante, ou après l'atteinte d'une certaine limite d'usage, déterminée par le constructeur. Les occurrences de maintenances (inspections, tests et remplacements) sont déterminées selon une planification spécifique, prenant en compte des facteurs temporels (jour, mois, années) et/ou opérationnels (nombre d'heures de vol, de

cycles moteurs ou de RIN[2]). Certaines opérations de maintenance non planifiées (maintenances spéciales) doivent être effectuées après que l'hélicoptère ait été opéré hors de ses limitations normales de vol, ou selon l'émission d'un bulletin spécial par le constructeur (modification particulière requise par le constructeur, garantissant l'exploitation sécuritaire de l'appareil selon les derniers standards en vigueur). Lorsque les besoins opérationnels de l'opérateur évoluent et que l'appareil nécessite une reconversion ou une modification pour continuer à les satisfaire, l'opérateur peut décider de reconvertir ou de moderniser sa configuration. Les reconversions d'habitacles (en anglais : *refurbishing*) ou les modernisations de certains systèmes (moteur, transmission, avionique, etc.) sont courantes au cours de la vie utile d'un appareil. Les nouvelles technologies peuvent notamment être intégrées au fur et à mesure de leur apparition sur des appareils plus anciens, via des procédés de *retrofitting* (compatibilité d'un matériel nouveau sur un design ancien).

Les coûts associés à l'acquisition d'un hélicoptère représentent un investissement important pour un opérateur, amorti sur plusieurs années (Source confidentielle). Les coûts d'opération et de maintenance sont également élevés, notamment en raison de la haute complexité de leurs systèmes. Pour cette raison, le modèle d'affaire de construction et d'opération d'hélicoptères est orienté vers la maximisation de leur vie utile, via la maintenance et la modernisation des systèmes de l'appareil au cours du temps. Les coûts d'exploitation sont, quant à eux, très variables, suivant le type d'appareil, de l'intensité de son utilisation en vol et de la fréquence de ses maintenances.

Contrairement à la plupart des véhicules, dont la valeur résiduelle suit souvent une courbe de dépréciation standard, un hélicoptère peut voir sa valeur totale augmenter au cours du temps, tel qu'illustré au tableau 1.1; celle-ci est en effet étroitement liée à la condition de ses composants, ainsi qu'à leur durée de vie restante. Elle n'est cependant pas nécessairement

---

[2] *Retirement Index Number* : Index de détermination de la durée de service d'un composant, définit par le constructeur. Cet index est basé sur la comptabilisation des occurrences d'évènements de changement de couple (en anglais : *torque events*). Chaque décollage ou opération d'hélitreuillage de charge externe (en anglais : *slingloads*) entraine l'accumulation de RIN. Dépendamment de la configuration de l'appareil et du composant considéré, un évènement de changement de couple peut faire s'accumuler un nombre variable de RIN.

Rapport-Gratuit.com

liée à l'âge de l'appareil. Pour cette raison, il est difficile d'estimer et de prévoir la valeur résiduelle d'un appareil. L'inflation joue également un rôle important dans l'estimation de la valeur résiduelle d'un appareil, étant donné leurs longues périodes d'utilisation (Helicopter Magazine, 2015). Conklin & de Decker a cependant estimé qu'une dépréciation moyenne de 5 % par an, durant les 10 premières années de service de l'hélicoptère, pouvait être valide dans de nombreux cas (Conklin & de Decker, 2015).

Tableau 1.1 : Exemple de rétention de la valeur d'un hélicoptère au cours du temps (adapté de David Crick, 2014, p. 24)

Modèle	Année de fabrication	Âge (années)	Prix d'origine (USD)	Prix de revente (2014 – USD)
Bell JetRanger III	1967	47	105 500 $	200 000 $
Bell 407	1996	18	1 275 000 $	1 515 000 $
Bell 212	1971	43	599 000 $	1 980 000 $
Bell 412	1981	33	1 750 000 $	2 105 000 $
Airbus Helicopter AS350B	1978	36	259 000 $	413 000 $
MD 500D	1976	38	201 000 $	585 000 $

1.1.3 Aviation, hélicoptères et environnement

À partir des années 1970, le secteur de l'aviation commerciale a connu un essor important, ayant conduit à la production et la mise en service d'un nombre important d'appareils, et, plus tard, à la prise de conscience progressive des effets sur l'environnement de ses activités. L'OACI estima en 2010 que le secteur aéronautique était responsable à hauteur de 12 % des émissions de CO_2 imputable aux transports, soit 2 % à 2,5 % de la part globale des émissions de CO_2 dans l'atmosphère (OACI, 2010). En 1999, un rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) conclut que 3,5 % du forçage radiatif anthropique était imputable au secteur de l'aéronautique, et que cette valeur devrait atteindre 5 % en 2050 (GIEC, 1999). En 2005, la part des émissions générales de gaz à effet de serre, imputables aux hélicoptères, représentait approximativement 0,03 % (Arnaud et Grison, 2013). Dans son rapport intitulé « *Aviation Environmental and Energy Policy Statement* », la

Federal Aviation Administration a identifié cinq objectifs principaux en termes de réduction des impacts environnementaux majeurs liés à l'exploitation d'appareils aériens, à savoir, la réduction du bruit, la réduction des émissions de gaz à effet de serre, l'augmentation de l'efficacité énergétique des carburants et biocarburants, la limitation des rejets d'eaux souillées, ainsi que la réduction de la pollution atmosphérique imputable aux activités aériennes (FAA, 2012).

Un appareil de transport aérien génère des impacts environnementaux tout au long de son cycle de vie, de sa production à sa gestion en fin de vie (Airbus, 2015). Cependant, peu d'informations environnementales spécifiques à l'échelle du cycle de vie des appareils existent au sein de l'industrie aéronautique, et, plus particulièrement, afférentes aux hélicoptères (CORINE, 2015). Cependant, une étude conduite par l'université de Stuttgart a déterminé que la phase d'utilisation d'un avion commercial serait responsable à hauteur de 92 % à 98 % des émissions totales de gaz à effet de serre, sur l'ensemble de son cycle de vie (Krieg et al., 2012). Selon la même étude, les différentes opérations de maintenance d'un appareil seraient quant à elles responsables à hauteur de 2 % de ces émissions. Une analyse de cycle de vie conduite en 2010 sur un Airbus A330-200 par l'Institut Supérieur Technique de Lisbonne, a également estimé que la phase d'utilisation compte pour plus de 99,9 % des impacts en termes d'émissions atmosphériques contributrices des changements climatiques. La même étude montre que l'assemblage d'un appareil et ses phases de maintenances compteraient respectivement pour $4{,}68\times10^{-6}$ % et $5{,}91\times10^{-2}$ % de ces mêmes émissions (de Oliveira Fernandes Lopes, 2010). En 2013, la consommation de Jet Fuel associée à l'exploitation d'hélicoptères à turbines aux États-Unis était de l'ordre de 148.6 millions de gallons américains. Par ailleurs, une consommation annuelle de l'ordre de 256.6 millions de gallons est attendue à l'horizon 2034 sur le territoire américain pour les hélicoptères à turbines (OACI, 2010). En termes d'émissions de gaz à effet de serre, cela représenterait un total de 1 449 milliards de tonnes de CO_2 équivalent. Le tableau 1.2 présente les sources d'impacts environnementaux qui ont été identifiées à travers le cycle de vie d'un hélicoptère (FAA, 2012; OACI, 2010, 2013; ENV-412, 2013; GARDN, 2012).

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Tableau 1.2 : Principales activités liées au cycle de vie d'un hélicoptère présentant des effets négatifs sur l'environnement
(inspiré de Bell Helicopter, GARDN Second Annual Conference, 2012, p.12).

Étape du cycle de vie	Activité et effets environnementaux
Manufacture d'un appareil	1. Utilisation de nouvelles ressources 2. Consommation d'énergies 3. Émission de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre 4. Générations de matières résiduelles solides 5. Génération de fluides résiduels 6. Utilisation de produits chimiques dangereux 7. Transport de composants
Phases de vol	8. Émission de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre 9. Génération de pollution acoustique
Opérations de maintenance	10. Consommation d'énergies 11. Émission de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre 12. Utilisation de produits chimiques dangereux 13. Génération de fluides résiduels 14. Génération de matières résiduelles dangereuses et non dangereuses
Fin de vie de l'appareil	15. Traitement des matières résiduelles dangereuses et non dangereuses 16. Traitement des fluides résiduels

Du point de vue de la fin de vie, des différences majeures existent entre les avions et les hélicoptères. Lorsque le nombre d'heures accumulées par un avion ne permet plus son opération rentable en affichant des coûts d'exploitation trop élevés, la compagnie propriétaire peut alors désirer s'en séparer (ADEME, 2006). Dans le cas où aucun acheteur ne peut être trouvé, l'avion entre souvent en fin de vie (AFRA, 2014). Un avion présente également un nombre limité de cycles de vol. Après un certain nombre d'heures de vol ou un âge avancé, le cumul des contraintes structurelles imposées à l'appareil peut compromettre son opération sécuritaire. L'avion peut alors rentrer en fin de vie pour des raisons techniques (ADEME, 2006; AFRA, 2014). Contrairement aux avions, les hélicoptères ne rentrent pas à proprement parler en fin de vie utile sans la présence d'une contrainte réglementaire ou sécuritaire particulière (ADEME, 2006). Un hélicoptère non pressurisé est moins sensible à la fatigue de ces matériaux qu'un avion pressurisé. Également, la modularité de leur design garantit une facilité de remplacement des composants usés ou fautifs. Ainsi, un hélicoptère aura une plus forte tendance à être exploité tant que sa condition et ses spécifications garantissent son exploitation sécuritaire et rentable. Pour ces raisons, il est difficile d'anticiper le moment où un hélicoptère entrera en fin de vie. Par conséquent, il serait également difficile d'estimer les

gisements potentiels d'hélicoptères résiduels. Cependant, un appareil peut être mis au rebu après un évènement pouvant compromettre son intégrité structurelle (et donc la sécurité en vol), par exemple un atterrissage forcé ou un écrasement. Également, certains contextes réglementaires peuvent forcer un type d'appareil à entrer en fin d'utilisation[3].

En 2006, l'ADEME estimait notamment que la France comptait 800 unités civiles et 400 unités militaires (ADEME, 2006). En se basant sur le fait que les remplacements d'hélicoptères comptaient alors pour environ 20 % du total des appareils produits durant l'année, elle estimait ainsi qu'entre 10 à 20 appareils sont mis hors service par année en France, soit une proportion théorique d'un appareil entrant en fin de vie pour cinq à dix nouveaux appareils vendus (ADEME, 2006). Selon la FAA, l'âge moyen d'un hélicoptère en service au sein de la flotte américaine en 2013 était de 22,3 ans pour les hélicoptères monoturbine (FAA, 2013).

À ce jour, aucun contexte réglementaire particulier n'existe ayant spécifiquement attrait à la fin de vie des hélicoptères (ADEME, 2006; ENV-412, 2015; AFRA 2014). Selon l'IATA, la spécificité de la dynamique d'exploitation des appareils et la faible proportion d'appareils entrant en fin de vie annuellement est à l'origine du manque d'informations spécifiques à la fin de vie des hélicoptères (IATA, 2015). Cependant, un intérêt grandissant des industriels et gouvernements envers la fin de vie des avions commerciaux a conduit à la mise en place de plusieurs sites de démantèlements, notamment aux États-Unis, en France et au Royaume-Uni (AFRA, 2013). Les entreprises de démantèlement sont, pour la plupart, accréditées par l'Aircraft Fleet Recycling Association (AFRA) de manière à conduire les travaux nécessaires à la gestion en fin de vie de ces appareils. À ce titre, l'AFRA fournit également un guide des bonnes pratiques à adopter (AFRA, 2013).

---

[3] Par exemple en 1996, la réglementation JAR-OPS 3 et les réglementations internationales fixées par l'OACI forcèrent une partie des appareils destinés à un service médical d'urgence à être bimoteurs, alors que la flotte était majoritairement constituée de monomoteurs (ADEME, 2006; OACI, 2010). Cette législation aurait ainsi entrainé certains de ces appareils monomoteurs à être vendus, reconvertis ou mis en fin de vie.

Selon Airbus, notamment à travers les résultats du projet PAMELA, 85 % des composants d'un avion peuvent être réutilisés ou recyclés, induisant une perte d'environ 15 % à l'enfouissement (Costes, projet PAMELA, 2008). Air Transat, qui a récemment démantelé deux Airbus A310 en partenariat avec l'entreprise Aerocycle, est arrivée à la même proportion (Air Transat, 2014). La figure 1.1 résume les types de composants et leur devenir après extraction de l'appareil en fin de vie, selon les résultats du projet PAMELA.

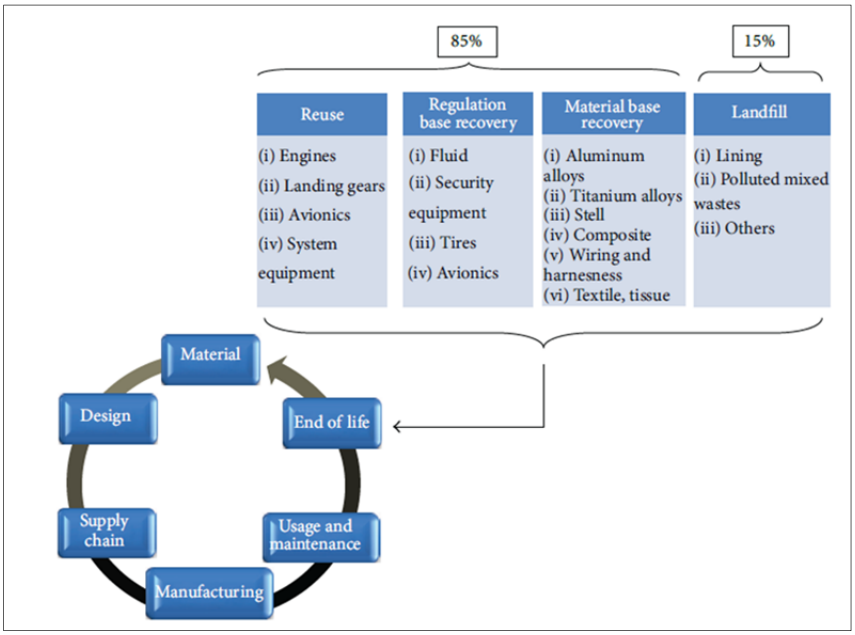


Figure 1.1 : Proportion résiduelle de matériaux et composants d'un avion en fin de vie et leurs types de revalorisation.
Tiré de Eylem Asmatulu et al. (2012, p. 3)

1.2 Les chaines logistiques inverses dans l'industrie

Les sections suivantes présentent les concepts industriels de remise à neuf et de mise à niveau d'un produit. Sont présentés, par la suite, différentes applications industrielles, ainsi que le potentiel technique, économique et environnemental de l'approche. Une dernière partie détaille leur applicabilité au sein de l'industrie d'aéronefs à voilure rotative.

1.2.1 Définition et applications industrielles

La remise à neuf (en anglais : *remanufacturing*) est le procédé selon lequel un produit usagé est restauré à un état fonctionnel proche de l'état neuf. Une définition fonctionnelle a été globalement adoptée en tant que "[…] *process of bringing a used product to a like-new condition through replacing and rebuilding component parts*" (Haynsworth et al., 1987). L'objectif de la remise à neuf est de réutiliser une certaine proportion de la valeur intégrée au produit lors de sa fabrication initiale, permettant d'éviter les coûts associés à la production de nouvelle valeur. Les caractéristiques du produit remis à neuf sont supposées similaires à celles d'un produit neuf, notamment afin de pouvoir y appliquer les mêmes garanties (Ljomah et al., 2004). Lorsque la remise à neuf intègre une volonté d'amélioration et de modernisation du nouveau produit, on parle alors de mise à niveau (en anglais : *upgrade*).

La remise à neuf est très répandue dans de nombreuses applications industrielles où elle constitue un modèle d'affaires rentable, notamment les machines-outils, les pneumatiques, les moteurs électriques et compresseurs, les imprimantes et photocopieurs, les équipements militaires, ainsi que les composants aéronautiques et automobiles. (Center for Remanufacturing & Reuse, 2009). Aux États-Unis, le marché de la remise à neuf représentait, en 2011, 480 000 employés, répartis dans 73 000 entreprises, pour un marché estimé à 50 milliards de dollars (Massachussetts Institut of Technology, 2011).

1.2.2 Potentiel technique, économique et environnemental

La remise à neuf est souvent considérée comme « l'ultime forme de recyclage », s'appuyant sur les principes d'écologie industrielle et de chaine logistique inverse fermée (The Remanufacturing Institute, 2013). Via la réutilisation d'une part importante d'un ancien produit, la remise à neuf permet de conserver une importante proportion de la valeur initiale d'un produit, notamment les coûts de main-d'œuvre, d'achat de matériaux et de consommations d'énergies qui ont été nécessaires lors de sa production initiale. Les composants réutilisés évitent ainsi la fin et vie, donc la génération de matières résiduelles et

la production de composants neufs (The Remanufacturing Institute, 2013; Ljomah et al., 2004; Kerr et Ryan, 2001; Center for Remanufacturing & Reuse, 2009; Adler et al., 2007).

La remise à neuf permet généralement d'offrir un produit aux capacités similaires à celles d'un produit neuf, à un coût moindre, plus rapidement, avec un effort minimum et en utilisant moins de ressources. L'entreprise est donc à même de livrer un produit identique à celui produit de manière classique, mais avec une plus grande éco-efficience des systèmes de production (The Remanufacturing Institute, 2013; Ljomah et al., 2004; Kerr et Ryan, 2001; Center for Remanufacturing & Reuse, 2009). Cette « production évitée » est, dans la grande majorité des cas, le facteur de réduction de l'impact général le plus important à l'échelle du cycle de vie du produit (Massachussetts Institut of Technology, 2011). À titre d'exemple, la figure 1.2 présente les résultats de l'étude conduite par Wendy Kerr et Chris Ryan sur la réduction des impacts environnementaux attribuables à la remise à neuf de photocopieurs de l'entreprise Xerox.

The savings achieved by remanufacturing Xerox 5100 photocopiers

	Xerox 5100 copiers (non-modular)		DC 265 copiers (modular)	
	% saving	Reduction by a factor of …	% saving	Reduction by a factor of …
Materials consumption (kg)	25	1.3	49	1.9
Energy consumption (MJ)	27	1.4	68	3.1
Water consumption (L)	19	1.2	38	1.6
Landfilled waste (kg)	35	1.5	47	1.9
CO_2 equivalents (kg)	23	1.3	65	2.9

Figure 1.2: Économies réalisées à travers la remise à neuf d'appareils d'impression Xerox (tiré de Kerr et Ryan, 2001).

L'étude montre ainsi que la remise à neuf présente des réductions de la consommation de ressources et de la génération d'extrants non désirés; celles-ci peuvent par ailleurs être réduites de l'ordre de 19 % à 68 %. Enfin, l'étude conclut sur le fait qu'un appareil conçu spécifiquement dans une optique de remise à neuf future, incluant des mesures d'écoconception, permettrait de réaliser des économies plus importantes qu'un produit non optimisé pour la déconstruction et la reconstruction. Cependant, cette approche peut avoir des limites à l'échelle du cycle de vie complet du produit. Grand nombre de produits consommant de l'énergie présentent un impact bien plus important lors de la phase

d'utilisation que durant les autres phases du cycle de vie (ex. : télévisions, aérodynes, etc.) (Massachussetts Institut of Technology, 2011). La performance environnementale lors de l'utilisation d'un produit remis à neuf peut, dans certains cas, être très légèrement inférieure à celle d'un produit neuf, générant ainsi un transfert de pollution de la phase de manufacture à la phase d'utilisation (Massachussetts Institut of Technology, 2011). Également, en remettant à neuf un produit sans effectuer de mise à niveau, il existe un risque de prolonger la durée de vie d'un produit technologiquement dépassé et donc, de maintenir sur le marché un produit présentant des performances inférieures à celles d'un produit neuf, équivalent et plus récent (Massachussetts Institut of Technology, 2011).

1.2.3 Remise à neuf et mise à niveau en aéronautique

La qualité et la valeur élevée des composants aéronautiques ont permis la mise en place d'une chaine de logistique inverse extrêmement développée, arrivée à maturation très rapidement (Center for Remanufacturing & Reuse, 2009). Les coûts élevés associés à la production des composants aéronautique, notamment les pièces de moteurs, de transmissions et d'avioniques, encouragent l'élaboration de programmes continus permettant la remise à neuf des composants les plus onéreux. Les opérateurs d'appareils procèdent notamment à des « révisions et réparations »[4] des composants, de manière à maximiser la durée de vie d'un composant et de réduire ainsi les coûts d'exploitation cumulatifs. Les standards de qualité élevés de ce genre d'opérations les rendent analogues à une remise à neuf complète d'un composant. Ces composants peuvent ensuite être réintégrés sur l'appareil, revendus ou utilisés sur d'autres appareils (AFRA/ASA, 2014).

Certains fabricants d'hélicoptères proposent des programmes de mise à niveau partielle ou complète d'un appareil. Ces programmes permettent la remise à neuf de certaines parties ou de l'ensemble de l'appareil, dans une optique de restauration et de modernisation de ses

---

[4] En anglais : *Overhaul and repair*.

systèmes. Bell Helicopter offre, par exemple, un programme[5] de mise à niveau complète de son modèle 206L LongRanger, un des modèles d'hélicoptères les plus vendus mondialement (Bell Helicopter, 2015; GAMA, 2014). L'ancien appareil de type 206L1 ou 206L3 devient au terme des modifications un 206L-1+ ou 206L-3+, répondant aux mêmes standards de performance que la dernière version du 206 LongRanger, le 206L4[6]. L'appareil est partiellement déconstruit et une certaine proportion de ses composants initiaux sont modifiés pour adaptation, ou remplacés par des versions plus récentes et plus performantes (le moteur Rolls-Royce Allison 250-C28 est remplacé par le Rolls-Royce Allison 250-C30P et la transmission et certaines parties du fuselage sont mises à niveau). Ces modifications permettent notamment l'augmentation de la charge utile de l'appareil et l'allongement des durées entre certaines occurrences de maintenances (TBO) (Bell Helicopter, 2015). Airbus Helicopters dispose également d'un programme de mise à niveau et de *retrofitting* de ses appareils EC135. Le programme augmente la charge utile de l'appareil de 40 kg supplémentaires, via la modernisation de certains composants (notamment le mat principal et la boite de transmission) (Airbus Helicopter, 2015). Ces procédés présentent de nombreux intérêts économiques, à la fois pour le constructeur et l'opérateur (CRIAQ, 2015; Sources confidentielles).

Du point de vue militaire, l'armée américaine est considérée comme l'institution effectuant le plus grand nombre de remises à neuf et de modernisations d'hélicoptères dans le monde. À titre d'exemple, un programme de mise à niveau destiné à moderniser 452 CH-47Fs et 61 MH-47Gs a notamment été mis en place par celle-ci (Flight International, 2008). Une autre proposition de mise à niveau de 111 Sikorsky CH-53E de l'US Marine Corps a été estimée à un coût global compris entre 22 et 26 millions de dollars US par appareil; le coût unitaire d'une mise à niveau représente, dans ce cas-ci, près la moitié du coût de fabrication d'un nouvel appareil. Au total, ces programmes engendrent une économie de 2,8 milliards de dollars US au total (Pera Knowledge, 2006). Au Royaume-Uni, la Royal Navy (RN) signa

---

[5] Bell Helicopter 206L LongRanger Upgrade Program.
[6] À l'exception de la capacité d'emport de carburant restée identique à la version précédente.

également en 2005 un contrat s'élevant à hauteur de 1,15 milliard de dollars américains pour la mise à niveau de 30 Merlin HM1 vers les standards du Merlin HM2. Selon Lockheed Martin, le total en termes d'économies s'élève ici à 770 millions de dollars américains et il est prévu une économie de plus de 115 millions de dollars américains en coûts de support sur le long terme (Defense Helicopter, 2010). Les programmes militaires de mise à niveau présentent ainsi des avantages économiques et opérationnels importants, permettant la modernisation d'un appareil ancien pour seulement une fraction du prix d'un appareil similaire neuf (Defense Helicopter, 2010; Flight International, 2008; Pera Knowledge, 2006).

À l'heure actuelle, aucune information particulière sur la performance environnementale de ces programmes n'a cependant été identifiée (CRIAQ, 2013). Le sous-chapitre suivant présente, à ce titre, les méthodes et outils employés dans cette étude pour mesure l'éco-efficience des processus de mise à niveau d'hélicoptères.

1.3 Mesure de la performance et outils applicables

Les sous-sections suivantes présentent en premier lieu le concept général d'éco-efficience, ainsi que son application dans une perspective industrielle. Une deuxième partie énonce les divers outils de mesures employés pour la caractérisation des deux indicateurs principaux de l'éco-efficience, à savoir la performance économique et la performance environnementale d'un produit ou d'un service.

Rapport-Gratuit.com

1.3.1 Concept d'éco-efficience

Le concept d'éco-efficience a été introduit par le Conseil Mondial des Entreprises pour le Développement Durable (WBCSD) à l'occasion du Sommet de la Terre de Rio de Janeiro en juin 1992, qui le définira plus tard comme suit :

> [L'éco-efficience est] la production de produits et services à des prix concurrentiels, qui satisfont les besoins humains et procurent une qualité de vie, tout en réduisant progressivement les conséquences écologiques et le recours à de nombreuses ressources pendant le cycle de vie, à un niveau équivalent au moins à celui de la capacité estimée de la planète. (REMAR, 2011, p.9; WBSCD, 1996, p.6).

Dans leur premier rapport intitulé « *Eco-efficient Leadership for Improved Economic and Environmental Performance»,* le WBCSD identifie sept éléments de l'éco-efficience :

1. Réduire l'intensité **matérielle** des biens et services;
2. Réduire l'intensité **énergétique** des biens et services;
3. Réduire la dispersion **toxique**;
4. Augmenter la **recyclabilité** des matériaux;
5. Maximiser l'utilisation durable de ressources **renouvelables**;
6. Étendre la **durabilité** des produits;
7. Augmenter **l'intensité de service** des biens et services. (WBCSD, 1996, p.6)[7]

L'éco-efficience a depuis été reconnue comme une des mesures de contribution au principe de développement durable, applicable d'une part à l'échelle d'une entreprise, et d'autre part à l'échelle de la société (WBCSD, 1996).

L'éco-efficience peut se formaliser de plusieurs façons, notamment si elle est mesurée à l'échelle du « produit » fabriqué ou des « processus » nécessaires à sa fabrication. Deux grands domaines principaux d'application de l'éco-efficience sont définis, notamment l'éco-efficience axée « produits et service » et l'éco-efficience orientée « organisation et société ». L'axe « produits et service » inclut notamment les principes de prévention de la pollution, d'écoconception et d'approche du cycle de vie, dans le cadre d'une production industrielle plus efficiente. L'axe « organisation et société » inclut, quant à lui, les principes d'écologie

[7] Traduction libre par l'auteur.

industrielle à l'échelle des sociétés. Pour des applications industrielles, l'éco-efficience peut généralement se définir comme étant le rapport entre la valeur d'un produit ou service et la somme des impacts environnementaux générés pour sa production ou son utilisation (REMAR, 2011, p. 10-11). L'atteinte de l'éco-efficience industrielle pour un produit donné peut donc être définie comme étant la fabrication à un coût le plus bas possible d'un produit répondant à tous les besoins fonctionnels du client, avec la quantité la plus faible possible de ressources utilisées et de pollution générée.

1.3.2 Mesure de la performance économique

Plusieurs méthodes orientées coûts du cycle de vie sont utilisées dans l'industrie aéronautique. Ces méthodes permettent l'aide à la décision dans une optique de planification budgétaire des opérations d'un appareil ou d'une flotte d'appareils. Elles permettent notamment de rapporter l'ensemble des frais afférent à l'utilisation d'un appareil particulier sur une période de temps donné à une unité fonctionnelle plus facilement mesurable, telle que le coût global rapporté à une heure de vol[8] (Conklin & de Decker, 2015).

Parmi les méthodes disponibles, la solution logicielle *Life Cycle Cost (LCC)* de Conklin & de Decker est une des solutions les plus utilisées par les opérateurs d'aéronefs (Conklin & de Decker, 2015). Le logiciel permet d'évaluer différentes stratégies d'opération et de gestion financière pour plus de 400 appareils aériens (dont les hélicoptères). Le logiciel est régulièrement mis à jour avec les informations les plus récentes sur les appareils et les paramètres économiques. La sélection des paramètres opérationnels est faite par l'utilisateur en fonction de sa stratégie; une fois l'ensemble des paramètres entrés, le logiciel génère une série de rapports, comprenant notamment un budget détaillé des opérations, un calcul des coûts de possession et d'exploitation sur le long terme, ainsi qu'une analyse de la valeur marchande de l'appareil après une durée d'exploitation donnée (Conklin & de Decker, 2015).

---

[8] Ce coût horaire regroupe souvent l'ensemble des frais d'approvisionnement, de carburant, de personnel et de maintenance, ainsi que d'autres frais annexes, tels que les coûts d'installations et les taxes d'aéroports.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

1.3.3 Mesure de la performance environnementale

La mesure de la performance environnementale au niveau industrielle peut se faire de nombreuses façons. Une approche reconnue consiste à employer une approche par cycle de vie d'un produit, dans une optique d'orienter son design et ses méthodes de production vers l'éco-efficience. Le principe d'écoconception, ainsi que l'approche par analyse de cycle de vie sont présentés ici.

L'approche d'écoconception

L'approche d'écoconception, également appelée *Design for Environment* (DfE), se focalise sur l'intégration de paramètres environnementaux aux phases de conception d'un produit, en vue de l'atteinte de son éco-efficience (Remar, 2011). L'approche fait également partie de la série des normes ISO 14000 et, plus particulièrement, de la norme « ISO 14062 : Management Environnemental – Intégration des aspects environnementaux dans la conception et le développement de produit ». Appliquée à l'industrie, cette démarche se veut notamment vouloir réduire les impacts sur l'environnement d'une entreprise, via l'instauration d'outils de mesure et de contrôle pour l'amélioration de la performance de ses activités. Elle cherche notamment la réduction de l'utilisation de matières premières et d'énergies, la diminution de la proportion résiduelle générée et la minimisation des coûts par l'optimisation des processus industriels (Remar, 2011).

Selon les travaux effectués par Berkeley (University of California), l'approche de *Design for Disassembly (DfD)* orientée fin de vie, serait la variante du concept de *Design for X* présentant le plus fort potentiel de réduction des impacts environnementaux et des coûts financiers à terme (Chien, 2011). L'application de ces principes en vue de l'obtention d'un produit optimisé pour le désassemblage peut notamment grandement réduire le coût total de possession d'un appareil. L'écoconception orientée démontage et fin de vie vise notamment la facilitation du démontage d'un produit, afin d'alléger la charge de travail requise dans le cadre de sa maintenance, de sa remise à neuf ou de son démantèlement.

L'analyse de cycle de vie (ACV)

L'analyse de cycle de vie (ACV) est une méthode d'évaluation des impacts sur l'environnement d'un produit selon une méthode dite d'approche « du berceau au tombeau ». Elle est notamment standardisée par les normes « ISO 14040 : Management environnemental – Analyse du Cycle de vie – Principes et cadres » et « ISO 14044 : Management environnemental – Analyse du Cycle de Vie – Exigences et ligne directrices ». Ces deux nouvelles normes combinent et remplacent les anciennes normes ISO 14041, 14042 et 14043, à présent obsolètes. Elle s'inspire du premier principe de thermodynamique, notamment en termes d'approche des flux entrants et sortants d'énergies et de matières afférents à un système donné. Elle se base également sur la considération du second principe de thermodynamique, énonçant que les extrants d'un système génèrent de l'entropie et qu'il est ainsi impossible d'obtenir un système sans extrant non désirable.

De manière simplifiée, l'ACV est constitué de quatre étapes principales (EPA, 2006) :

1. définition du système et de ses limites;
2. conduite d'un inventaire de cycle de vie (LCI *: Life Cycle Inventory*);
3. conduite d'une étude d'évaluation des impacts (LCIA *: Life Cycle Impact Assessment*);
4. analyse de l'information générée et interprétation.

Via la quantification de l'ensemble des flux d'un système et l'attribution de facteurs d'impacts environnementaux à ces mêmes flux, il est possible d'obtenir un bilan d'impacts cumulatifs du cycle de vie pour un produit donné. Ces impacts et leurs facteurs associés proviennent notamment de nombreuses bases de données industrielles et gouvernementales (EPA, 2006). L'interprétation des données se fait par la suite, via l'utilisation d'un critère de performance appelé « unité fonctionnelle », rapportant la mesure en question à une unité comparative de référence. La figure 1.3 présente une illustration générique de l'approche par bilan des flux, utilisée dans le cadre de la conduite d'un inventaire de cycle de vie (LCI).

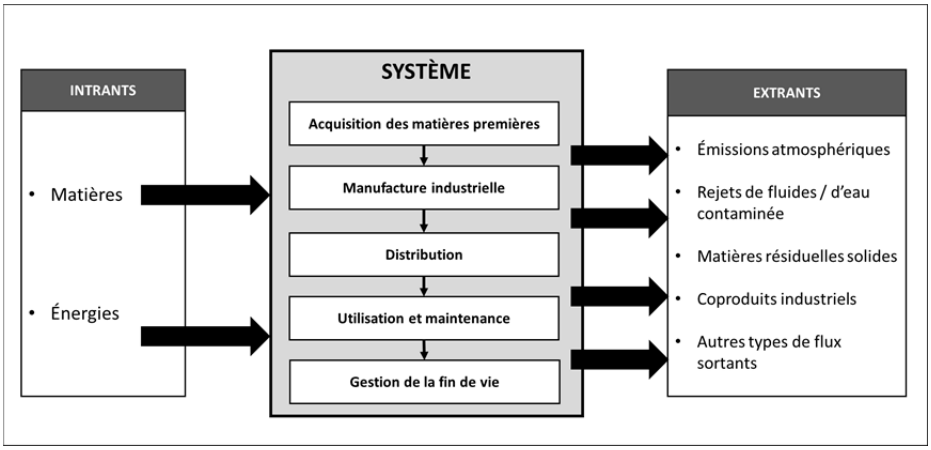


Figure 1.3: Approche par bilan de flux
(inspiré de EPA, 2006, p. 1).

L'ACV est reconnue comme une des méthodes normalisées les plus efficaces dans l'analyse des impacts environnementaux d'un produit à travers son cycle de vie. Cependant, celle-ci connait des limites importantes : elle intègre notamment une part de subjectivité dans la définition des limites du système et la sélection des impacts environnementaux. Également, elle est de par sa nature, très inflexible, et requiert une quantité importante de données de haute qualité. L'acquisition de ces données est souvent très coûteuse en temps et en ressources. La confidentialité et l'absence de données spécifiques peuvent également représenter une problématique importante dans la conduite d'une ACV.

Afin de pallier les contraintes et exigences de l'ACV, plusieurs méthodes s'inspirant de ses principes ont été développées, comme l'Analyse de Cycle de vie simplifiée (ACVS). L'ACVS est souvent décrite comme une analyse comportant les quatre éléments de base de l'ACV, c'est-à-dire la définition du but et des limites de l'étude, l'analyse des données d'inventaire, l'analyse des impacts et l'interprétation de l'analyse (Weitz et al., 1996). L'ACVS allège la quantité de travail nécessaire à l'ACV dans la mesure où une simplification peut être effectuée à différents niveaux, notamment en se limitant à l'étape d'inventaire de cycle de vie ou en utilisant moins de critères d'évaluation des impacts (Janin, 2000). L'ACVS n'est cependant pas considérée pouvoir se substituer à une ACV ordinaire complète. Elle peut toutefois être vue comme un compromis intéressant pour des applications spécifiques ou à des fins d'estimation de tendances (Remar, 2011).

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre détaille la méthodologie employée et se divise en trois parties. La première partie traite de l'approche utilisée pour la définition structurelle du système à l'étude et l'inclusion des différents processus qui le composent. Une seconde partie présente le cheminement suivi pour la construction des scénarios et le traitement de l'information générée. Enfin, la troisième et dernière partie aborde les détails relatifs à l'étude de cas, basée sur un procédé industriel de mise à niveau d'hélicoptères actuellement en opération.

2.1 Définition structurelle du système à l'étude

Cette première partie vise la définition du système étudié, notamment la mise en place de ses frontières spatiales et temporelles. Une première étape induit la caractérisation systémique des différentes entités fonctionnelles associées au système, ainsi que leur agencement dans le temps. Les sous-parties suivantes présentent le cadre systémique étudié, ses différents processus, ainsi que sa dynamique d'évolution.

2.1.1 Cadre fonctionnel

L'étude se base sur la considération d'hélicoptères civils légers monomoteurs non pressurisés durant leur cycle de vie utile, appelé pour les besoins de cette étude « cycle d'exploitation ». Un cycle d'exploitation commence dès lors que l'appareil est prêt à voler pour la première fois et se termine lors de son entrée en fin de vie. Il considère toute occurrence de maintenance (inspection, entretien, remplacement de composants, etc.) rencontrée par l'hélicoptère durant son exploitation, ainsi que l'inclusion d'une éventuelle mise à niveau que l'appareil pourrait subir ou de son éventuel remplacement par un appareil neuf. Ces occurrences de travaux sont appelées ici « processus ». Une représentation schématique

simplifiée d'un cycle d'exploitation et des différents processus considérés est présentée à la figure 2.1. Pour plus de détails, un bilan général des interactions entre les processus à l'échelle du cycle de vie de l'appareil est par ailleurs présenté en Annexe I.

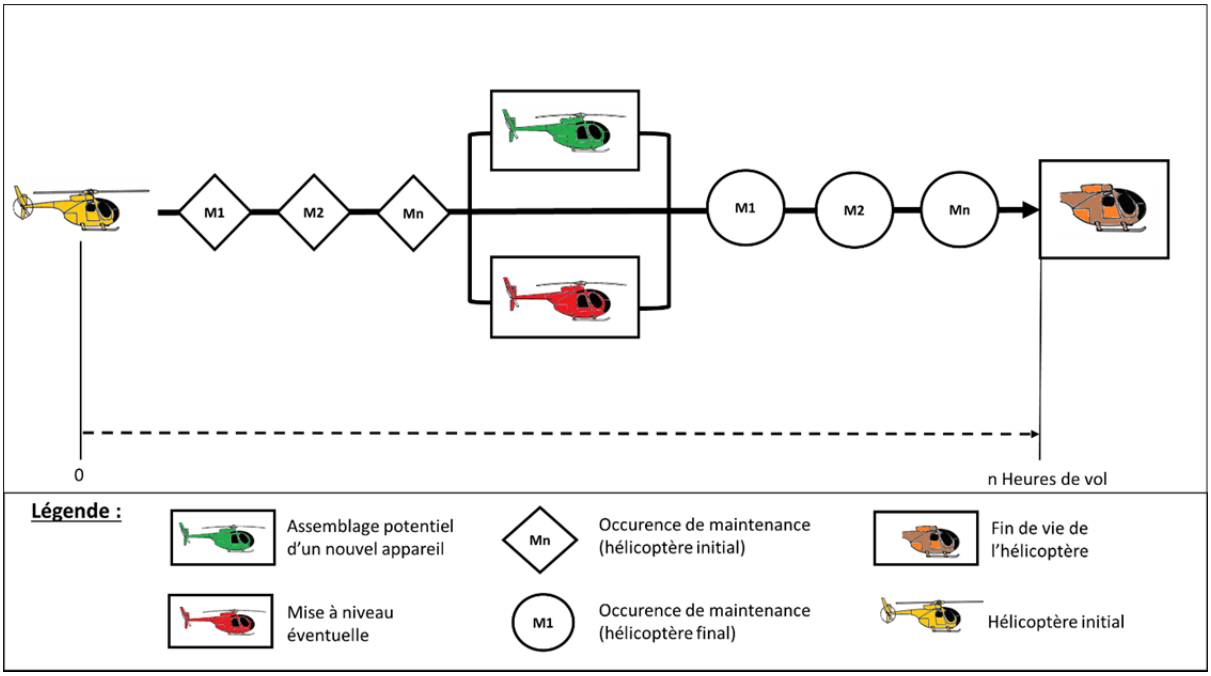


Figure 2.1 : Représentation du cycle d'exploitation

2.1.2 Découpage et définition des processus

Chaque processus est décomposé en plusieurs « opérations » (telles que le remplacement d'un composant ou l'inspection d'un sous-ensemble donné). Ces opérations sont elles-mêmes décomposées en plusieurs tâches. Ces tâches sont définies comme étant des actions uniques à accomplir selon une séquence spécifique, afin de compléter une opération donnée (par exemple : désassemblage de A, inspection de A, remontage de A). La figure 2.2 présente le découpage employé dans la construction de ces séquences.

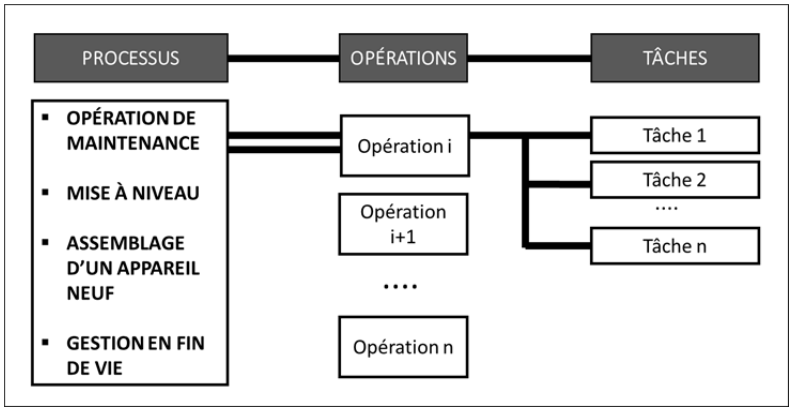


Figure 2.2 : Découpage des processus

Le processus d'assemblage d'un appareil considère l'ensemble des opérations nécessaires à l'obtention d'un appareil opérationnel neuf. Deux processus de maintenance sont considérés[9], à savoir les inspections préventives planifiées, ainsi que les remplacements anticipés de composants à durée de vie limitée (composants de turbine, transmission, fuselage, etc.). Ces deux processus sont considérés comme ayant leurs propres occurrences. Le processus de mise à niveau considère les deux phases de désassemblage et de réassemblage, conduisant à l'obtention d'un appareil final amélioré. Enfin, la phase de fin de vie considère les composants réutilisables, ainsi que les flux de matières et de composants résiduels.

2.1.3 Agencement des processus

Un cycle d'exploitation est construit selon l'agencement dans le temps de l'ensemble des occurrences de processus rencontrés par l'appareil, durant sa période d'exploitation par l'opérateur. Cet agencement est déterminé notamment par plusieurs paramètres d'ordre opérationnel, tel que présenté à la figure 2.3.

---

[9] Les maintenances spéciales et opérations extraordinaires, résultants d'un dommage ou d'une utilisation hors des limitations de l'appareil, ne sont pas considérées dans la méthode, notamment en raison de leur nature imprévisible.

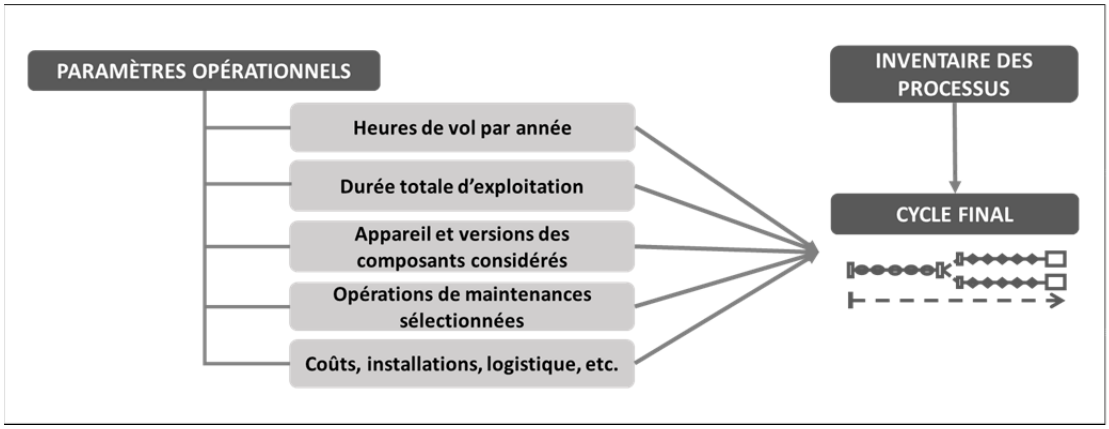


Figure 2.3: Paramètres opérationnels des cycles d'exploitation

L'unité de référence chronologique d'un cycle est la durée totale d'exploitation de l'appareil (en nombre d'années de service). L'intensité de l'utilisation annuelle d'un appareil (en heures de vol par année) est l'unité principale permettant de déterminer l'agencement des processus. Certains d'entre eux, notamment les inspections ou les remplacements anticipés de composants, sont de nature récurrente; ils interviennent à de multiples occurrences au cours d'un cycle d'exploitation. Ces occurrences sont déterminées par le constructeur à travers les manuels de maintenance (MM), selon trois types de variables appelées ici facteurs d'occurrences. Le facteur d'occurrence est l'intervalle de temps, de RIN ou d'heures de vol entre chaque occurrence j du processus i. L'instant où une occurrence de processus donnée sera effectuée au cours du cycle d'exploitation de l'appareil est déterminé par le critère rencontré en premier.

La méthode normalise les facteurs d'occurrence en nombre d'heures de vol écoulées depuis la dernière occurrence[10]. Les relations 2.1, 2.2 et 2.3 définissent cette normalisation.

[10] On considère que l'occurrence de processus en question est conduite le jour au cours duquel le premier critère est rencontré. La première occurrence d'un processus j, noté $HV_{occurence}$ (1,j) sera le nombre d'heures de vol écoulées depuis la mise à service de l'appareil à HV = 0.

$$HV_{RIN}\,(i) = \frac{RINprocessus\,(i)}{RINheure} \tag{2.1}$$

$$HV_{JOURS}\,(i) = \frac{HVannuelles \times Jprocessus\,(i)}{365} \tag{2.2}$$

$$HV_{HEURES}\,(i) = HVprocessus\,(i) \tag{2.3}$$

Avec :

HV_{RIN} (i) = facteur d'occurrence RIN de l'occurrence i en équivalent heures de vol;

HV_{JOURS} (i) = facteur d'occurrence jours de l'opération i en équivalent heures de vol;

HV_{HEURES} (i) = facteur d'occurrence heures de l'opération i (en heures de vol);

$RIN_{processus}$ (i) = facteur d'occurrence RIN;

RIN_{heure} = nombre moyen de RIN par heure de vol (déterminé selon le profil d'utilisation);

$HV_{annuelles}$ = profil d'utilisation de l'appareil (en heures de vol par année d'exploitation);

$J_{processus}$ (i) = facteur d'occurrence jours.

La relation 2.4 est ensuite utilisée pour la détermination du premier critère rencontré.

$$HV_{occurence}\,(i) = min\,(HV_{RIN}\,(i),\, HV_{processus}\,(i),\, HV_{jours}\,(i)) \tag{2.4}$$

Avec :

$HV_{occurence}$ (i) = facteur d'occurrence final pour l'opération i (en nombre d'heures de vol)

Enfin, la journée durant laquelle l'opération aura lieu est déterminée par la relation 2.5 :

$$J_{occurence}\,(i,j) = \frac{HVoccurence\,(i) \times 365}{HVannuelles} \times j\ ,\ \forall\, j \in N^{*} \tag{2.5}$$

Avec :

$J_{occurence}$ (i,j) = occurrence j de l'opération i, étant le nombre de jours depuis la mise en service initiale de l'appareil, en début de cycle d'exploitation;

j = occurrence *n* de l'opération i.

Rapport-Gratuit.com

2.2 Évaluation de l'éco-efficience

La méthode se base dans un premier temps sur la conduite d'un bilan général des interactions et flux engagés dans chacun des processus, permettant par la suite un premier niveau d'évaluation et de comparaison entre les processus du système. Dans un second temps, différents scénarios sont mis en place pour la construction des cycles d'exploitation désirés. Plusieurs indicateurs de suivi de performance sont ensuite utilisés, afin d'obtenir un second niveau d'évaluation pour chacun des scénarios considérés.

2.2.1 Performance des processus

Le découpage présenté à la section précédente permet d'isoler distinctement les différents processus intervenant au cours du cycle d'exploitation de l'appareil. Chacun de ces processus est divisé en séquences d'opérations, pour lesquelles un bilan individuel des flux environnementaux et économiques est effectué. Une fois l'ensemble des flux des opérations caractérisés, les données sont agrégées et un bilan des flux du processus est généré. Les flux identifiés sont ensuite regroupés au sein d'une base de données des différents processus. La démarche employée est analogue à la construction d'un Inventaire de Cycle de Vie (LCI).[11] Le bilan des intrants permet d'estimer les ressources nécessaires au processus. Le bilan des extrants permet, quant à lui, de caractériser d'une part les extrants à forte valeur ajoutée dits « produits » (composants ou appareils) et, d'autre part, les extrants résiduels dits « sous-produits », tels que les émissions dans l'atmosphère, les fluides et les matières résiduelles. Une représentation schématique des bilans effectués à l'échelle des processus est présentée à la figure 2.4.

---

[11] En suivant les principes énoncés dans les normes ISO 14044 et ISO 14062.

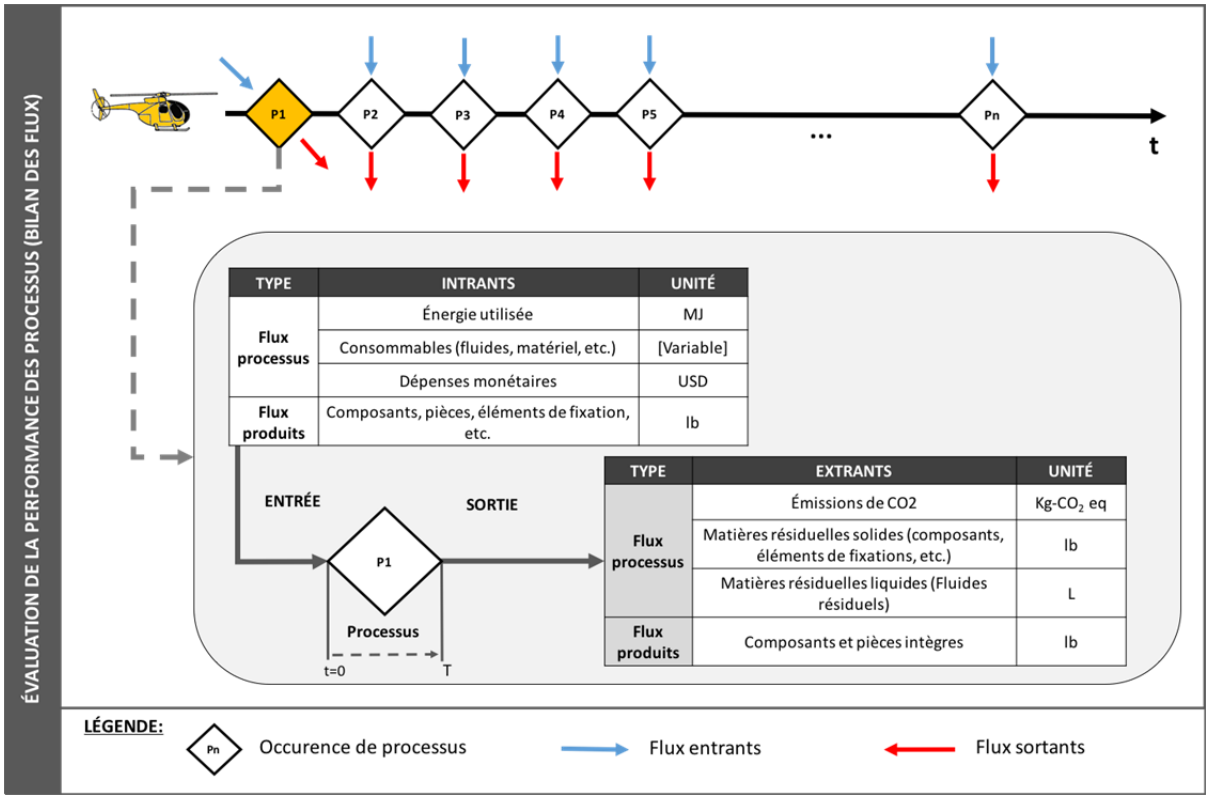


Figure 2.4: Flux considérés pour l'inventaire des processus

Les flux de composants comprennent les composants ou pièces à intégrer sur l'appareil, ainsi que leurs éléments de fixations. Les consommables comptabilisent les fluides et matériaux solides nécessaires à la poursuite d'une tâche donnée. Les dépenses monétaires comprennent l'ensemble des coûts afférents à un processus donné, tels que les coûts d'approvisionnement (composants et matériel), les coûts liés aux consommations d'énergies, ainsi que les coûts de main-d'œuvre. Les masses résiduelles comprennent les composants et éléments de fixations non réintégrés au terme d'un processus de maintenance ou de mise à niveau, et qui sont ainsi considérés comme résiduels. Les composants réutilisables, après un processus de maintenance ou après cannibalisation de l'appareil arrivé à sa fin de vie, sont considérés comme produits en sortie et non comme proportion résiduelle. D'autres paramètres d'ordre opérationnels sont également considérés pour les processus, tels que le nombre d'employés, la quantité d'heures travaillées et la durée totale nécessaire à la complétion des activités. Le tableau 2.1 reprend ces variables et leur définition.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Tableau 2.1: Variables et indicateurs employés pour les processus

	Variable	Définition		Unité de mesure
DURÉE	Durée tâche	$D_{i,j,g,h}$	Avec h tâche de l'opération g de l'occurrence j du processus i	min
	Durée opération	$Dop(i,j,g) = \sum_{h=1}^{Nt(g)} Di,j,g,h$	Avec Nt(g) le nombre de tâches de l'opération g de l'occurrence j du processus i	min
	Durée occurrence de processus	$Dp(i,j) = \sum_{j=1}^{Nt(j)} Dop\,(i,j,g)$	Avec Nt(j) le nombre d'opérations de l'occurrence j du processus i	h
EMPLOYÉS	Nombre d'employés	$Ne_{i,j,g,h}$	nombre d'employés travaillant sur la tâche h de l'opération g de l'occurrence j du processus i	employés
	Heures travaillées	$Ht_{i,j,g,h} = Ne_{i,j,g,h} \times D_{i,j,g,h}$	Durée totale travaillée sur la tâche h	h
COÛTS DU PROCESSUS	Coûts de main-d'œuvre (tâche)	$C_{emp} = Ht_{i,j,g,h} \times C_h(i)$	avec C_h le coût horaire d'un employé pour le processus i	USD
	Coûts de main-d'œuvre total (processus)	$Cm(i,j) = (\sum_{h=1}^{Nt(g)} Hti,j,g,h\,) \times Ch(P)$	Avec Nt(g) le nombre de tâches de l'opération g de l'occurrence j du processus i	USD
	Coût horaire d'un employé	$C_h(i)$	Avec i le processus considéré	USD/employé /heure
	Coût de matériel annexe	C_{mat} (i)	Avec i le processus considéré	USD
	Coût d'approvisionnement	$C_{app}(i)$	Coût d'approvisionnement du processus i	USD
	Coût total de l'énergie	$C_{en}(i,j) = E(i,j) \times CH_e$	Avec CH_e le coût par unité d'énergie consommée	USD
	Coût total processus	$C_{total}(i,j) = C_{app}(i,j) + C_{mat}(i,j) + C_{en}(i,j) + C_m(i,j)$		USD
ÉNERGIES, GHG	Émissions de gaz à effets de serre (Énergies)	$E_{GHG}(i) = E_n(i,j) \times F_E$	Avec E(i) l'énergie consommée durant l'occurrence i et F_E le facteur d'émission pour l'énergie considérée	$Kg.CO^2$ eq.
	Énergie consommée	$E_n(i,j) = D_p(i,j) \times Ce(i,j)$	Avec Ce(i,j) la consommation horaire pour l'occurrence j du processus i	kWh (électricité) ou m^3 (gaz naturel)
RÉSIDUS	Masse résiduelle générée	MR_{totale} (i,j)	MR_{totale} (i,j) étant la proportion de composants sortants destinés à l'enfouissement	lb
	Masse résiduelle recyclée	MR_{RECYC} (i,j)	MR_{RECYC} (i,j) étant la proportion de composants sortants considérés comme recyclables	lb
	Masse résiduelle revalorisée	MR_{REVAL} (i,j)	MR_{REVAL} (i,j) étant la proportion de composants sortants non envoyés à l'enfouissement ou au recyclage	lb

2.2.2 Performance des cycles d'exploitation

La performance d'un cycle d'exploitation est évaluée en effectuant le cumul des valeurs de la quantification des flux, et ce, pour l'ensemble des occurrences de processus le constituant. Cinq indicateurs principaux sont utilisés pour la caractériser, tel qu'illustré à la figure 2.5.

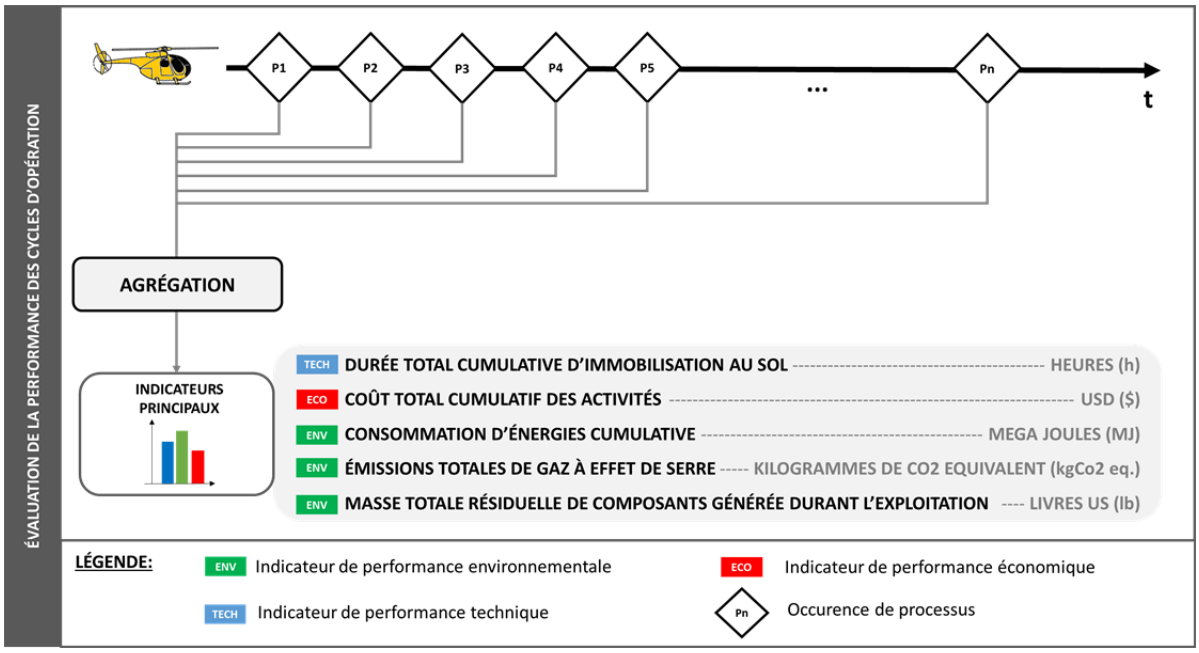


Figure 2.5 : Évaluation de la performance des cycles d'exploitations

Ce cumul (agrégation) est déterminé par la relation 2.6.

$$V_{agr}(P) = \sum_{j=1}^{Nj} V_{ind}(P)_{i,j}, \forall\, j \in \mathrm{N}^* \tag{2.6}$$

Avec :
V_{agr} (P) = valeur agrégée de l'indicateur de flux P à l'échelle d'un cycle;
V_{ind} $(P)_{i,j}$ = valeur de l'indicateur de flux P pour la récurrence j du processus i.

2.3 Étude de cas : mise à niveau d'un hélicoptère

L'étude de cas est basée sur un modèle d'affaires industriel de mise à niveau d'un hélicoptère commercial léger monomoteur existant, actuellement en opération chez plusieurs opérateurs à travers le monde. Elle vise la caractérisation de l'éco-efficience de cycles d'exploitation au cours desquels un besoin en performances supplémentaires pour l'appareil est exprimé par son opérateur à un instant *t* de sa vie utile. Ce besoin peut être comblé de deux manières : soit via la mise à niveau de l'appareil initial A vers les mêmes standards améliorés d'un appareil B plus récent[12], soit via le remplacement de l'appareil initial A avec un appareil B neuf. Les scénarios d'étude considérés et les paramètres employés sont détaillés aux sections suivantes.

2.3.1 Scénarios considérés

L'étude de cas considère deux niveaux d'évaluation. Chaque niveau comprend ses propres scénarios d'évaluation et son unité fonctionnelle. Ceux-ci sont présentés à la figure 2.6.

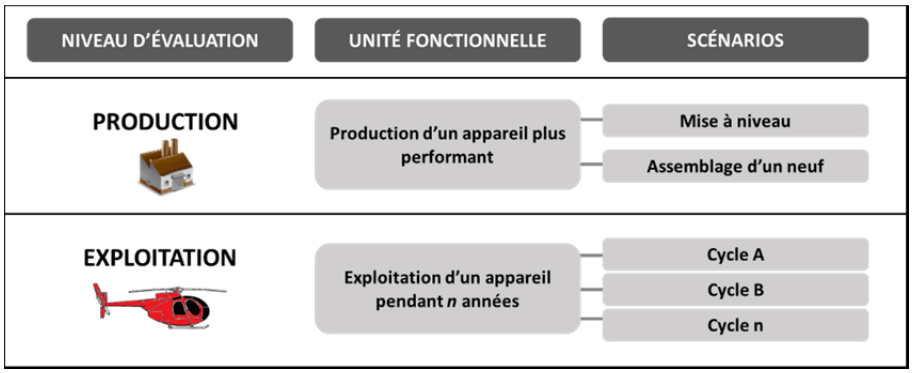


Figure 2.6: Unités fonctionnelles employées pour l'évaluation

Le premier niveau est l'évaluation des deux processus de mise à niveau et d'assemblage, afin de déterminer l'alternative la plus éco-efficiente pour un opérateur désirant acquérir un

[12] Certaines différences mineures existent entre l'hélicoptère mis à niveau et l'hélicoptère neuf, mais aucune n'a d'influence sur les données de l'étude.

nouvel appareil. Lorsqu'un remplacement est considéré, deux cas de figure sont étudiés : l'ancien appareil pouvant alors être vendu ou considéré comme entrant en fin de vie.

Dans le cadre du second niveau d'évaluation, l'étude considère plusieurs cycles d'exploitation incluant une mise à niveau ou un remplacement, de manière à étudier les changements au long terme sur l'éco-efficience générale des cycles considérés. Ceux-ci sont construits à partir de trois types d'usages, basés sur une moyenne d'heures de vol annuelles effectuées par un appareil, durant une période de service de 40 ans. Ces usages ont été identifiés via l'étude de la littérature et de carnets de vols (*Flight Logs*) d'appareils[13]. Ils ont été définis à 300 h/an, 600 h/an et 1 200 h/an[14]. Les cycles d'exploitation des appareils A et B ne subissant aucune modification sont utilisés comme cycles de référence. Les cycles comparatifs avec modification impliquent une mise à niveau ou un remplacement après 10, 20 ou 30 ans d'exploitation, tels que présentés à la figure 2.7.

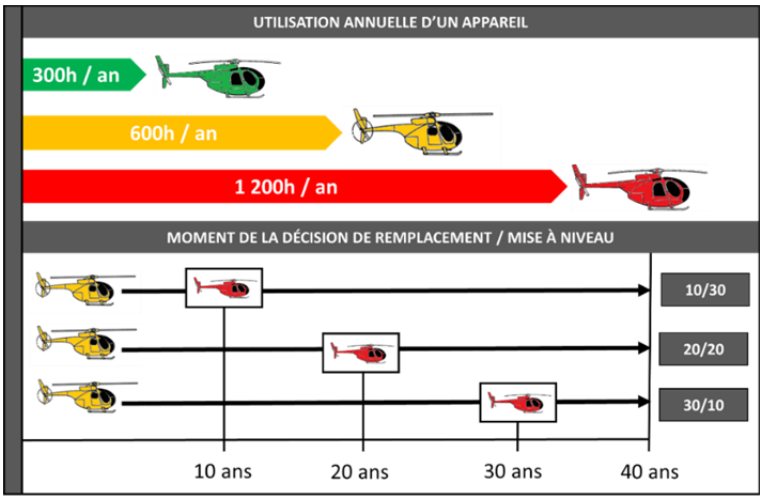


Figure 2.7: Illustration des deux niveaux de considérations pour les scénarios étudiés

[13] À titre d'exemple, l'appareil du projet ENV-412 a enregistré 23 234 heures de vol sur une période de 37 ans, faisant état d'une moyenne annuelle de 628 heures de vol par an, pour un usage polyvalent.

[14] Représentatifs de plusieurs usages industriels, respectivement le transport privé, l'évacuation médicale aéroportée et les applications dans l'extraction pétrolière.

En raison de la disponibilité limitée de certaines informations et des contraintes temporelles associées à la conduite du présent projet, certains postulats initiaux ont dû être effectués dans le cadre de la conduite de l'étude de cas, présentés ci-après :

- l'appareil initial A est la propriété de l'opérateur; celui-ci nécessite l'acquisition d'un appareil B[15], quel que soit le moyen de production;
- l'appareil est considéré comme étant en configuration standard (à vide);
- l'appareil est considéré comme étant équipé des derniers composants en date (derniers numéros de série compatibles pour un composant donné);
- la dépréciation de la valeur économique de l'appareil et l'augmentation du coût des maintenances, attribuables au vieillissement de l'appareil ne sont pas pris en compte dans l'évaluation des paramètres économiques;
- l'étude de cas considère que les travaux à effectuer pour l'ensemble des occurrences de processus sont conduits sur le territoire Québécois[16].

2.3.2 Acquisition des données accessibles

La conduite de l'étude de cas a exigé la mise en place d'un processus de collecte d'informations spécifiques aux appareils et processus considérés. Les différentes sources d'acquisition des données sont présentées à la figure 2.8.

---

[15] L'étude de cas formule le postulat selon lequel l'opérateur présente le besoin d'acquérir un nouvel appareil ayant les performances de l'appareil B. L'étude est donc orientée vers la détermination de la meilleure alternative pour l'opérateur dans le cadre de l'acquisition de l'appareil B. L'étude n'a pas vocation à comparer l'intérêt de la mise à niveau par rapport à la conservation de l'appareil initial.

[16] Cette considération permet l'attribution de paramètres économiques et environnementaux dépendant d'une localisation géographique (ex : facteurs d'émissions, coûts de main d'œuvre, etc.).

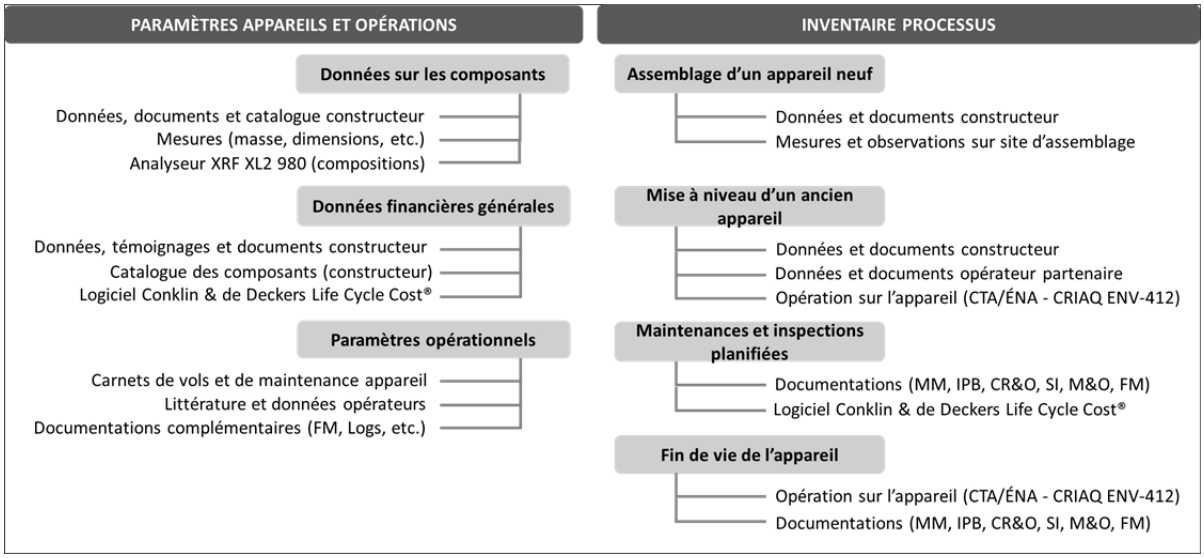


Figure 2.8: Provenance des données de l'étude de cas

Les données des processus d'assemblage, de maintenance et de mise à niveau proviennent de l'étude de la documentation du constructeur, d'observations sur site, ainsi que d'estimations provenant d'un opérateur partenaire. Les données sur les composants et la gestion en fin de vie de l'appareil proviennent de mesures effectuées sur un appareil mis à la disposition du projet CRIAQ ENV-412, via le démontage, la caractérisation et le remontage des composants sélectionnés. La caractérisation des matériaux a été effectuée selon la documentation du constructeur et via l'usage d'un appareil de mesure par spectrométrie de fluorescence X[17]. Les données des coûts d'exploitation et des composants, ainsi que la valeur résiduelle des composants et appareils, ont été obtenues via le catalogue des composants du constructeur, et à partir de valeurs générées à l'aide de la solution logicielle Conklin & de Decker® Life Cycle Cost (LCC). Enfin, les paramètres d'exploitation ont été déterminés via l'étude de la littérature, des carnets de vols et des carnets de maintenance d'appareils.

[17] L'appareil employé est le XL2 980 de Thermo Fischer Scientific (anciennement Niton). Une photo de l'appareil est présentée en Annexe III.

CHAPITRE 3

RÉSULTATS ET ANALYSE

Ce chapitre présente les résultats de l'étude. La première section présente le bilan de la méthode développée. Elle résume notamment les principes employés pour l'étude des processus et des cycles d'exploitation, ainsi que la méthode d'évaluation de leur performance. La seconde partie reprend quant à elle les résultats afférents à l'étude de cas, notamment les bilans de flux des processus et l'évaluation de la performance des divers scénarios étudiés.

3.1 Méthode développée

Ce premier sous-chapitre détaille la méthode finale mise en place. Celle-ci se base sur la comparaison de cycles d'exploitation construits à partir de l'agencement des processus rencontrés par un hélicoptère au cours de sa vie utile. Trois entités fonctionnelles principales sont au cœur de son application, à savoir :

1. la création et la gestion des bases de données (appareils et processus);
2. la sélection des paramètres opérationnels (type et intensité d'exploitation) et l'assemblage des cycles;
3. le traitement de l'information (calcul des variables et générations des rapports de performance).

La figure 3.1 présente un découpage fonctionnel simplifié de la méthode dans son ensemble[18].

---

[18] Dans le cadre de ce projet de maîtrise, et plus particulièrement pour la conduite de l'étude de cas, un modèle numérique a été développé. Sa structure est présentée en annexe VIII.

Rapport-Gratuit.com

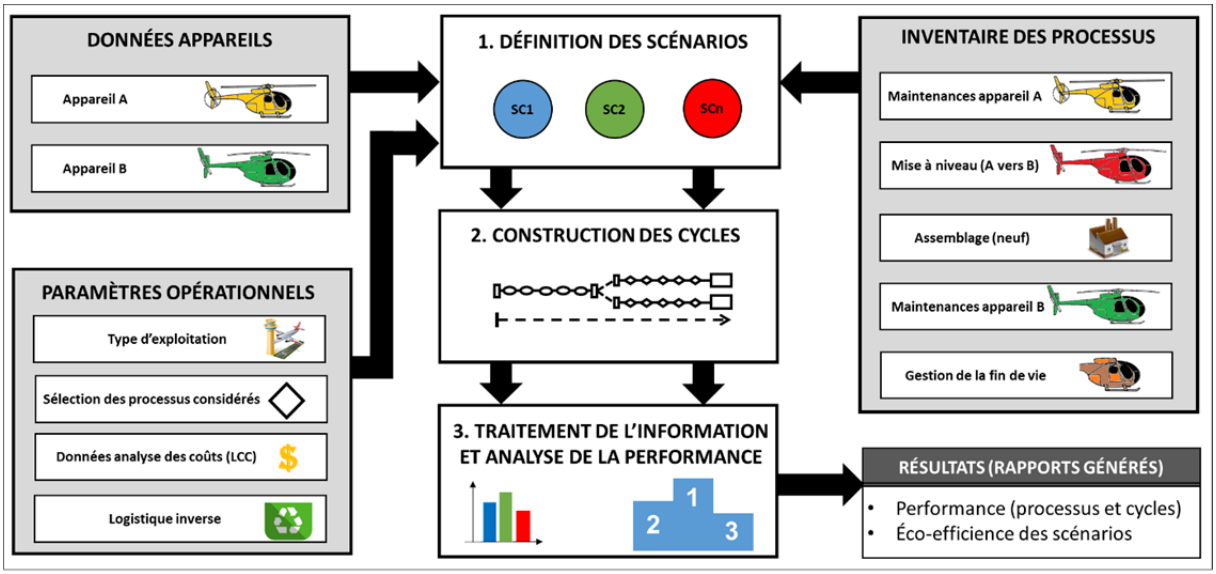


Figure 3.1: Découpage fonctionnel de la méthode

Les parties suivantes reprennent les détails de la construction de la méthode. La première sous-partie offre un bilan de la caractérisation des entités fonctionnelles du système, notamment ses processus. La seconde partie présente quant à elle le bilan de l'évaluation de la performance.

3.1.1 Bilan des données des appareils et des processus

Les données d'inventaire sont d'une part, les données afférentes aux appareils et, d'autre part, les données des processus rencontrés au cours de son exploitation. Les données d'appareils concernent notamment les caractéristiques opérationnelles (masse en configuration à vide, capacité d'emport, etc.) et financières des hélicoptères considérés (coûts d'achat à neuf et valeurs résiduelles). Elles incluent également les renseignements sur la nature des composants et fixations (types, matériaux, dimensions, masses, valeurs monétaires, quantités d'un même composant sur l'appareil, et limite de durée de vie le cas échéant).

Via l'emploi des données d'inventaires, la méthode effectue un découpage des différents processus en séquences d'opérations. Ces opérations sont elles-mêmes caractérisées en séquences de tâches ordonnées, identifiées par un numéro unique, accompagnées par leur description et leur type (ajout d'un composant, inspection d'un sous-ensemble, etc.). Lorsqu'une opération principale, telle que le retrait d'un composant C_1, doit être effectuée, la séquence des tâches nécessaires à accomplir inclura toute autre tâche secondaire, telle que le démontage d'un sous-ensemble C_2 pour garantir l'accès à C_1.

Dépendamment du type d'opération effectuée sur un composant donné, les tâches de nature destructives peuvent compromettre l'intégrité structurelle ou fonctionnelle du composant, de ses éléments de fixations (par exemple le retrait de rivets d'un élément de fuselage) ou d'autres composants nécessitant des travaux pour des raisons d'accès. Ceci est déterminé par plusieurs critères liés au composant, notamment sa capacité à être extrait sans être compromis, mais aussi, sa capacité à être extrait sans d'autres composants. Tout composant présentant un état d'usure avancé ou une condition pouvant potentiellement compromettre son intégrité physique ou fonctionnelle est considéré comme retiré de l'appareil. Dans l'éventualité où une réparation ne pourrait être effectuée sur celui-ci, il sera détruit afin d'éviter la réutilisation. La méthode prend en compte trois voies de logistique inverse : la réutilisation en tant que pièce détachée (incluant les pièces nécessitant une réparation éventuelle), le recyclage et la mise au rebut des composants résiduels non revalorisés.

La figure 3.2 reprend les différentes considérations liées au découpage et au séquençage des opérations des processus considérés, ainsi que les considérations de logistique inverse.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

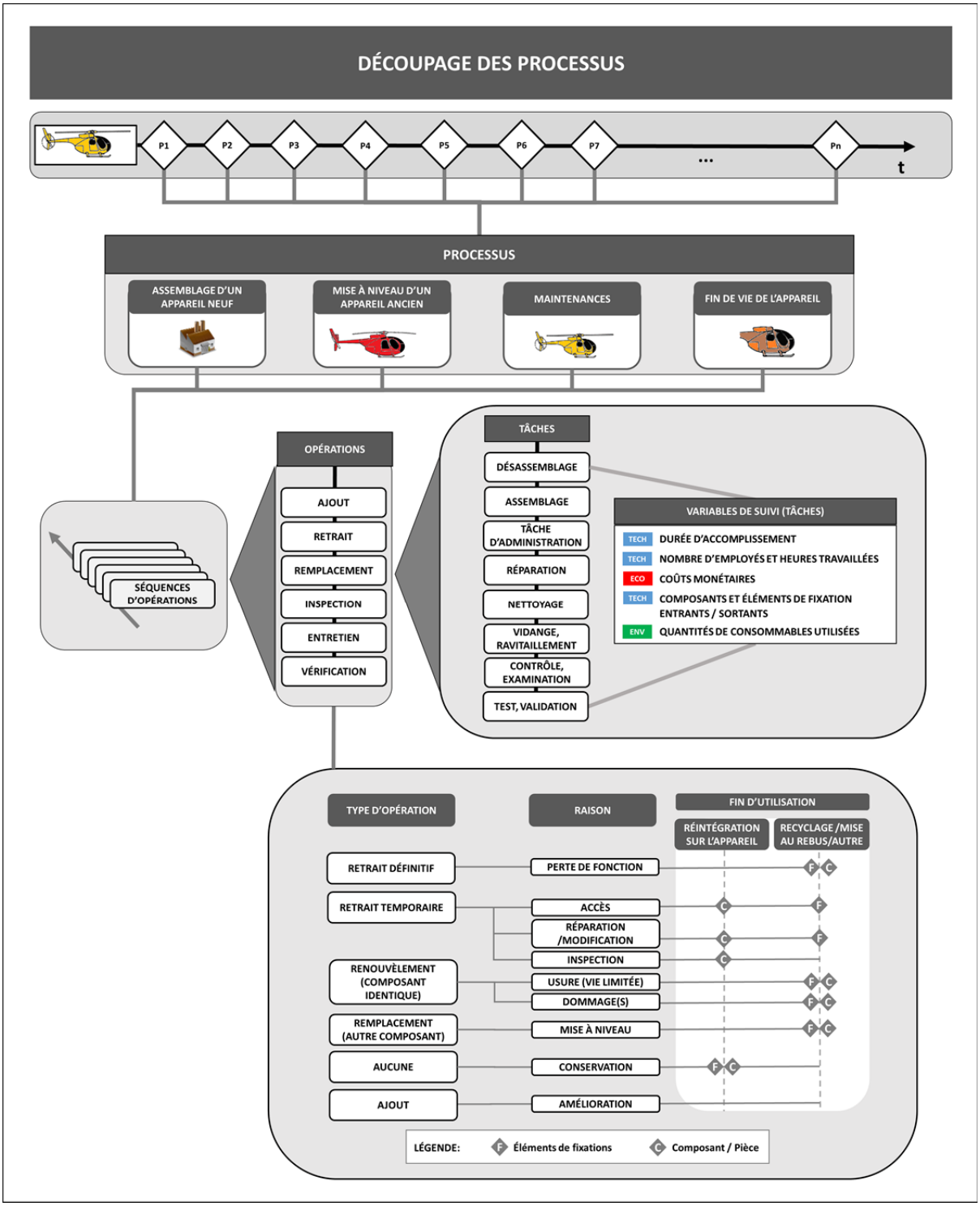


Figure 3.2: Bilan du découpage des processus

3.1.2 Bilan de la méthode d'évaluation

Les types de flux de chaque opération des processus considérés sont quantifiés conformément à la méthodologie présentée au chapitre précédent. Dès lors que les bases de données des processus sont complétées, les paramètres spécifiques aux processus se voient attribuer les valeurs reflétant le cadre de l'évaluation (coût horaire de main-d'œuvre, facteur d'émission de gaz à effet de serre pour l'énergie locale, etc.). Un bilan des opérations est par la suite obtenu, sous forme d'un rapport de performance des processus, permettant ainsi d'évaluer sa performance selon les indicateurs considérés. Ces bilans permettent notamment d'isoler les opérations les plus coûteuses, les plus longues, ou encore celles présentant le plus fort impact sur la performance environnementale. Les coûts sont quant à eux séparés en fonction de leur origine. Les composants résiduels sont catégorisés par type de matériaux, afin d'estimer le gisement résiduel du processus, en fonction du devenir du composant[19]. Un pourcentage de la masse des matières résiduelles générées qui seront recyclées, appelé taux de recyclabilité, est obtenu par la suite. Avec ces bilans intermédiaires, un opérateur ou un constructeur peut ainsi obtenir un aperçu des « points sensibles majeurs » sur lesquels intervenir, dans le cadre notamment de l'optimisation de l'éco-efficience des opérations ou des designs d'appareils.

La construction des cycles d'exploitation est effectuée par la méthode via l'intégration conjointe des données d'appareils, des données des processus, ainsi que des paramètres opérationnels sélectionnés. L'agrégation des performances des différents processus est ensuite effectuée. La comparaison entre cycles se base sur cinq indicateurs principaux. L'obtention des bilans finaux vient ainsi compléter les bilans intermédiaires des processus. La figure 3.3 offre un bilan illustré de la méthode d'évaluation.

---

[19] La voie de traitement en fin de vie d'un composant a été estimée par l'auteur, en s'appuyant notamment sur les résultats générés dans le cadre du projet PAMELA d'Airbus (Eylem Asmatulu et al., 2012) et d'autres observations et résultats du projet ENV-412.

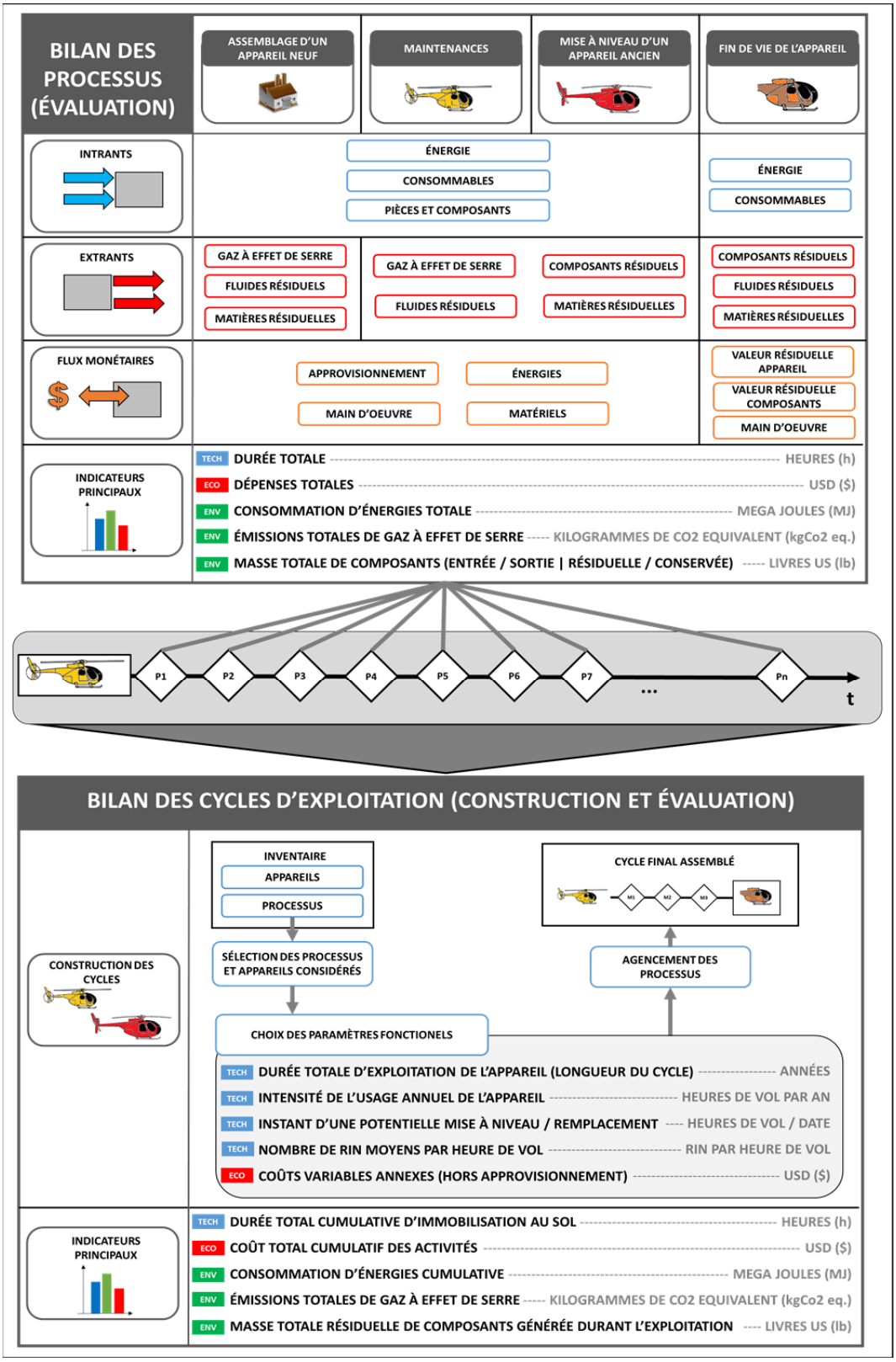


Figure 3.3: Bilan de la méthode développée

3.2 Résultats de l'étude de cas

Les sous-parties suivantes reprennent les résultats de l'étude de cas pour les deux niveaux d'évaluation considérés. La figure 3.4 illustre de manière générique ces deux niveaux.

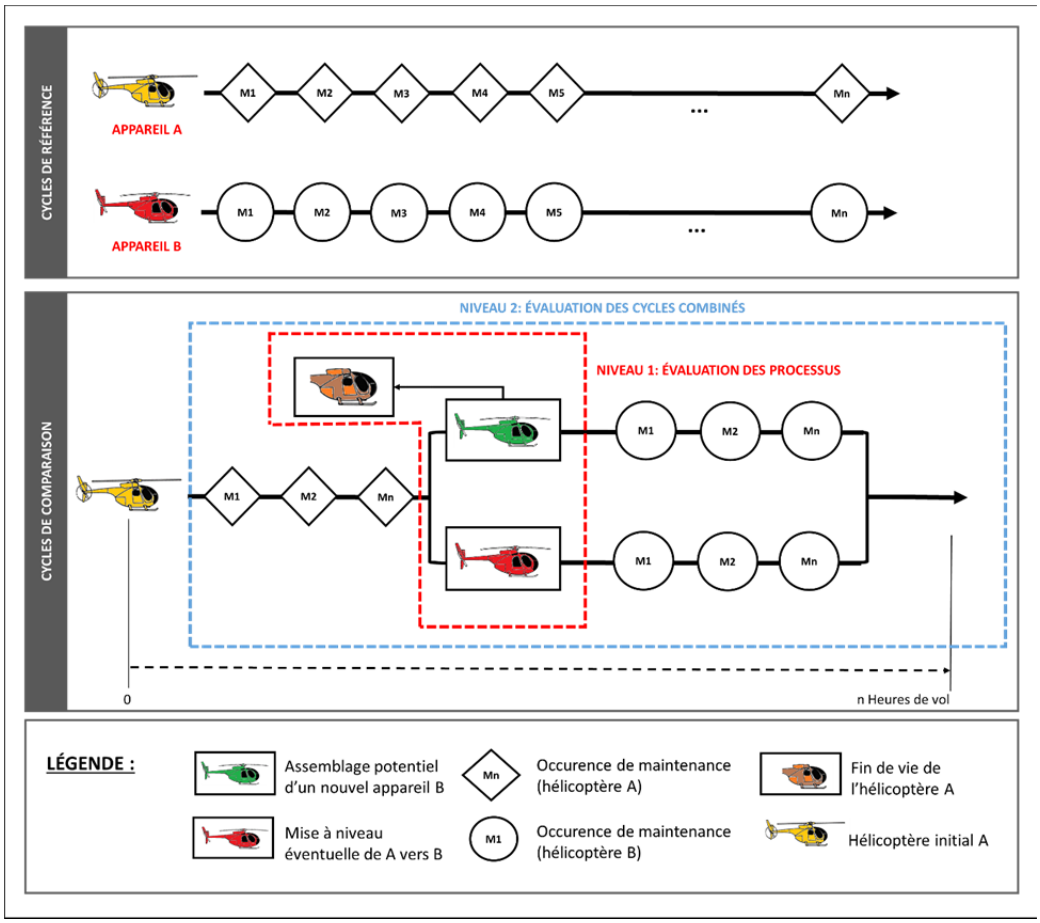


Figure 3.4: Illustration des deux niveaux de considération de l'étude de cas

Les sous-parties suivantes présentent, dans un premier temps, les différentes valeurs spécifiques à l'étude de cas, assignés aux paramètres opérationnels. La sous-partie qui suit expose les données récoltées dans le cadre de l'analyse des données d'appareils et des processus. Finalement, les résultats des deux niveaux d'évaluations sont présentés.

3.2.1 Paramètres spécifiques

L'étude de cas considère les variables employées par la méthode qui ont été présentées au tableau 2.1. Certaines de ces valeurs sont dépendantes de facteurs externes au système, tel que les coûts de main-d'œuvre ou les tarifs de la consommation énergétique. Celles-ci sont appelées paramètres en raison de leur caractère propre à un contexte géographique ou économique donné. Dans le cadre de l'étude de cas, ces paramètres se sont vu attribuer une certaine valeur, estimée à partir de sources différentes. Ces valeurs et leur provenance sont présentées au tableau 3.1.

Tableau 3.1: Paramètres spécifiques à l'étude de cas

PARAMÈTRES DES PROCESSUS				
Paramètre		**Valeur utilisée**	**Unité**	**Source**
Coûts de main-d'œuvre horaire		35,00	USD / heure / employé(e)	Estimé par l'auteur
Consommation horaire d'énergie [20] - E_n	Électricité	25,00	kWh / h	[1]
	Gaz naturel	2,60	m^3 / h	[1]
Facteur d'émission – E_{GHG}	Électricité	0,01	kg-CO_2 eq / kWh	Hydro-Québec (2012)
	Gaz naturel	1,92	Kg-CO_2 eq / m^3	EPA (2009)
Coût de l'énergie – C_{en}	Électricité	0,03	USD / kWh	Hydro-Québec (2012)
	Gaz naturel	0,11	USD / m^3	Gaz Métro (2015)
Facteur de conversion CAD-USD		1 USD = 0,83 CAD		Google Finance, Juin 2015
Coût matériel annexe - C_{mat}	Assemblage	50 000	USD	Estimé par l'auteur
	Mise à niveau[21]	20 000	USD	Estimé par l'auteur
Utilisation de consommables[22]		[Variable]	[Variable]	Estimé (employés du constructeur et auteur)

[20] Les consommations horaires ont étés considérées comme étant similaires pour les installations d'assemblage, de maintenance et de mise à niveau (l'outillage nécessaire ayant été jugé similaire après étude sur site).
[21] Inclus dans le coût d'approvisionnement C_{app} (mise à niveau).
[22] Les quantités de consommables ont été estimées par des employé(e)s du constructeur des appareils pour les processus d'assemblage et de mise à niveau. Pour les processus de maintenance, les types de consommables employés et les quantités approximatives ont été obtenues via la documentation du constructeur. Lorsqu'aucune quantité précise n'a pu être identifiée, celle-ci a été estimée par l'auteur dès lors que la mention d'utiliser un consommable donné est présente dans la description d'une tâche de maintenance.

[1] Quantification de la consommation énergétique

Les consommations horaires d'électricité (notée CH_e) et de gaz naturel (CH_g), ont été déterminées via l'estimation des quantités consommées au sein des installations d'assemblage du constructeur des appareils étudiés, sur une période d'un an. Celles-ci ont été calculées en suivant la relation 3.1.

$$Ch(E) = \left(\frac{Ca(E)}{\sum_{i=1}^{N}\left(Na(i) \times T(i)\right)}\right) \times Fc(E) \tag{3.1}$$

Avec :

Ch = Consommation horaire pour l'énergie (E) ;

Ca(E) = Consommation totale d'énergie E sur la période considérée;

Na(i) = Nombre d'hélicoptères de type i produit sur la période considérée;

T(i) = Durée totale moyenne nécessaire pour assembler un hélicoptère de type i;

Fc(E) = facteur de correction de la répartition de la consommation globale de l'énergie E.

Les facteurs de corrections Fc(E) permettent d'estimer, de manière qualitative, la proportion de la consommation totale d'une énergie E qui est utilisée pour les opérations sur l'appareil exclusivement, sans considérations des autres installations (bureaux, etc.). Leurs valeurs ont été considérées comme F_c (Électricité) = 0.60 pour l'électricité et Fc (Gaz) = 0.80 pour le gaz naturel.

Paramètres pour la construction des cycles d'exploitation

L'étude des 161 derniers vols de l'appareil du projet ENV-412 fait était d'un total de 1 643 RIN accumulés après 432,2 heures de vol, soit 3,8 RIN par heure de vol. Selon le même principe, il a été estimé que l'hélicoptère affichait 1,93 cycle moteur par heure de vol (cette valeur est arrondie à 2,0 cycles moteurs par heure de vol dans le cadre de l'étude de cas). Ces valeurs ont été obtenues via l'étude des carnets de vol de l'appareil. Le nombre de RIN moyen par vol a été calculé en utilisant la relation 3.2.

$$RIN_{vol}(v) = N_{LDGS}(v) + N_{ELLS}(v) \tag{3.2}$$

Avec :

$RIN_{vol}(v)$ = RIN total accumulé durant le vol v;

$N_{LDGS}(v)$ = Nombre d'atterrissages effectués durant le vol v;

$N_{ELLS}(v)$ = Nombre d'hélitreuillages de charge externes effectués durant le vol v.

Le nombre moyen de RIN par heure de vol est ensuite donné par la relation 3.3.

$$RIN(HV) = \left(\frac{\sum_{v=1}^{Vn} \mathrm{RINvol(v)}}{Hvol}\right) \tag{3.3}$$

Avec :

RIN(HV) = Nombre de RIN moyen par heure de vol

$RIN_{vol}(v)$ = Nombre de RIN total accumulé durant le vol v

Hvol = Nombre d'heures de vol accumulées par l'appareil

Valeurs des appareils

Trois types de valeurs monétaires sont considérés pour l'appareil. Ceux-ci sont présentées au tableau 3.2.

Tableau 3.2: Valeurs monétaires considérées pour les appareils

Valeur monétaire	Notation	Valeur assignée (USD)	Source
Valeur estimée de revente de l'appareil A au complet	$V_{REVENTE}$ (H)	575 000 $	Conklin & de Decker LCC®
Valeur de revente totale estimée des différents composants revalorisables de l'appareil A (après cannibalisation)	V_{REVAL} (H)	310 000 $	Estimé par l'auteur
Valeur de revente estimée du fuselage résiduel de l'appareil A (après cannibalisation)	V_{EOL}(H)	45 000 $	Valeur résiduelle appareil du projet ENV-412, indexée par l'auteur
Valeur à neuf (appareil B)	V_{NEUF} (H)	2 350 000 $	Tarifs constructeur

3.2.2 Données appareils et considération en fin de vie

Cette sous-section présente les résultats préliminaires utiles à la conduite des deux niveaux d'évaluation effectués dans le cadre de l'étude de cas. Sont notamment présentés ici les données afférentes aux occurrences de maintenance des deux appareils, ainsi que les données liées au processus de fin de vie de l'appareil initial.

Données appareils et opérations de maintenances

Au total, 13 types de matériaux constituants les composants des deux appareils ont été intégrés à l'évaluation. Ceux-ci sont pour la plupart de types ferreux, composites, plastiques, tissus et autres textiles. Huit types d'éléments de fixations principaux ont été considérés, répartis en trois types de matériaux (acier, aluminium et titane). Les détails des compositions des composants considérés et des éléments de fixations sont présentés en Annexe V.

Le tableau 3.3 présente les différences structurelles et opérationnelles importantes entre les deux appareils étudiés. Ces considérations sont notamment un des éléments de base de l'agencement des processus de maintenance pour les deux appareils étudiés.

Tableau 3.3: Différences dans les nombres d'occurrences de maintenance pour A et B

Types d'occurrences	Hélicoptère A	Hélicoptère B
Remplacement de composants[23] - Moteur	5	5
Remplacement de composants – Hors moteur	17	16
Inspections planifiées	13	14
RIN / Évènement de couple	1	2

Les composants à durée de vie limitée des deux appareils sont, pour la plupart, similaires en termes de fonction; leur performance varie cependant, tout comme la récurrence de leur remplacement anticipé. L'appareil B possède un composant à durée de vie limitée de moins

[23] Composants à durée de vie limitée.

Rapport-Gratuit.com

pour les configurations sélectionnées. Parmi les composants à durée de vie limitée présentant des fonctions communes sur les deux appareils, un de ceux-ci fait état d'une récurrence trois fois moins fréquente sur l'appareil B que sur l'appareil A. En termes d'occurrences des processus d'inspections anticipées, les appareils partagent douze types d'occurrences communes; deux opérations de maintenance supplémentaires sont spécifiques à l'hélicoptère B et une seule à l'hélicoptère A. L'appareil B présente donc un type d'occurrence supplémentaire comparé à l'appareil A. Cependant, la charge de travail nécessaire et les coûts afférents ont démontré être égaux ou inférieurs pour l'appareil B et ce, pour l'ensemble des occurrences communes. Les détails des bilans des occurrences d'inspection sont notamment présentés en Annexe VII.

Considérations de fin de vie

Le démantèlement de l'appareil résiduel du projet ENV-412 par l'auteur et les équipes techniques partenaires du projet a permis la mise en place d'un bilan massique des proportions de composants résiduels de l'appareil A en fin de vie[24]. Celui-ci est présenté au tableau 3.4.

Tableau 3.4: Étude massique lors de la fin de vie de l'appareil A

Indicateur	Définition	Valeur (lb)	% de $P_{initial}$ (A)
Poids en configuration initiale à vide (appareil A)	$P_{initial}$ (A)	2216	
Masse de composants revalorisés après cannibalisation (réutilisés, revendus, etc.)	MR_{REVAL} (A)	1 146	51,7 %
Masse de composants résiduels non revalorisés, considérée comme recyclable[25]	MR_{RECYC} (A)	168	7,6 %
Masse totale résiduelle destinée à l'enfouissement	MR_{totale} (A)	901	40,7 %
Masse totale détournée de l'enfouissement	$MR_{détournée} = P_{initial}$ (A) – MR_{totale} (A)	1 315	59,3 %

[24] La fiche d'acquisition d'informations sur l'appareil employée durant les travaux est présentée en Annexe II.
[25] Cette masse considère les composants dont les matériaux ont été estimés comme étant recyclables parmi ceux évalués. Cette proportion doit donc être interprétée comme indicative.

La proportion de composants revalorisés MR_{REVAL} (A) représente ceux ayant une valeur fonctionnelle ou structurelle importante et qui a été extraite par l'ancien opérateur propriétaire durant la cannibalisation de l'appareil. La proportion de composants résiduels destinés à l'enfouissement MR_{totale} (A) correspond à la proportion restante après cannibalisation, puis soustraction de la part potentiellement recyclable. En fin de vie de l'appareil A, une proportion de l'ordre de 59,3 % de sa masse initiale est ainsi détournée de l'enfouissement.

3.2.3 Performances des processus d'assemblage et de mise à niveau

Cette section traite de la comparaison des deux processus de mise à niveau et d'assemblage d'un appareil neuf. La complétion des bases de données pour les deux processus a permis la conduite de l'évaluation des flux. Le tableau 3.5 reprend les différents résultats obtenus pour les bilans de flux respectifs des deux processus; les détails de chacun d'entre eux sont présentés par la suite.

Tableau 3.5: Bilan du premier niveau d'évaluation de l'étude de cas

Indicateur	Assemblage d'un appareil B	Mise à niveau de A vers B	% réduction[26]
Durée totale du processus (h)	2 393	1 092	54,4
Consommation d'énergies totale (MJ)	412 830	188 378	54,4
Émissions totales de GHG (kg-CO2 eq)	12 556	5 730	54,4
Dépenses totales nécessaires, hors revalorisation éventuelle (USD)	2 350 000 $	1 150 434 $	51,0
Masse totale destinée à l'enfouissement (lb)	901	204	77,5

[26] Économies réalisées via la mise à niveau = $\left(\frac{V(assemblage)-V(mise\ à\ niveau)}{V(assemblage)}\right) \times 100$, avec V(processus) valeur de l'indicateur correspondant.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Tel que présenté au tableau 3.5, la mise à niveau est accomplie en 1 301 heures de moins que l'assemblage d'un appareil neuf, soit en 2,19 fois moins de temps[27]. Les consommations d'énergies et les émissions de gaz à effet de serres subséquentes affichent une réduction du même ordre de grandeur[28]. Les quantités de consommables employées pour la plupart des opérations sont similaires ou inférieures à celles utilisées pour l'assemblage à neuf, à l'exception des quantités de papier de verre utilisées[29].

Du point de vue de l'étude comparative des coûts d'acquisition d'un nouvel appareil selon les deux processus, le prix de la mise à niveau apparaît comme étant 51 % moins élevé, notamment en raison de la charge de travail inférieure et les besoins réduits en nouveaux composants. Cependant, l'opérateur possédant un appareil A peut, dans le cadre de l'acquisition d'un nouvel appareil B, décider de revendre l'appareil en l'état, ou encore de revendre les composants de celui-ci dans l'éventualité d'une cannibalisation. De la même manière et dans le cadre d'une mise à niveau, les composants non réintégrés dans l'appareil final peuvent être revendus par l'opérateur, de manière à alléger le coût de la mise à niveau de son appareil. Plusieurs distinctions ont ainsi été effectuées afin de refléter au plus près la réalité économique de l'opérateur confronté à ces deux choix. Celles-ci sont présentées à la figure 3.5.

---

[27] À nombre d'employés équivalent pour les tâches similaires des deux processus.

[28] Les estimations des consommations d'énergies sont toutefois relatives, car basées sur les considérations de durées de production, au vue de l'impossibilité de prendre de mesures individuelles sur l'ensemble des pôles de consommation pour chacune des tâches effectuées. Également, les consommations sont amenées à varier selon les installations dans lesquelles les travaux sont effectués.

[29] Négligeable en comparaison d'autres types de consommables présentant une toxicité ou dont la manufacture produit des effets néfastes sur l'environnement.

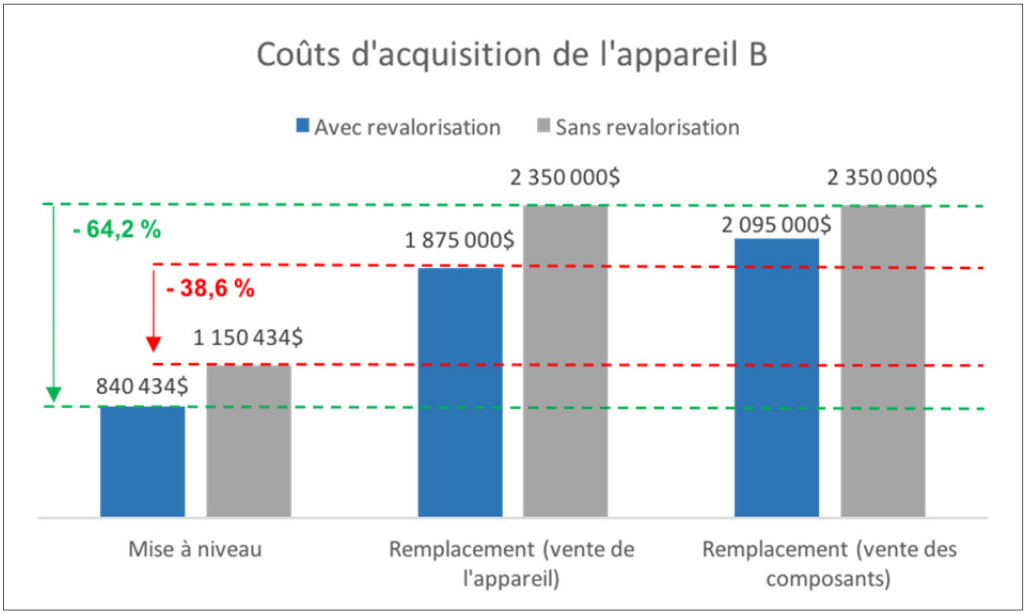


Figure 3.5: Bilan des coûts selon le processus sélectionné

Comme montré à la figure 3.5, la revente des composants réutilisables, après leur extraction durant le processus de mise à niveau peut engendrer une économie de l'ordre de 64,2 % (comparé au prix d'un appareil neuf). L'option la moins onéreuse pour le remplacement à neuf de l'appareil serait ainsi l'achat d'un nouvel appareil, combiné à la revente de l'ancien appareil. Cependant, même dans le cas d'une mise à niveau sans revalorisation aucune, la mise à niveau resterait une alternative théoriquement plus attrayante économiquement du point de l'opérateur, affichant toujours 38,6 % d'économies dans ce cas de figure.

Dans le cadre de l'évaluation des masses résiduelles générées par les deux processus, il est considéré dans le cas d'une mise à niveau, que lorsque l'appareil A subi le palier de déconstruction, une partie de ses composants est conservée sur l'appareil, tandis que la proportion extraite est soit revalorisée (réutilisée ou recyclée), soit mise au rebut (enfouissement). Dans le cas de l'acquisition d'un appareil neuf, l'appareil A est considéré cannibalisé, avec une certaine proportion de ses composants revalorisés et une autre destinée à l'enfouissement. La figure 3.6 présente le bilan massique ainsi obtenu.

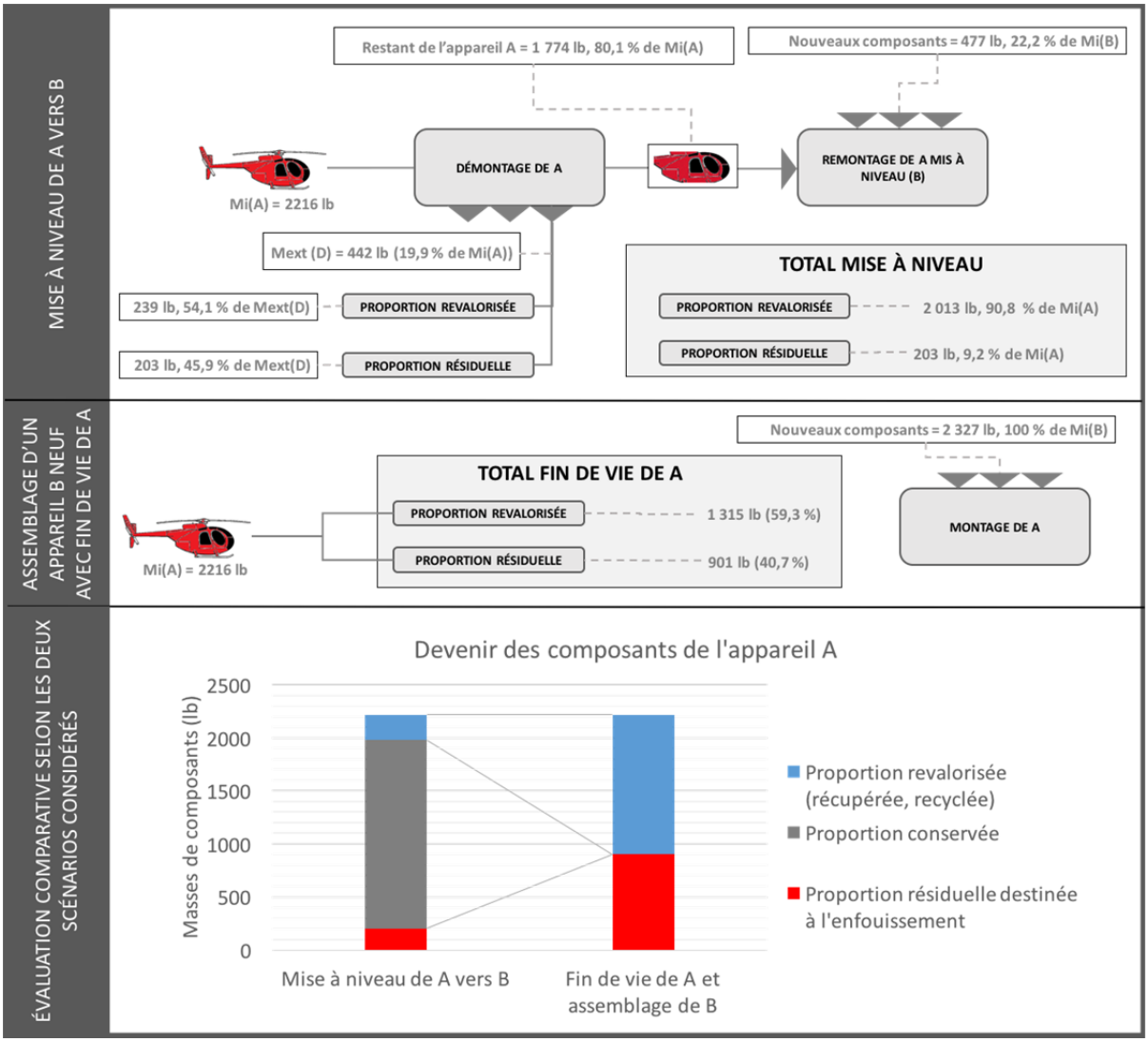


Figure 3.6: Bilan massique des composants pour les processus de mise à niveau et d'assemblage à neuf

Tel qu'illustré à la figure 3.6, la mise à niveau permet ainsi la conservation de 80,1 % de la masse totale de l'appareil initial au sein de l'appareil final (seulement 19,9 % de la masse initial est extraite de l'appareil). Cette proportion de composants réutilisés évite ainsi le besoin en nouveaux composants pour le nouvel appareil, et ce, à hauteur de 77,8 % de la masse finale. Les composants neufs à intégrer dans l'appareil final représentent ainsi seulement 22,2 % de la masse finale de l'hélicoptère. Au total, après ségrégation des composants recyclables et non recyclables, la mise à niveau permet ainsi une réduction de

77,5 % de la proportion résiduelle destinée à l'enfouissement, comparé à l'assemblage d'un appareil neuf [30].

Du point de vue strictement processus, la mise à niveau de A vers B apparait ainsi comme une alternative plus éco-efficiente que le remplacement de A par un appareil B neuf, suivi de son entrée en fin de vie. La mise à niveau semble ainsi présenter un triple avantage pour l'opérateur, permettant d'obtenir un appareil équivalent à un neuf, à un coût inférieur, plus rapidement, et ce, tout en limitant les contraintes sur l'environnement. La partie suivante reprend les résultats de l'étude de cas en considérant l'ensemble du cycle d'exploitation de l'appareil.

3.2.4 Performance des cycles d'exploitation

Le second niveau de l'étude de cas a été effectué en suivant un total de 24 scénarios, construits à partir des considérations présentées dans le Chapitre 2. Six d'entre eux sont utilisés comme référence, considérant les cycles d'exploitation des appareils A et B sans modification, pour les trois types d'usages considérés. Les 18 autres scénarios sont des scénarios comparatifs, considérant une mise à niveau ou un remplacement de l'appareil initial, effectué(e) à des instants différents du cycle d'exploitation. La figure 3.7 récapitule les scénarios employés.

---

[30] Dans le cas de la revente de l'appareil, la proportion effective de matières résiduelles, du point de vue des flux sortants, serait toutefois plus importante pour la mise à niveau; il serait donc nécessaire d'évaluer les effets à des étapes antérieures du cycle de vie de l'appareil. Il est en effet nécessaire de garder à l'esprit que les composants non produits pourraient être un facteur de réduction d'impacts important à l'échelle du cycle complet, malgré la proportion résiduelle générée lors de l'étape de mise à niveau.

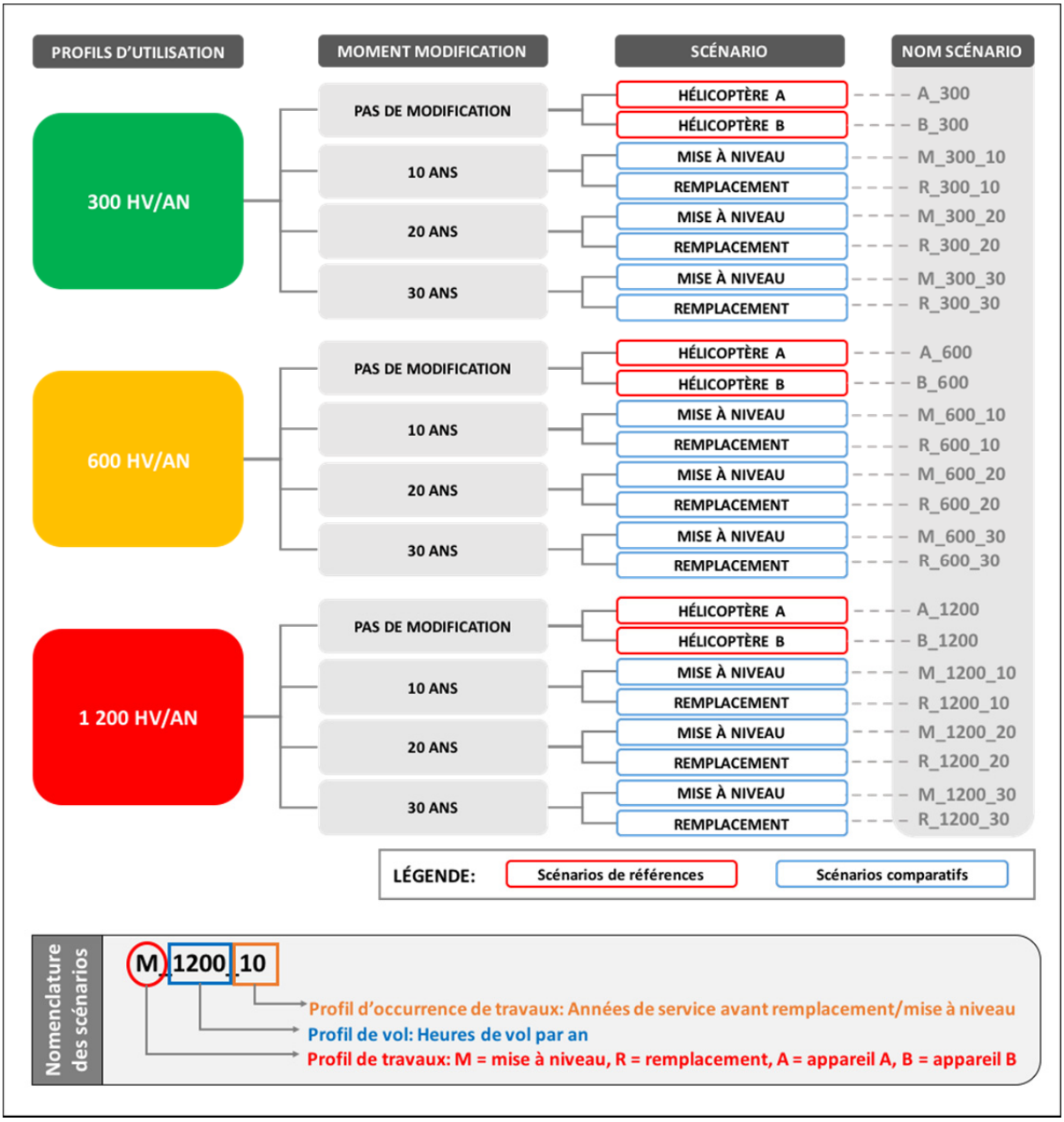


Figure 3.7: Récapitulatif des scénarios étudiés

Dans un premier temps, l'étude des scénarios de références permet de déterminer si l'exploitation de l'appareil B présente ou non une plus-value en terme d'éco-efficience. Trois cycles d'appareil A et trois cycles d'appareil B ont été évalués à cet effet. Le tableau 3.6 reprend les différentes tendances observées selon les différents profils et indicateurs considérés.

Tableau 3.6: Comparaison des indicateurs pour les cycles de références[31]

Scénarios (appareil B)[32]	Coût total	Matières résiduelles	Temps en maintenance	Énergie et GES
	% économisé	% réduction	% réduction	% réduction
300 h / an	19,9 %	-1,7 %	3,9 %	3,9 %
600 h / an	18,8 %	-1,1 %	2,7 %	2,7 %
1 200 h / an	20,5 %	-1,2 %	4,7 %	4,7 %

Comme l'illustre le tableau 3.6, les cycles d'exploitation de l'appareil B font état d'une réduction moyenne de 19,7 % des coûts totaux en fin de cycle. L'appareil B étant une évolution de l'appareil A, il est important, pour un opérateur, d'observer que celui-ci est plus efficient économiquement que son ancienne version. Il est également positif d'observer une amélioration quasi générale de la performance environnementale de l'appareil entre deux versions, notamment une réduction moyenne de 3,7 % en termes d'énergies consommées et d'émissions de gaz à effet de serre. Ces résultats observés sont en partie dus à un nombre réduit d'occurrences de maintenance (voir Annexe VI), tel que présenté au tableau 3.7.

Tableau 3.7: Variation du nombre d'occurrences de maintenance de A et de B[31]

Type d'occurrences de maintenance	300 h / an		600 h / an		1 200 h / an		Réduction moyenne
	Appareil A	Appareil B	Appareil A	Appareil B	Appareil A	Appareil B	
Occurrences d'inspection	2 480	2 468	2 707	2 702	3 236	3 217	**23**
Occurrences de remplacement	71	67	130	123	267	252	**16**
Total des occurrences	**2 551**	**2 535**	**2 837**	**2 825**	**3 503**	**3 469**	**20**

[31] Les résultats présentés ici sont de nature générique; pour plus de détails, le lecteur est invité à consulter les données brutes générées au terme de l'étude, qui sont présentés en Annexes VI et VII.
[32] En référence au cycle équivalent de l'appareil A.

Cependant, le tableau 3.6 fait était d'une augmentation de la masse de matières résiduelles générées par B de l'ordre de 1,3 % en moyenne (par rapport à A). Cette augmentation est notamment due à la considération de 2 RIN par évènement de couple pour l'appareil B, contrairement à 1 RIN par évènement de couple pour l'appareil A[33]. Cette variation entraîne des occurrences supplémentaires de remplacement pour deux des composants à durée de vie limitée de l'appareil B, malgré une réduction globale des occurrences de remplacement des autres composants et des occurrences d'inspections, tel qu'illustré au tableau 3.7.

La figure 3.8 reprend l'évolution des coûts d'exploitation liés à la maintenance des deux appareils, étudiée à partir de moyennes des trois profils de vol des deux appareils.

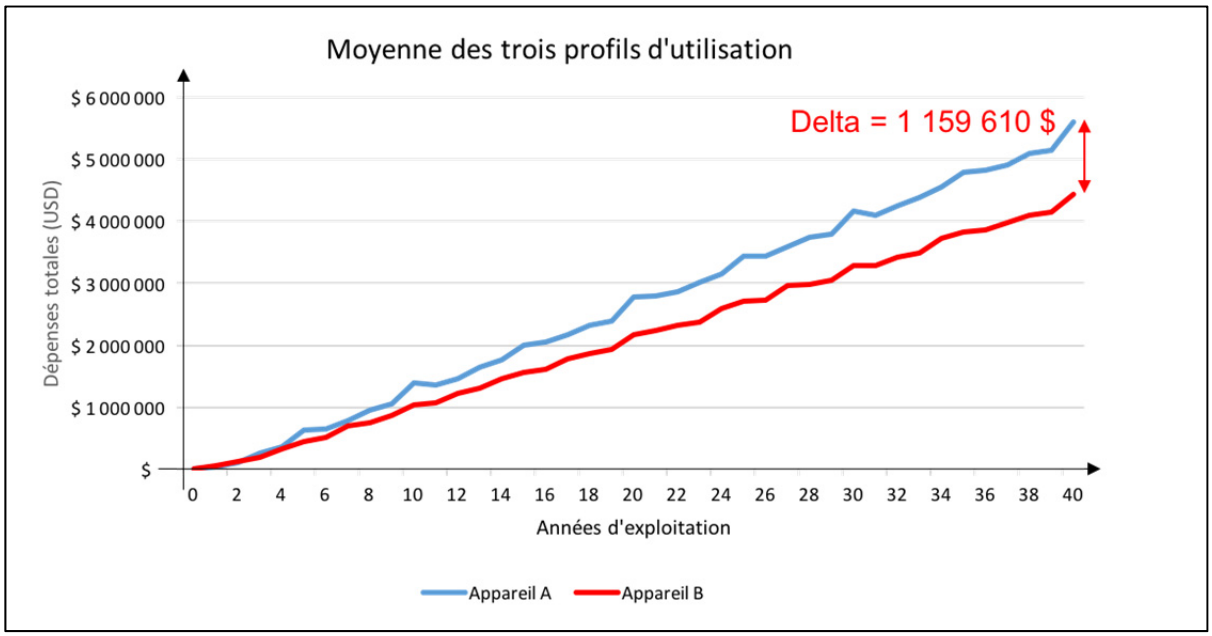


Figure 3.8: Variations dans les coûts d'exploitation des deux appareils A et B

[33] Une étude de sensibilité a montré que la proportion résiduelle générée par B pourrait être de l'ordre de -1,4 % à -1,7 % comparée au cycle de A si la considération des RIN était la même pour les deux appareils. Ce changement dans les considérations de l'appareil démontre l'importance de son design initial envers son éco-efficience à l'usage.

L'appareil B nécessite donc moins d'investissement pour son entretien et a une durée d'immobilisation au sol cumulative moins importante que l'appareil A. Les consommations d'énergies et émissions de gaz à effet de serre se retrouvent également réduites en proportion.

Au vu des résultats précédents, il pourrait être attendu que l'ancien appareil A, devenu B, présente des performances améliorées à l'échelle des cycles d'exploitation incluant une mise à niveau, sur au moins quatre des cinq indicateurs précédemment étudiés. Il serait ainsi pertinent pour un opérateur, notamment en termes de coûts, de comparer l'impact d'une telle décision à l'échelle des cycles d'exploitation de ses appareils, pour lesquels une mise à niveau est considérée. Les tableaux 3.8, 3.9 et 3.10 reprennent les bilans des indicateurs de suivis pour les scénarios étudiés. Les données brutes sont par ailleurs présentées en Annexe VII.

Tableau 3.8: Bilan de l'évaluation des cycles étudiés (300 h/an)

300 h / an	300 H DE VOL / AN - RÉFÉRENCE AU SCÉNARIO A_300						
Scénarios		Coût total (USD)		Matières résiduelles (Lb)		Temps immobilisé (Heures)	
		Écart observé	% économisé	Écart observé	% réduction	Écart observé	% réduction
RÉFÉRENCE (APPAREIL B)	B_300	-1 093 076 $	19.9%	10.7	-1.7%	-287	3.9%
MISE À NIVEAU	M_300_10	- 68 653 $	1.2%	385.7	-62.4%	859	-11.6%
	M_300_20	720 163 $	-13.1%	378.6	-61.2%	-29	-12.5%
	M_300_30	399 052 $	-7.3%	375.5	-60.7%	1,000	-13.5%
REMPLACEMENT	R_300_10	1 130 913 $	-20.6%	844.7	-136.6%	2,160	-29.1%
	R_300_20	1 919 729 $	-34.9%	837.6	-135.4%	2,230	-30.1%
	R_300_30	1 598 618 $	-29.1%	834.5	-134.9%	2,301	-31.0%

Tableau 3.9: Bilan de l'évaluation des cycles étudiés (600 h/an)

600 h / an	600 H DE VOL / AN - RÉFÉRENCE AU SCÉNARIO A_600						
Scénarios		Coût total (USD)		Matières résiduelles (Lb)		Temps immobilisé (Heures)	
		Écart observé	% économisé	Écart observé	% réduction	Écart observé	% réduction
RÉFÉRENCE (APPAREIL B)	B_600	- 542 264 $	18.8%	3.3	-1.1%	-132	2.7%
MISE À NIVEAU	M_600_10	243 822 $	-8.4%	343.5	-116.6%	977	-20.1%
	M_600_20	456 990 $	-15.8%	409.2	-139.0%	1,009	-20.8%
	M_600_30	500 112 $	-17.3%	346.0	-117.5%	1,043	-21.5%
REMPLACEMENT	R_600_10	1 443 388 $	-49.9%	802.5	-272.5%	2,278	-46.9%
	R_600_20	1 656 556 $	-57.3%	868.2	-294.8%	2,310	-47.5%
	R_600_30	1 699 678 $	-58.8%	805.0	-273.4%	2,344	-48.2%

Rapport-Gratuit.com

Tableau 3.10: Bilan de l'évaluation des cycles étudiés (1 200 h/an)

1 200 h / an		1 200 H DE VOL / AN - RÉFÉRENCE AU SCÉNARIO A_1 200					
Scénarios		Coût total (USD)		Matières résiduelles (lb)		Temps immobilisé (Heures)	
		Écart observé	% économisé	Écart observé	% réduction	Écart observé	% réduction
RÉFÉRENCE (APPAREIL B)	B_1200	-2 238 369 $	20.5%	15.2	-1.2%	-573	4.7%
MISE À NIVEAU	M_1200_10	-1 045 244 $	9.6%	382.1	-29.7%	639	-5.2%
	M_1200_20	- 377 635 $	3.5%	381.4	-29.7%	783	-6.4%
	M_1200_30	82 389 $	0.8%	341.0	-26.5%	925	-7.5%
REMPLACEMENT	R_1200_10	154 322 $	1.4%	841.1	-65.4%	1,940	-15.8%
	R_1200_20	821 931 $	7.5%	840.4	-65.4%	2,084	-17.0%
	R_1200_30	1 281 955 $	-11.8%	800.0	-62.2%	2,226	-18.1%

Au vu des résultats présentés aux tableaux 3.8, 3.9 et 3.10, il est intéressant de noter que les variations dans les valeurs des indicateurs ne suivent pas une tendance linéaire en termes d'heures de vol annuelles; en effet, les scénarios associés aux profils de vols de 300 h/an et de 1 200 h/an affichent des réductions plus importantes que ceux associés aux profils de vols de 600 h/an (en ayant comme base comparative leurs scénarios de référence). Ceci confirme ainsi l'importance, pour un opérateur, d'effectuer une étude personnalisée pour chaque cycle individuel, reflétant ainsi les caractéristiques de sa flotte. Malgré cette non-linéarité, deux tendances peuvent cependant être observées :

- les résultats des scénarios de mise à niveau présente des valeurs inférieures à ceux du remplacement, et ce, pour l'ensemble des indicateurs étudiés et quel que soit les scénarios étudiés;
- les valeurs obtenues font généralement état d'économies plus importantes lorsque la mise à niveau est conduite tôt durant le cycle d'exploitation de l'appareil.

Le graphique présenté à la figure 3.9 reprend notamment cette dernière observation. Une moyenne des valeurs annuelles des cycles d'exploitation de l'ensemble des profils de vol a été effectuée, de manière à comparer l'évolution du coût cumulatif, en fonction de l'instant de la décision de conduire les travaux de mise à niveau ou de remplacement.

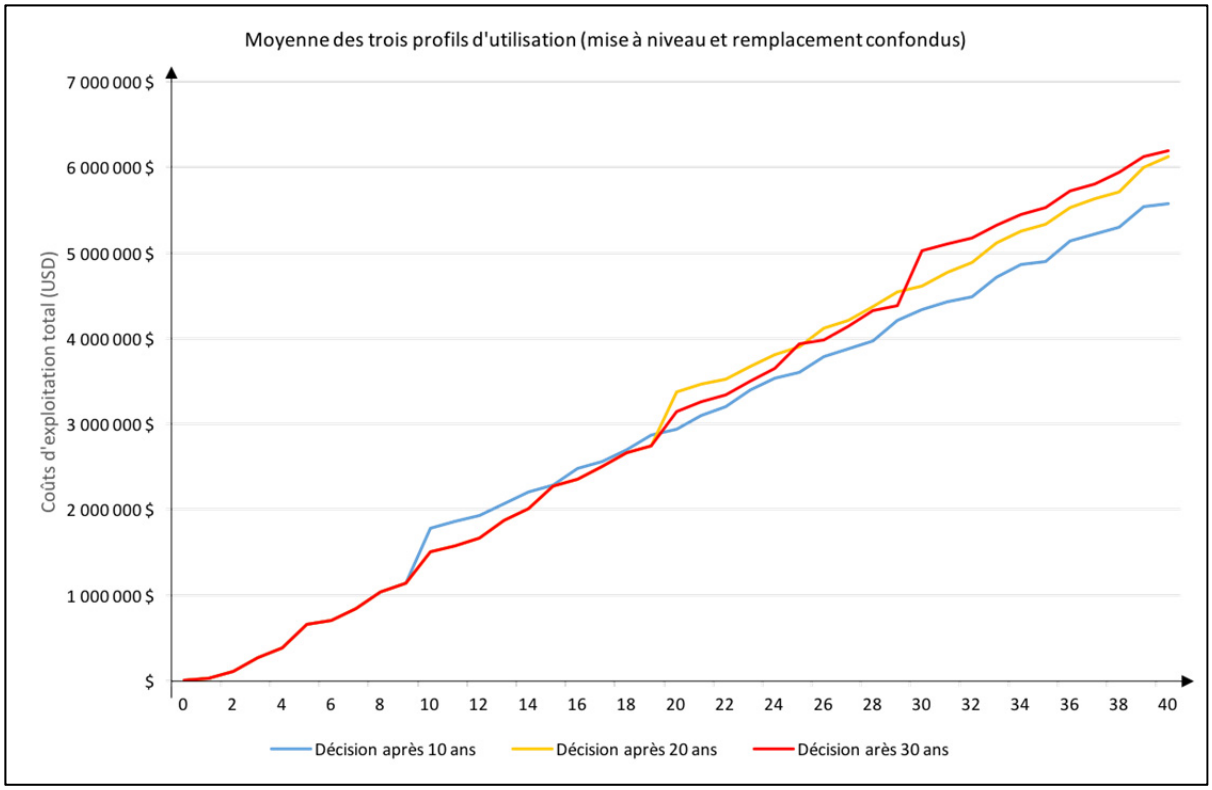


Figure 3.9: Variation des coûts d'exploitations en fonction du moment de la décision

Tel qu'illustré à la figure 3.9, le plus tôt une opération de mise à niveau (ou de remplacement) est effectuée, le moins coûteux le cycle d'exploitation sera au terme des années de service.

La réduction des coûts cumulatifs est un facteur important lorsqu'une mise à niveau est considérée par un opérateur, qui devrait, supposément, rechercher l'alternative la plus économiquement viable. Dans cette optique, il est intéressant de noter, au tableau 3.10, que deux des scénarios étudiés (M_1200_10 et M_1200_20) offrent un coût total cumulatif inférieur à celui du cycle de l'appareil de référence (A_1200), exploité à même intensité et pendant la même durée. Les différences observées équivalent respectivement à 1 045 244 $ et 379 954 $, correspondant ainsi à des économies de 9,6 % et 3,5 % par rapport au cycle de référence. Cela signifie que, dans ce cas de figure et hormis le besoin en performances supplémentaires, la mise à niveau de l'appareil peut être vue comme étant un investissement

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

permettant la réduction des coûts de maintenance au long terme. Une illustration des coûts de ces scénarios au fil des années est présentée aux figures 3.10 et 3.11 afin d'en étudier la tendance au cours des années d'exploitation.

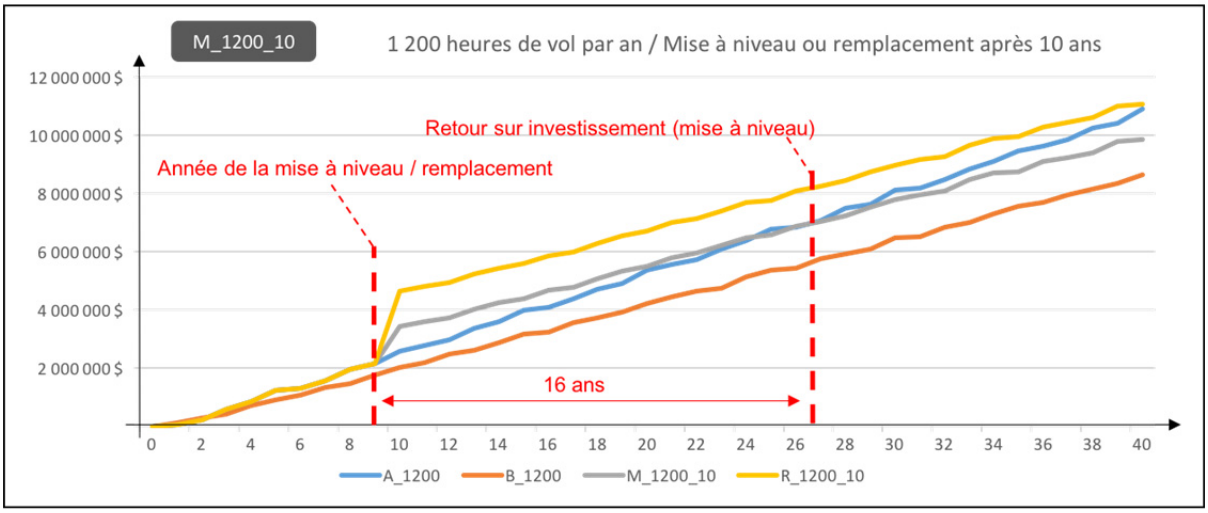


Figure 3.10: Détails de l'évolution du coût total des opérations (scénario M_1200_10 et R_1200_10)

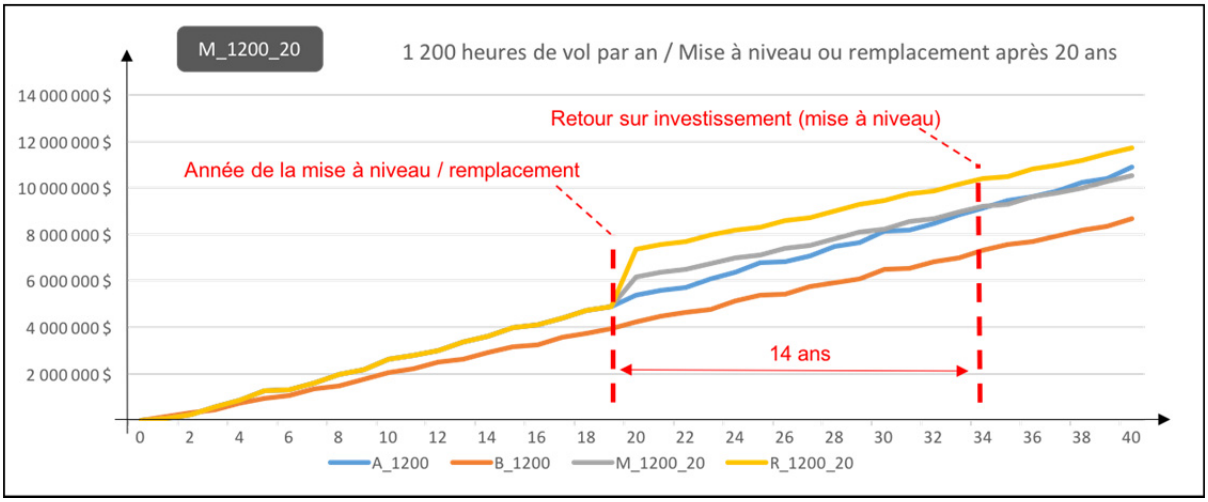


Figure 3.11: Détails de l'évolution du coût total des opérations (scénario M_1200_20 et R_1200_20)

Les figures 3.10 et 3.11 montrent que les scénarios M_1200_10 et M_1200_20 offrent un retour sur investissement après respectivement 16 et 14 années d'exploitation. Également le scénario R_1200_10, incluant un remplacement de l'appareil, tend vers le point d'équilibre avec le cycle de référence après 30 ans d'exploitation, confirmant ainsi l'efficience supplémentaire de l'appareil B par rapport à A, malgré le surcoût associé à son remplacement.

Les proportions résiduelles cumulatives générées au cours des différents cycles d'exploitations étudiés sont comprises entre 295 lb et 1 300 lb pour les scénarios de références (appareils A et B sans modification), représentant respectivement 13 % et 56 % de la masse de l'appareil considéré en configuration standard. Dans ce cas de figure et en considérant la masse du fuselage résiduel une fois arrivé en fin de vie[34], un hélicoptère pourrait ainsi générer une proportion résiduelle cumulative représentant entre 0,54 et 0,99 fois sa masse initiale en configuration standard. Pour les scénarios incluant une mise à niveau ou un remplacement, cette proportion résiduelle (hors fuselage résiduel en fin de vie) est comprise entre 638 lb et 2 086 lb, respectivement 29 % et 94 % de la masse d'un appareil A. En ajoutant la masse du fuselage résiduel de l'appareil A une fois arrivé en fin de vie, l'hélicoptère pourrait générer une proportion résiduelle cumulative représentant alors entre 0,69 et 1,35 fois sa masse initiale en configuration standard. Ces résultats confirment ainsi l'importance de considérer une approche cumulative pour l'évaluation du gisement résiduel généré par l'appareil au cours de sa vie utile (et non uniquement la masse du fuselage résiduel en fin de vie).

Concernant les deux appareils A et B considérés pour l'étude de cas, la génération de matières résiduelles supplémentaire par l'appareil B illustre l'influence des conceptions d'appareils sur leur éco-efficience respective durant leur phase d'usage. Les principes d'écoconception prennent ici une grande importance dans l'identification des composants ou

---

[34] En considérant uniquement la proportion massique du fuselage résiduel non-revalorisée $MR_{totale}(A)$ estimée dans l'étude de cas, c'est à dire la proportion massique destinée à l'enfouissement.

processus causant un transfert de pollution, lors du passage de l'appareil A à l'appareil B. La méthode employée ici a permis, à ce titre, d'identifier des plus-values importantes en termes d'éco-efficience pour la plupart des occurrences de maintenance; cependant, les deux composants affectés par le changement dans les facteurs d'occurrences RIN au sein de l'appareil B viennent affecter négativement les gains environnementaux affichés par ces occurrences[35]. Dans le cadre de l'implantation de mesures d'améliorations continues par le constructeur (conceptions d'appareils), ces composants présentent ainsi le plus grand potentiel de réduction de ces impacts.

Les résultats présentés confirment ainsi l'intérêt financier et environnemental de la mise à niveau au long terme. Celle-ci présente une plus-value importante au remplacement de l'appareil en termes d'éco-efficience, et ce, dans l'ensemble des cas de figure étudiés. Elle permet également, dans certains cas, un retour sur investissement important (les économies en coûts de maintenance venant compenser le coût des travaux de mise à niveau, après une durée raisonnable d'exploitation de l'appareil).

---

[35] Les ordres de grandeurs des matières résiduelles supplémentaires générés par un appareil de type B lorsque comparé à un appareil A sont cependant à considérer. En effet, les augmentations observées font état d'une valeur comprise entre 3,3 lb et 15,2 lb. À l'échelle de 40 années de service, ces augmentations apparaissent négligeables.

CHAPITRE 4

DISCUSSION

Ce chapitre traite de la pertinence de la méthode développée et des résultats générés. Il fournit également des recommandations d'ordre général dans le cadre des aspects abordés durant la conduite de ce projet. Une première partie reprend les détails de l'étude de cas et de ses résultats. Une seconde partie aborde quant à elle les détails de la méthodologie développée, ainsi que son potentiel industriel.

4.1 Cas de la mise à niveau d'hélicoptères

Cette première sous-partie aborde tout d'abord le retour sur l'éco-efficience de la mise à niveau d'hélicoptère en tant qu'alternative à la fin de vie. La partie suivante discute de l'analyse des scénarios et des considérations initiales employées pour l'étude de cas. Finalement, les deux dernières sections présentent le potentiel de la mise à niveau en tant que modèle d'affaires industriel, ainsi que des recommandations d'ordre général.

4.1.1 La mise à niveau : alternative éco-efficiente à la fin de vie ?

Dans le cadre de l'évaluation du potentiel d'éco-efficience de la mise à niveau, l'étude de cas s'appuie sur les sept éléments caractéristiques de l'éco-efficience, présentés dans la sous-partie 1.3.1 de l'état de l'art. Le tableau 4.1 reprend, en référence aux deux niveaux d'évaluations effectués, la position du procédé de mise à niveau étudié dans le cadre de l'étude de cas.

Tableau 4.1: Bilan de l'atteinte des objectifs d'éco-efficience par la mise à niveau

Éléments de l'éco-efficience [36]	**Amélioration observée**
Réduire l'intensité matérielle des biens et services	**OUI**[37, 38, 39]
Réduire l'intensité énergétique des biens et services	**OUI**[37, 38]
Réduire la dispersion toxique	**Non documenté**
Augmenter la recyclabilité des matériaux	**OUI**[39]
Maximiser l'utilisation durable de ressources renouvelables	**Non documenté**
Étendre la durabilité des produits	**OUI**[38, 39]
Augmenter l'intensité de service des biens et services	**OUI**[38, 39]

Lorsque comparée au remplacement par un appareil neuf, la mise à niveau offre une amélioration dans cinq des sept éléments de l'éco-efficience, tels que définis par le *World Business Council for Sustainable Developement* (WBCSD, 1996, p. 6). Elle permet, premièrement, de réduire l'intensité matérielle (besoin en nouveaux composants) lors de la production du nouvel appareil. Comme 79 % de la masse de l'hélicoptère final provient de l'appareil initial, seulement 21 % de cette même masse présente le besoin d'être obtenue via la fabrication de nouveaux sous-ensembles. Également, cette même proportion conservée est un facteur important dans l'évitement de la mise au rebut de matières résiduelles. Au niveau des seuls processus, la mise à niveau présente une intensité énergétique réduite, et donc, des émissions de gaz à effet de serre diminuées. L'intégration d'une modernisation, impliquant une diminution globale de la fréquence des occurrences de maintenances et de l'effort requis, a montré des diminutions similaires à l'échelle des cycles d'exploitation complets. La mise à niveau assure également une augmentation de la durée de vie de l'appareil via sa remise à neuf et sa modernisation. De la même manière, l'hélicoptère final étudié est plus performant, et également capable d'emporter une charge utile plus importante. L'intensité de son utilisation est ainsi augmentée, les capacités opérationnelles de celui-ci étant supérieures à son état précédent.

---

[36] Traductions libres par l'auteur (source : WBCSD, 1996, p. 6).
[37] En référence à la production d'un nouvel appareil et à l'entrée en fin d'utilisation de l'appareil initial.
[38] En référence au cycle d'utilisation de l'appareil initial.
[39] En considérant la réutilisation de matériaux d'un ancien appareil au sein d'un nouveau.

La mise à niveau d'un ancien appareil permet donc l'obtention d'un appareil répondant aux mêmes standards qu'un appareil neuf, présentant ainsi les mêmes fonctions et le même niveau de qualité, à un coût plus compétitif, tout en minimisant globalement les intrants de ressources et les extrants de matières indésirables. La mise à niveau apparait donc, sous réserve du cadre systémique fixé par l'étude de cas, comme une alternative plus éco-efficiente que le remplacement d'un appareil.

4.1.2 Scénarios et hypothèses initiales considérés

Tel que présenté précédemment, certains postulats, hypothèses et estimations ont dû être effectués afin de garantir la conduite de la présente étude de cas. L'étude de cas présentée pose notamment certaines considérations initiales (détaillées aux sections 2.3.1 et 3.2.1), limitant la validité de ses résultats aux seuls variables et paramètres employés. Ces paramètres peuvent cependant être modifiés dans l'éventualité de données plus précises afin d'actualiser les résultats générés.

Le champ des possibles en termes de scénarios étudiés étant extrêmement vaste, les scénarios considérés pour les cycles d'exploitation (figure 3.7) correspondent à des choix dans les profils d'utilisations génériques qui ont été nécessaires à la conduite de l'étude de cas.[40] De même, l'étude de cas formule le postulat selon lequel les hélicoptères se trouvent dans la meilleure configuration possible, c'est-à-dire équipés des dernières versions des composants. Dans l'éventualité de configurations plus anciennes, les gains potentiels associés à la mise à niveau pourraient ainsi être plus élevés.

L'étude de cas ne tient pas par ailleurs compte de certaines considérations économiques telles que l'inflation, la dépréciation de la valeur économique de l'appareil au cours du temps ou

---

[40] L'identification de profils d'exploitation d'un appareil reflétant des usages génériques standards est, comme détaillé dans la section 1.1.2 du chapitre 1, véritablement complexe en raison de la grande diversité des types d'usages associés à l'exploitation d'un hélicoptère et des importantes variations dans les durées de vol moyennes.

encore l'augmentation des coûts de maintenance due à son vieillissement progressif. L'appareil après mise à niveau se trouvant dans une condition équivalente à un appareil neuf, des économies supplémentaires associées à l'exploitation de l'appareil final plus récent pourraient être observées (un appareil neuf coûtant moins cher à la maintenance qu'un appareil plus ancien). De la même manière, la valeur résiduelle de l'appareil au complet peut être amenée à évoluer à différents moments de son cycle d'exploitation, déterminée par son âge, le nombre d'heures de vol accumulées ou encore la condition de ses composants. La valeur réelle de l'appareil à un moment précis du cycle d'exploitation peut ainsi être amenée à différer de la valeur $V_{REVENTE}$ (H) employée dans la présente étude de cas; par conséquent, certaines variations dans le coût total des scénarios incluant un remplacement peuvent être attendues.

Pour ces raisons, l'étude de cas effectuée se veut être un premier niveau d'évaluation des tendances générales liées à la mise à niveau potentielle d'un hélicoptère; par conséquent, les résultats de la présente étude de cas devraient être perçus comme indicatifs plutôt que quantitativement exacts.

4.1.3 Potentiel en tant que modèle d'affaires

La conduite d'une mise à niveau implique le passage d'un appareil ancien à un appareil plus moderne et donc, l'existence même de l'appareil final. Les constructeurs doivent donc concevoir le nouvel appareil, et en parallèle le cas échéant, les composants et processus permettant la mise à niveau de l'ancienne version. Cependant, l'évolution des conceptions d'appareils entre deux versions reste limitée, permettant la conservation d'un grand nombre de composants issus des designs précédents au sein des nouvelles versions. Cette considération facilite notamment la mise en place d'un processus de mise à niveau. De plus, un produit présentant une haute valeur à l'achat, un haut niveau de complexité et une grande durabilité est plus à même de conduire à un modèle d'affaire de remise à niveau viable (Center for Remanufacturing & Reuse, 2009). Les hélicoptères civils légers non pressurisés correspondent à ces trois critères.

À l'avenir, l'apparition de nouvelles normes et réglementations canadiennes, afférentes à la gestion en fin de vie des véhicules, pourrait venir modifier les paradigmes de production industrielle, notamment si la gestion en fin de vie de produits doit être assumée par le fabricant. Le développement des procédés de mise à niveau pourrait ainsi permettre de limiter les proportions de matières résiduelles à disposer et donc, les coûts qui y sont associés. Les constructeurs ou centres de services agréés pourraient également envisager le rachat d'appareils d'occasion afin de conduire eux-mêmes la mise à niveau, dans le but de revendre par la suite l'appareil modernisé avec profits. Si l'on reprend les données et résultats de l'étude de cas, et, en considérant une marge commerciale de 20 %[41] sur le prix de vente à neuf de l'appareil ainsi que sur les prix de vente des kits de mise à niveau, le constructeur peut ainsi espérer une réduction des coûts de production de l'ordre de 21,1 %[42]. Avec la revente des composants revalorisables, cette proportion peut atteindre 37,4 %. Cependant, le prix de revente d'un appareil mis à niveau est généralement inférieur à celui d'un neuf (Remar, 2011; The Remanufacturing Institute, 2013); en le considérant 20 % moins cher à l'achat pour le client, comparé à un neuf, les marges commerciales réalisées dans les deux cas seraient respectivement de l'ordre de 58 % et de 25,7 %. Des analyses de marché devraient être effectuées afin de confirmer l'intérêt de cette approche.

Du point de vue de l'opérateur, la mise à niveau constitue une alternative techniquement et économiquement intéressante. Elle lui permet notamment, s'il possède les infrastructures nécessaires, d'effectuer les opérations au sein de ses installations. Ceci garantit potentiellement à l'opérateur l'évitement de délais supplémentaires dans la livraison d'un appareil neuf par le constructeur, mais aussi la limitation du temps d'immobilisation de la machine, ainsi que la conduite des opérations au meilleur tarif. La mise à niveau peut également permettre à un opérateur d'obtenir des performances supplémentaires à un coût inférieur, lui garantissant la poursuite de ses activités dans l'éventualité de besoins évolutifs

---

[41] Fixée arbitrairement ici.

[42] En considérant la même valeur résiduelle $V_{REVENTE}$ (H) de l'appareil initial et aucune considération de revalorisation.

Rapport-Gratuit.com

de ses clients, ou encore la saisie d'une nouvelle opportunité d'affaire à moindres risques. Dans le cas d'une flotte composée en grande partie d'appareils de la même famille, mais présents sous plusieurs versions, la mise à niveau peut également être un moyen d'uniformiser la flotte d'appareils à moindre coût.

Enfin, du point de vue environnemental, la mise à niveau s'intègre dans les considérations de 3RV, visant la réduction à la source de l'emploi de ressources, leur réutilisation en fin de vie et la limitation de la génération de matières résiduelles (Recyc-Québec, 2015). Elle apparait ainsi comme un modèle d'affaires plus respectueux de l'environnement[43].

4.1.4 Recommandations

Selon les travaux effectués par Berkeley University of California, les facteurs principaux influençant la capacité d'un produit à être démonté sont : sa structure générale, les matériaux utilisés, les éléments de fixations, les éléments de jointures et de connexions, l'accessibilité des composants ainsi que les conditions de désassemblage (Chien, 2011). Les travaux effectués dans le cadre de ce mémoire, notamment sur l'hélicoptère du projet ENV-412, ont montré que les étapes de retrait et de remplacement des rivets étaient les plus exigeantes en termes de temps (CRIAQ, 2015). Également, la durée de quelques opérations s'est vue allongée en raison de l'accès restreint à certains sous-ensembles, notamment ceux nécessitant un démontage dans le cadre de la mise à niveau (CRIAQ, 2015). Contrairement aux composants présentant un remplacement anticipé après une certaine durée de service, ces sous-ensembles ne présentaient pas une accessibilité aisée, ceux-ci n'ayant pas vocation à être modifiés ou remplacés fréquemment. L'apparition de nouveaux matériaux pour la fabrication, tels que les matériaux composites, permettra notamment de réduire la quantité de rivets et ainsi l'effort requis pour la désolidarisation d'un sous-ensemble particulier. Cependant, diminuer le nombre de rivets peut, à l'inverse, limiter l'accessibilité à un composant. Cette réduction de la modularité de l'appareil peut ainsi rendre une mise à niveau

---

[43] Suivant l'hypothèse de l'absence d'éventuels transferts de pollution pour chaque cas d'étude.

plus contraignante (CRIAQ, 2015). Une recommandation générée par cette étude, notamment pour de futurs appareils et procédés de mise à niveau, serait de porter une attention particulière à l'accessibilité des composants les plus à même de subir une opération de remplacement, de retrait ou de modification future. Cependant, les composites pourraient notamment engendrer de nouveaux types de problématiques, notamment liées à leur recyclage, plus difficile que pour l'aluminium (Yang et al., 2012).

Une des plus grandes difficultés rencontrées lors de la conduite du projet, et plus particulièrement la conduite de l'étude de cas présentée, a été l'accès à l'information. D'une part, la complexité des chaines logistiques du secteur aéronautique rend le processus d'acquisition d'information particulièrement sollicitant en termes de temps et de ressources. D'autre part, l'absence d'uniformité dans les processus de collecte d'information et le manque de données environnementales spécifiques se sont présentés comme des difficultés importantes. La confidentialité et le secret industriel ont également été des enjeux importants à prendre en considération lors de la manipulation de l'information disponible. L'implantation de processus de gestion de l'information des composants des appareils, reprenant notamment leur composition et masse, permettrait ainsi l'évitement des étapes d'analyses et de caractérisation en fin de vie. L'absence d'information de ce type peut également engendrer des pertes financières potentielles, afférentes à l'association d'une voie de traitement en fin de vie non appropriée, au regard du potentiel de revalorisation du composant.

4.2 Méthodologie développée

Cette seconde partie détaille l'opérationnalisation de la méthode dans une perspective industrielle ou de recherche. Le potentiel d'applicabilité de la méthode au sein de l'industrie est d'abord présenté. Une seconde sous-partie reprend les perspectives de développement futur et de complémentation avec d'autres méthodes d'évaluation.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

4.2.1 Potentiel pour l'industrie et la recherche

Pour un constructeur d'avions ou d'hélicoptères, et dans une optique d'écoconception, les résultats générés par le modèle permettent notamment la mise en évidence des opérations présentant une plus forte intensité négative sur l'éco-efficience d'un processus. Le nombre de tâches à effectuer pour accomplir une opération donnée permet de mettre en évidence les composants ayant une forte intensité de liaison, de manière à concentrer les efforts d'écoconception sur ceux-ci pour les conceptions futurs (Chien, 2011). Plusieurs mesures d'atténuation peuvent être testées afin d'estimer leur potentiel, via des boucles de rétroaction. La méthode permet ainsi une double assistance pour l'amélioration continue : en pré-production, via l'estimation des impacts liés aux choix de conceptions, mais aussi en post-production, notamment via l'identification des étapes les moins éco-efficientes dans les séquences d'opérations.

Pour un opérateur désireux de moderniser sa flotte d'appareils petit à petit, via un procédé de mise à niveau, la méthode offre la possibilité d'évaluer plusieurs scénarios et d'évaluer leur éco-efficience respective dans une optique de prioriser les appareils offrant le plus de gains potentiels (les appareils ne présentant pas tous le même nombre d'heures de vol et d'années de service). Dans une autre mesure, la méthode permet également d'estimer les coûts économiques et environnementaux des étapes de maintenance et de mise à niveau. Elle permet également une planification relative de la génération de matières résiduelles, et donc, d'anticiper les proportions envoyées aux différentes voies de revalorisation. Cette dernière considération prend une importance particulière dans l'éventualité de l'apparition de normes environnementales drastiques.

La difficulté d'accès à une information environnementale précise rend la conduite d'une analyse de cycle de vie précise complexe à déployer. Dans le cadre du présent projet, une analyse de cycle de vie aurait ainsi dû être effectuée pour deux appareils distincts (un appareil ordinaire et un appareil modernisé). La longue durée d'utilisation d'un appareil et les nombreux types d'usages possibles pour une machine augmentent grandement l'échelle

temporelle d'une telle évaluation. Les opérations de maintenance et de mise à niveau n'étant pas effectuées de la même manière d'une installation à une autre, il aurait été difficile de pouvoir les caractériser précisément selon une approche plus pratique. La méthode développée ici, incluant les paramètres, variables et aspects spécifiques de l'industrie aéronautique, apparait ainsi comme une solution rapide et peu coûteuse à l'industriel afin d'extraire des tendances générales d'un système de production ou d'un profil d'exploitation donné.

Le projet CRIAQ ENV-412, au moment de l'écriture de ces lignes, avait pour objectif de générer des informations spécifiques au traitement des aéronefs en fin de vie. Dans le cadre de la mise en place d'une plateforme de démantèlement, la méthode générée peut notamment prédire les gisements éventuels de matières résiduelles afférentes à l'utilisation d'un avion ou d'un hélicoptère, offrant ainsi une estimation des proportions de matériaux à retraiter. Ceci permettrait donc de déterminer des solutions de retraitement spécifiques, adaptées et dimensionnées pour la fin de vie des aérodynes au Canada, prenant en compte les masses critiques et les paramètres géographiques, économiques et environnementaux en vue d'une industrie circulaire (écologie industrielle). Également, les données d'inventaires des processus peuvent notamment être employées par les partenaires industriels et académiques du projet ENV-412, notamment dans le cadre de la réalisation d'inventaires de cycles de vie. Complémenter la méthode avec les résultats des autres recherches du projet présente ainsi un intérêt dans le cadre des objectifs fixés pour la recherche. L'approche cumulative employée par la méthode, permettrait notamment de compléter les travaux effectués sur le séquençage des activités de démantèlement (Camelot, 2012), le traitement en fin de vie de l'aluminium (Latrémouille-Viau, 2009) ou encore l'enlèvement sécuritaire des fluides d'aérodynes en fin de vie (Strehaiano, 2014).

4.2.2 Perspectives de développements futurs

Une amélioration potentielle de la méthode serait l'intégration de profils d'utilisation variables au cours de l'exploitation de l'appareil. Ces profils d'utilisation pourraient

notamment concerner le nombre d'heures accumulées sur une certaine unité de temps, ou encore le nombre de RIN considérés sur cette même unité de temps. Également, une possibilité de faire intervenir, pour chaque profil d'utilisation considéré, de multiples occurrences de moments auquel une mise à niveau ou un remplacement est effectué, permettrait la mise en évidence du moment optimal pour la conduite des opérations. Cette recherche de l'optimum pourrait être effectuée de manière totalement automatisée, via l'emploi d'un algorithme logiciel, simulant l'ensemble des possibilités et sélectionnant celles correspondantes le plus aux critères de l'opérateur ou du constructeur.

Le présent projet n'a pas eu pour objectif d'intégrer des paramètres liés à l'usage en vol de l'appareil. Cependant, l'ajout d'un module d'opération en vol serait une addition intéressante à la méthode; celui-ci permettrait notamment de regrouper l'ensemble des considérations associées à la phase d'utilisation de l'appareil, au sein d'un même modèle. Comme la plupart des études effectuées sur le sujet considèrent la phase d'utilisation en vol d'un appareil comme étant responsable de plus de 90 % des émissions de gaz à effet de serre à l'échelle de son cycle de vie (de Oliveira Fernandes, 2010; Krieg et al., 2012), l'inclusion de ces considérations pourrait notamment conclure sur l'éventualité d'un transfert de pollution entre les différentes phases pour les scénarios étudiés.

La méthode se voulant générique, et, en raison de leur caractère imprévisible, l'inclusion d'opérations spéciales telles que les opérations de rénovations d'intérieurs (en anglais : *refurbishing*) ou de modernisation des systèmes de bord, n'a pas été prévue par la méthode. Cependant, ces opérations sont fréquentes au cours de la vie utile d'un appareil. L'acquisition d'une documentation de maintenance exhaustive, pour un type d'usage donné, pourrait ainsi permettre l'estimation d'un nombre moyen d'occurrences de ces opérations, en vue de leur considération future par la méthode.

De manière à affiner la sensibilité de la méthode au niveau des composants et de permettre ainsi l'étude de leurs critères structuraux et fonctionnels (adaptabilité au désassemblage et réassemblage, potentiel de mise à niveau, etc.), la méthode pourrait être complémentée avec

des outils et méthodes tels que EDIT, D4N, EDST, MAAP et LCP (Pigosso et al., 2010). Certains de ces outils prennent notamment en charge les impacts environnementaux liés à la remise à neuf d'un produit. Également, ils considèrent le composant en termes de sous-ensembles, permettant de générer un séquençage optimal des opérations. Finalement, ceux-ci génèrent des rapports de recommandations pour l'optimisation du composant dans une optique d'écoconception. La méthode pourrait également venir complémenter d'autres approches, notamment les outils d'analyse du cycle de vie économique, permettant ainsi d'intégrer une dimension environnementale aux résultats générés par de telles solutions.

Finalement, la prise en considération de paramètres économiques supplémentaires tels que l'inflation, la dépréciation de la valeur de l'appareil au cours du temps et l'augmentation des coûts de maintenance attribuables au vieillissement de la machine permettrait d'affiner la précision des résultats générés. Les approches d'anticipations des coûts de maintenance et de réparation à l'image des méthodes LTD (*Life-to-Date Repair Costs)* et PCB (*Period-Cost-Based*) utilisées dans le modèle de coût cumulatif[44] permettraient notamment une meilleure compréhension de l'influence de l'âge de l'appareil sur le coût global des opérations de maintenance (Mitchell et al., 2011).

4.2.3 Potentiel d'application à d'autres industries

La méthode présentée ici, bien qu'orientée vers le secteur aéronautique, est générale conceptuellement; elle peut à cet effet, être employée pour d'autres types d'applications industrielles.

Au sein du secteur automobile, la conservation fréquente des mêmes châssis et de certains éléments des transmissions, des moteurs ou encore des garnitures, pourrait permettre l'instauration de procédés de mise à niveau des véhicules à l'avenir (Warsen et al., 2011; Subramoniam et al., 2009). La méthode permettrait de vérifier l'intérêt, en termes d'éco-efficience, d'effecteur la transition d'une voiture produite antérieurement vers un nouveau

---

[44] En anglais : *Cumulative Cost Model (CCM).*

modèle évolué. La méthode pourrait aussi être utilisée pour d'autres types de véhicules, dans des considérations similaires, tels que les trains, bateaux et camions.

Hors du domaine des transports, de nombreux appareils électroniques, tels que les téléphones intelligents ou les ordinateurs, connaissent des améliorations fréquentes de leurs performances techniques. Certains d'entre eux ne connaissent cependant pas d'évolution majeure du point de vue de la conception extérieur d'une version à une autre[45]. Un constructeur pourrait ainsi être amené, dans une perspective de réduction des coûts, à mettre en place des programmes de récupérations des anciens appareils pour revente postérieure après mise niveau des composants internes. Également, ceux-ci peuvent envisager la mise en place de programmes de prêts et d'échange sous contrat, permettant à la compagnie manufacturière de conserver la propriété de l'appareil, tout en garantissant son fonctionnement et sa modernisation au client, à l'image du modèle d'affaire de crédit-bail[46] employé par l'entreprise Xerox (Kerr et Ryan, 2001). Finalement, certains de ces appareils évoluent vers des designs modulaires, à l'image du Google Ara Project (Project ARA, 2015). Ces designs permettent une personnalisation plus importante par l'utilisateur, ainsi que la mise à niveau progressive des composants à mesure de leur sortie sur le marché. Dans le cadre de ces modèles d'affaires, la confirmation de la validité de l'approche de remise à neuf avec mise à niveau est importante pour le constructeur afin d'atteindre une rentabilité certaine. La méthode permettrait ainsi un premier niveau d'évaluation de l'éco-efficience générale de ces procédés, permettant à l'entreprise d'identifier des gains environnementaux ou des transferts de pollution éventuels.

---

[45] Exemple : évolution de l'Apple iPhone 4 en Apple iPhone 4S : malgré l'évolution technologique en interne de l'appareil, le design extérieur demeure pratiquement inchangé.
[46] En anglais : leasing.

CONCLUSION

La dynamique particulière de l'industrie de l'hélicoptère civil léger non pressurisé, ainsi que les conceptions modulaires des appareils, favorise leur maintien continu en opération. En tant qu'alternative à leur disposition une fois arrivés en fin d'utilisation, les hélicoptères présentent la possibilité de faire moderniser leur structure et leurs équipements de manière plus ou moins intensive. Parmi les procédés existants, certains proposent le passage d'une ancienne version d'un appareil vers la dernière version en date, permettant le réemploi de l'appareil et la modernisation de ses performances. Cette dynamique apparait comme une approche sensible au concept d'éco-efficience.

Par le présent travail, une méthodologie complète a été mise au point, de manière à identifier la plus-value éventuelle en termes d'éco-efficience de la remise à neuf d'appareils en opposition avec leur remplacement lorsqu'un opérateur en présente le besoin. Celle-ci permet d'effectuer un premier niveau d'évaluation des différents processus d'assemblage et de mise à niveau de l'appareil afin d'identifier l'alternative la plus éco-efficiente selon des critères donnés. Un second niveau d'évaluation permet l'observation des implications de la conduite de tels procédés, cette fois-ci à l'échelle de la vie utile de l'appareil après travaux.

La méthode mise en place a ensuite été employée dans le cadre d'une étude de cas d'un procédé de mise à niveau d'appareils actuellement en opération. La première partie de l'étude a montré que la mise à niveau d'un appareil, en opposition avec son remplacement, pouvait réduire les coûts d'achat de l'ordre de 51 %, tout en affichant une réduction de 77,5 % de la masse résiduelle destinée à l'enfouissement, via notamment la conservation de 80,1% de la masse de l'appareil initial. Une réduction de l'ordre de 54 % de l'intensité énergétique nécessaire pour le processus a également été observée. Ces bénéfices en termes d'éco-efficience à l'échelle des processus ont notamment été quantifiés à l'échelle de plusieurs cycles d'exploitation de l'appareil, selon différents profils d'utilisation potentiels. Les résultats montrent une diminution de la durée totale d'immobilisation de l'appareil pour

maintenance après mise à niveau, ainsi qu'une réduction globale des coûts de ces opérations et de l'intensité énergétique nécessaire à leur conduite. Dans certains des scénarios étudiés, la mise à niveau permet, malgré l'investissement initial nécessaire, un retour sur investissement avant 20 années d'exploitation. L'étude a finalement déterminé que la mise à niveau d'un hélicoptère civil léger non pressurisé permet des gains importants sur cinq des sept éléments au cœur du concept d'éco-efficience, soit la réduction des intensités matérielles et énergétiques nécessaire à la fabrication de l'appareil, l'augmentation de la recyclabilité de ses matériaux, ainsi que l'extension de sa durée de vie d'un produit et l'augmentation de son intensité de service.

La méthode développée se présente comme un outil d'évaluation de la performance environnementale d'un aérodyne à destination des constructeurs et opérateurs d'appareils. Elle peut notamment offrir une fonction d'assistance à l'écoconception et à l'optimisation des pratiques de maintenances, via l'identification des composants et des opérations présentant un impact négatif important sur la performance générale des processus. Elle peut également trouver des applications dans le cadre de la gestion en fin de vie des matériaux résiduels, permettant l'estimation du bagage résiduel accumulé par un appareil au cours de sa vie utile. Les travaux réalisés durant ce projet de maîtrise viennent également complémenter les résultats de recherche générés par le projet CRAQ ENV-412 et plus particulièrement en ce qui concerne les spécificités de la gestion de la fin de vie des composants d'hélicoptères, pour laquelle il est nécessaire d'employer une approche de quantification cumulative à l'échelle du cycle d'exploitation complet de l'appareil. Les travaux effectués ouvrent également la voie à l'application de la méthode dans d'autres domaines rencontrant des problématiques du même ordre, tels que l'automobile ou l'électronique.

ANNEXE I

IDENTIFICATION DES ENTITÉS FONCTIONNELLES ET DES FLUX À L'ÉCHELLE DU SYSTÈME

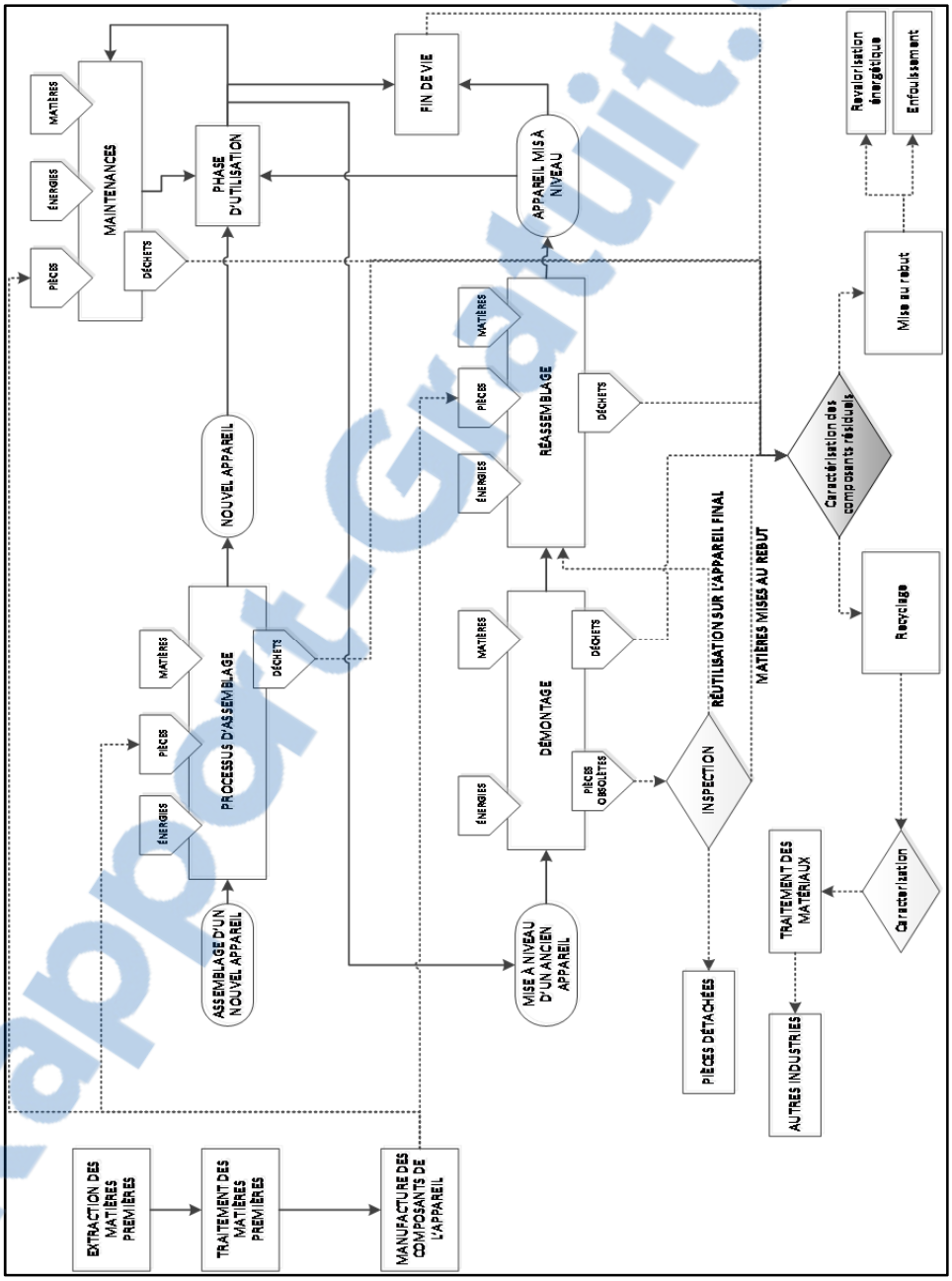


Figure-A I-1: Bilan des entités fonctionnelles et flux à l'échelle du cycle de vie

Rapport-Gratuit.com

ANNEXE II

FEUILLE DE COLLECTE D'INFORMATION SUR L'APPAREIL DU PROJET ENV-412 (ÉTUDE DE LA FIN DE VIE)

CTA — CRIAQ ENV-412 | **Fiche de collecte d'informations** [redacted] | IM: [redacted] SN: [redacted] — ÉTS

Date : / / | **Intervenant(s) :** | ☐ Complété sur Base de D.

Identification Réf ENV-412: **H**

P/N :

Description (nom) :

Type :

Nombre : Réf. Photo :

IPB Fig : - Page : Num. :

Caractéristiques ☐ Pièce critique ☐ Durée de vie limitée

Longueur : Diamètre :

Largeur : Épaisseur :

Hauteur : Poids :

Matériaux :

Raison du démontage : ☐ UPGR ( ): ☐ Repl ☐ Mod ☐ Remov ☐ Upg. | ☐ Accès | ☐ Maint. ☐ A/C Mlog

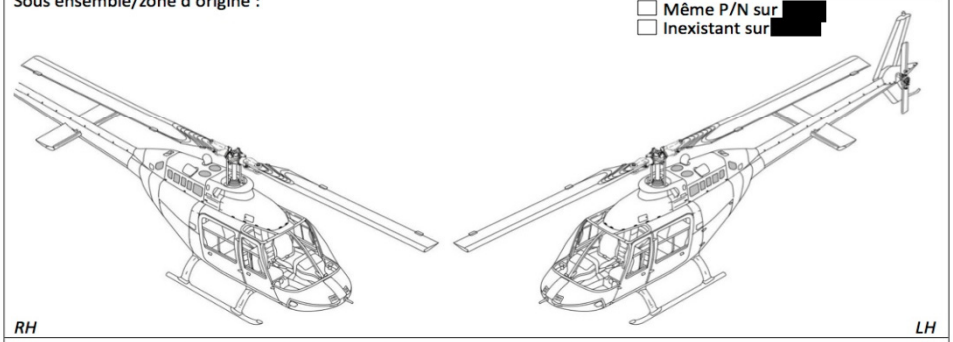
Danger(s) potentiel(s) : ☐ Non ☐ **OUI** :

Provenance de la pièce [redacted] P/N équivalent :

Sous ensemble/zone d'origine :

☐ Même P/N sur [redacted]

☐ Inexistant sur [redacted]



État physique initial et dommage(s) éventuel(s) : ☐ Pas de dommages apparents ☐ Usure ☐ Tr. rivets élargis

☐ Fissure(s) ☐ Trous ☐ Impact(s) ☐ Autre :

Décision après démontage : ☐ Retour sur A/C ☐ Réparation ☐ Reman. ☐ Condamnée ☐ **N/D**

Détails :

---------- NOTES ----------

Figure-A II-1: Fiche de collecte d'informations (recto)

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

H

DÉMONTAGE	REMONTAGE
Accessibilité : ☐ Déjà démonté ☐ Directe ☐ Indirecte	☐ Pièce d'origine ☐ Pièce nouvelle ☐ Non remontée
Démontages antérieurs / opérations préalables :	**Opération(s) préalable(s) nécessaire(s) :** ☐ Nettoyage ☐ Réparation
Détail des opérations :	**Détail des opérations :**
Temps et Nb de personne : ☐ *min* ☐ *pers.*	**Temps et Nb de personne :** ☐ *min* ☐ *pers.*
Éléments annexes retirés (fixations, attaches, etc.) :	**Éléments annexes ajoutés (fixations, attaches, etc.) :** ☐ Réutilisation des éléments retirés : ☐ Remplacement à neuf des éléments retirés :
Si dommage(s) durant démontage, détailler : Nature : Cause :	Autre : **Si dommage(s) durant remontage, détailler :** Nature : Cause :
Outils/équipements spéciaux utilisés :	**Outils/équipements spéciaux utilisés :**
Consommables utilisés (qtés) : ☐ Chiffons ( ) ☐ Gants ( ) ☐ Nettoyant ( ) ☐ Acétone ☐ Absorbant ☐ Dégraissant ( ) Autre(s) :	**Consommables utilisés (qtés) :** ☐ Chiffons ( ) ☐ Gants ( ) ☐ Nettoyant ( ) ☐ Acétone ☐ Absorbant ☐ Dégraissant ( ) Autre(s) :
Remarque(s) additionnelle(s) :	**Remarque(s) additionnelle(s) :**

Figure-A II-2: Fiche de collecte d'informations (verso)

ANNEXE III

MESURE DE LA COMPOSITION DES MATÉRIAUX PAR SPECTROMÉTRIE DE FLUORESCENCE X

Figure A-III-1 : Thermo Fischer Scientifics XL2 980

Figure A-III-2: Lecture de la composition des matériaux

ANNEXE IV

CONSOMMABLES IDENTIFIÉS ET CONSIDÉRÉS DANS L'ÉTUDE DE CAS

Tableau-A-IV-1: Consommables identifiés

TYPE DE CONSOMMABLES	UNITÉS DE MESURES
Graisse *(grease)*	oz
Fluide hydraulique *(hydraulic fluid)*	L
Huile moteur *(engine lubricant oil)*	L
Lubrifiant de transmission *(transmission lubricant)*	L
Pellicule chimique *(chemical film material)*	L
Composant de prévention de la corrosion *(corrosion preventive compound)*	L
Epoxy Polyamide Primer	mL
Shellac Varnish	L
Polyurethane Enamel	L
Clear	L
Sealant	L
Solvent nettoyage à sec *(Drycleaning Solvent)*	oz
Aliphatic Naphta	L
Acetone	L
Adhésif *(Adhesive)*	g
Edge/Collant pour décalque *(Edge/Decal Sealer)*	mL
Papier de verre *(Abrasive Cloth/Paper)*	unités
Jet Fuel	L
Eau	L

ANNEXE V

MATÉRIAUX ET ÉLÉMENTS DE FIXATION CONSIDÉRÉS DANS L'ÉTUDE DE CAS

Tableau-A-V-1: Matériaux identifiés (composants)

MATÉRIAUX
Aluminium – alliage 2024
Aluminium - alliage 6061
Aluminium - alliage 7075
Composite nid d'abeille, fibre de verre *(Honeycomb Core Composite, Ply Glass Fabric)*
Titanium
Plastique acrylique *(Acrylic Plastic)*
Polycarbonate
Acier *(Steel)*
Cuivre *(Copper)*
Tapis, moquette *(Trim : Carpets)*
Plastiques *(Trim : Plastics)*
Tissus et autres textiles *(Trim : Fabrics)*
Autres composants *(Others)*

Tableau-A-V-2: Éléments de fixations identifiés et leurs matériaux

ÉLÉMENTS DE FIXATIONS	TYPE DE MATÉRIAUX CONSIDÉRÉ
Rivets	Aluminium / Titanium / Acier
Écrous *(nuts)*	Acier
Supports, crochets *(brackets)*	Acier
Vis *(screws)*	Acier
Rondelles *(washers)*	Acier / Aluminium
Boulons *(bolts)*	Acier / Aluminium
Broches *(pins)*	Acier
Attaches, pinces *(clamps)*	Acier

ANNEXE VI

DONNÉES GÉNÉRÉES POUR LES PROCESSUS D'INSPECTIONS ANTICIPÉS DANS LE CADRE DE L'ÉTUDE DE CAS

Tableau A-VI-1 : Données des processus d'inspections anticipées considérés

MAINTENANCE OCCURENCE TYPES	TOTAL DURATION (Hours)		CUMULATED HOURS WORKED BY WORKERS		GHG Emissions (in kg of Co2 Eq)		ENERGY TOTAL (MJ)		TOTAL COST OF MAINTENANCE OPERATION	
	APPAREIL A	APPAREIL B	APPAREIL A	APPAREIL B	APPAREIL A	APPAREIL B	APPAREIL A	APPAREIL B	APPAREIL A	APPAREIL B
1	**16.5**	15.8	**19.0**	17.8	**86.8**	82.7	**2.85E+03**	2.72E+03	**2,684.54 $**	2,639.35 $
2	7.6	7.6	7.6	7.6	40.1	40.1	1.32E+03	1.32E+03	1,195.65 $	1,195.65 $
3	**3.0**	*NÉANT*	**3.0**	*NÉANT*	**15.7**	*NÉANT*	**5.18E+02**	*NÉANT*	**408.33 $**	*NÉANT*
4	2.7	2.7	3.2	3.2	14.3	14.3	4.72E+02	4.72E+02	213.29 $	213.29 $
5	1.2	1.2	1.2	1.2	6.1	6.1	2.01E+02	2.01E+02	122.13 $	122.13 $
6	1.2	1.2	1.2	1.2	6.5	6.5	2.13E+02	2.13E+02	124.54 $	124.54 $
7	1.0	1.0	1.0	1.0	5.2	5.2	1.73E+02	1.73E+02	116.11 $	116.11 $
8	0.8	0.8	0.8	0.8	4.0	4.0	1.32E+02	1.32E+02	107.69 $	107.69 $
9	*NÉANT*	1.6	*NÉANT*	**1.6**	*NÉANT*	**8.5**	*NÉANT*	**2.79E+02**	*NÉANT*	**138.38 $**
10	0.2	0.2	0.2	0.2	0.9	0.9	2.88E+01	2.88E+01	86.02 $	86.02 $
11	**1.0**	0.8	**1.0**	0.8	**5.0**	3.9	**1.64E+02**	1.29E+02	**114.31 $**	107.08 $
12	**2.1**	0.5	**2.1**	0.5	**10.8**	2.8	**3.57E+02**	9.20E+01	**174.63 $**	119.26 $
13	**4.4**	3.3	**4.4**	3.3	**23.1**	17.1	**7.59E+02**	5.61E+02	**238.89 $**	197.36 $
14	*NÉANT*	1.9	*NÉANT*	**1.9**	*NÉANT*	10.1	*NÉANT*	3.34E+02	*NÉANT*	149.81 $
15	1.5	1.5	1.5	1.5	7.8	7.8	2.56E+02	2.56E+02	133.56 $	133.56 $
	hours		work hours		kg of CO2 Eq		kJ		USD	

Note : Les coûts présentés ici n'incluent pas les coûts des composants à durée de vie limitée : ces composants sont considérés avoir leur propre occurrence, indépendamment des occurrences d'inspections.

Rapport-Gratuit.com

ANNEXE VII

DONNÉES BRUTES GÉNÉRÉES (CYCLES D'EXPLOITATION)

Tableau A-VII-1 : Bilan de l'étude de cas (cycles d'exploitation, récurrences des maintenances)

BILAN DES CYCLES D'OPÉRATIONS (RIN = 3,8 / HEURE DE VOL) - PÉRIODE D'ÉTUDE DE 40 ANS						
Scénarios	**Nombre total de récurrences de processus**					
	Inspections anticipées			**Remplacement de composants à durée de vie limitées**		
	Appareil A	**Appareil B**	**TOTAL**	**Appareil A**	**Appareil B**	**TOTAL**
300 H DE VOL / AN						
A_300	2 480	NÉANT	**2 480**	71	NÉANT	**71**
B_300	NÉANT	2 468	**2 468**	NÉANT	67	**67**
300_10	558	1 908	**2 466**	10	46	**56**
300_20	1 116	1 294	**2 410**	29	32	**61**
300_30	1 783	676	**2 459**	46	13	**59**
600 H DE VOL / AN						
A_600	2 707	NÉANT	**2 707**	130	NÉANT	**130**
B_600	NÉANT	2 702	**2 702**	NÉANT	123	**123**
600_10	606	2 092	**2 698**	24	91	**115**
600_20	1 283	1 416	**2 699**	54	59	**113**
600_30	1 960	740	**2 700**	89	28	**117**
1 200 H DE VOL / AN						
A_1200	3 236	NÉANT	**3 236**	267	NÉANT	**267**
B_1200	NÉANT	3 217	**3 217**	NÉANT	252	**252**
1200_10	726	2 491	**3 217**	54	190	**244**
1200_20	1 535	1 687	**3 222**	120	128	**248**
1200_30	2 344	882	**3 226**	188	62	**250**

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Tableau A-VII-2: Bilan de l'étude de cas (cycles d'exploitation, indicateurs de suivi de performance)

BILAN DES CYCLES D'OPÉRATIONS (RIN = 3,8 / HEURE DE VOL) - PÉRIODE D'ÉTUDE DE 40 ANS					
Scénarios	**Durée totale cumulative d'immobilisation au sol (heures)**	**Coût total cumulatif des activités (USD)**	**Consommation d'énergie cumulative (MJ)**	**Émissions totales de gaz à effet de serre (kg CO2 eq.)**	**Masse total résiduelle de composants générée durant l'exploitation (lb)**
300 H DE VOL / AN					
A_300	4 990	2 891 697 $	8,61E+08	2,62E+04	294,5
B_300	4 858	2 351 753 $	8,38E+08	2,55E+04	297,7
M_300_10	5 967	3 137 099 $	1,03E+09	3,13E+04	637,9
R_300_10	7 268	4 336 665 $	1,25E+09	3,81E+04	1096,9
M_300_20	5 999	3 347 407 $	1,03E+09	3,15E+04	703,7
R_300_20	7 300	4 546 973 $	1,26E+09	3,83E+04	1162,7
M_300_30	6 033	3 390 529 $	1,04E+09	3,17E+04	640,5
R_300_30	7 334	4 590 095 $	1,27E+09	3,85E+04	1099,5
600 H DE VOL / AN					
A_600	7 414	5 502 132 $	1,28E+09	3,89E+04	618,4
B_600	7 127	4 414 816 $	1,23E+09	3,74E+04	629,2
M_600_10	8 272	5 432 039 $	1,43E+09	4,34E+04	1004,1
R_600_10	9 573	6 631 605 $	1,65E+09	5,02E+04	1463,1
M_600_20	8 343	6 220 855 $	1,44E+09	4,38E+04	997,0
R_600_20	9 644	7 420 421 $	1,66E+09	5,06E+04	1456,0
M_600_30	8 414	5 899 744 $	1,45E+09	4,41E+04	993,9
R_600_30	9 715	7 099 310 $	1,68E+09	5,10E+04	1452,9
1 200 H DE VOL /AN					
A_1200	12 292	10 895 103 $	2,12E+09	6,45E+04	1285,8
B_1200	11 719	8 668 815 $	2,02E+09	6,15E+04	1301,0
M_1200_10	12 931	9 847 540 $	2,23E+09	6,79E+04	1667,8
R_1200_10	14 232	11 047 106 $	2,46E+09	7,47E+04	2126,8
M_1200_20	13 075	10 515 149 $	2,26E+09	6,86E+04	1667,2
R_1200_20	14 376	11 714 715 $	2,48E+09	7,54E+04	2126,2
M_1200_30	13 216	10 975 173 $	2,28E+09	6,93E+04	1626,8
R_1200_30	14 517	12 174 739 $	2,50E+09	7,62E+04	2085,8

ANNEXE VIII

STRUCTURE DU MODÈLE LOGICIEL IMPLÉMENTÉ POUR L'ÉTUDE DE CAS

Dans le cadre de cette étude, la méthode a été mise en place via la création d'un outil numérique, présenté à la figure A-VIII-1. Celui-ci se base sur le logiciel Microsoft Excel®, choisit pour sa simplicité dans l'édition des données par l'utilisateur et pour sa grande portabilité. Le langage VBA vient complémenter les fonctions de base de Microsoft Excel®.

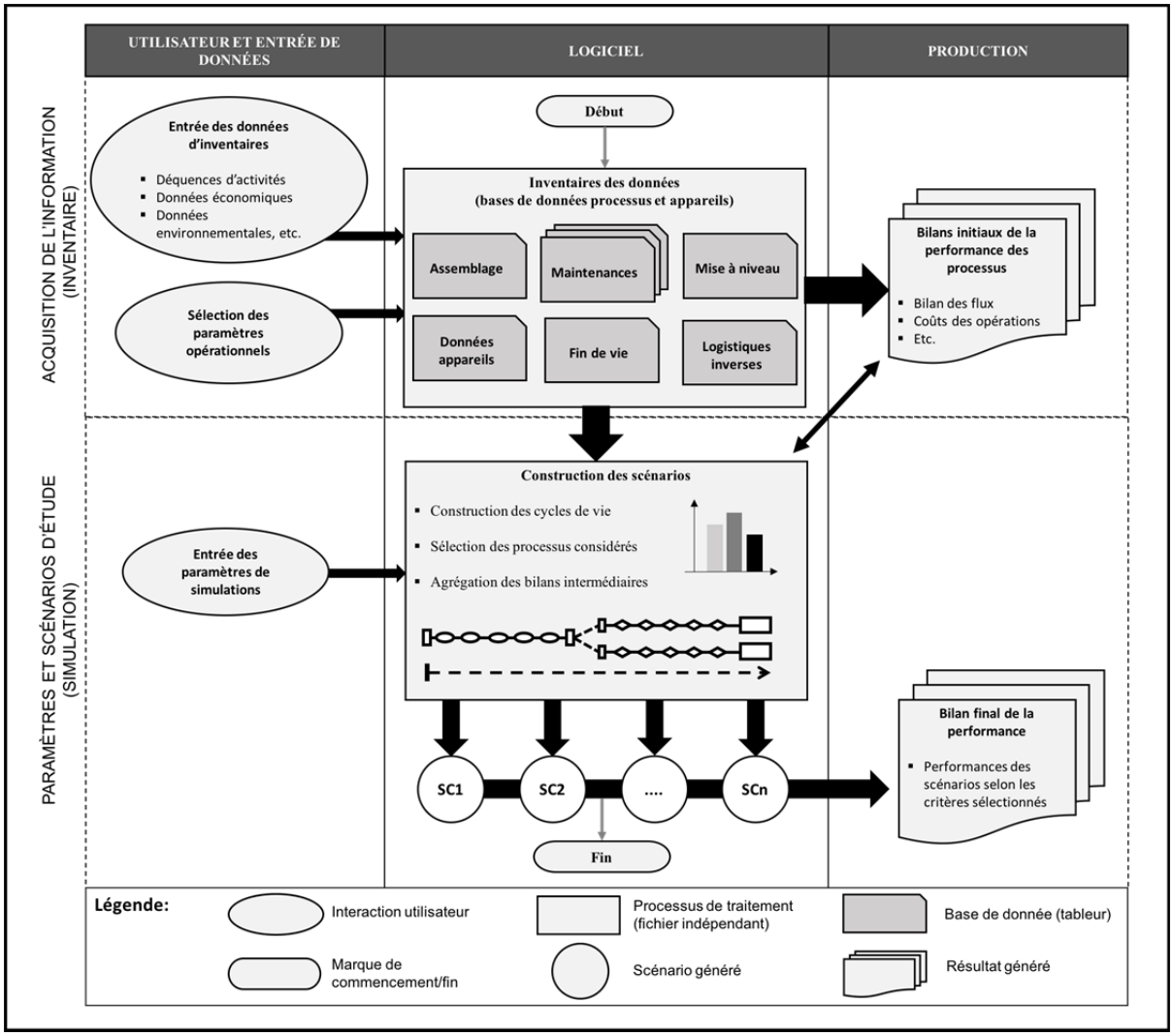


Figure A-VIII-1: Structure et fonctionnement général du modèle logiciel développé

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Adler, D. P., V. Kumar, P. A. Ludewig et J. W. Sutherland. 2007. « Comparing energy and other measures of environmental performance in the original manufacturing and remanufacturing of engine components ». In 2007 ASME International Conference on Manufacturing Science and Engineering, January 15, 2007 - October 18, 2007. (Atlanta, GA, United states), p. 851-860. Coll.
« Proceedings of the ASME International Manufacturing Science and Engineering Conference 2007, MSEC2007 »: American Society of Mechanical Engineers.

Aircraft Fleet Recycling Association (AFRA), 2013. *Best Management Practice for Management of Used Aircraft Parts and Assemblies and for Recycling of Aircraft Materials.* Version 3.1 du 11 Juillet 2013. 110 p.

AFRA/ASA Annual Conference 2014. June 2014 (Washington, DC, USA). *Proceedings of the AFRA/ASA 2014 Annual Conference.* Documents multiples.

Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME), 2006. *Etude de la Fin de Vie des moyens de Transport en France (Hors VHU)*. 161 p.

Airbus. 2015. « Eco-efficiency: creating more value with less impact on the environment ». In *Site Web d'Airbus*. En Ligne. <http://www.airbus.com/company/eco-efficiency/>. Consulté le 32 mai 2015.

Airbus EADS. Airbus Corporate Answer to Disseminate Environmental Management System (ACADEMY). *Minimizing environmental impact in aircraft maintenance operations.* Eco-efficiency and sustainability – G8 – Issue 1. 12 pages.

Airbus Helicopters. 2015. *EC135 Upgrades brochure.* En ligne. <http://www.airbushelicopters.ca/wp-content/uploads/2011/11/EC135-Upgrades.pdf>. Consulté le 19 février 2014.

Air Transat, 2014. « Une première au Canada: Air Transat et Aerocycle jettent les bases d'un programme de démantèlement écoresponsable d'avions commerciaux ». En Ligne. <http://communiques-presse.transat.com/2014-01-16-Une-premi-re-au-Canada-Air-Transat-et-Aerocycle-jettent-les-bases-dun-programme-de-d-mant-lement-coresponsable-davions-commerciaux>. Consulté le 20 juillet 2015.

Arnaud, Gilles et Phillippe Grison. 2013. « Towards greener helicopters ». CEAS Aeronautical Journal. En ligne. Vol 4, Iss 3, p. 291-299. <http://link.springer.com/article/10.1007/s13272-013-0073-0>. Consulté le 20 octobre 2013.

Ascend Flightglobal Consultancy, 2014. *Helicopter values outlook 2014.* En ligne. <http://www.ascendworldwide.com/2014/03/helicopter-values-outlook-2014.html>. Consulté le 12 Avril 2015.

Asmatulu, Eylem, Michael Overcash et Janet Twomey. 2013. « Recycling of Aircraft: State of the Art in 2011 ». Journal of Industrial Engineering, vol. 2013, p. 1-8.

Bell Helicopter Textron. 2014. *206L LongRanger Upgrade Program Brochure*. En Ligne. <http://www.bellhelicopter.com/MungoBlobs/811/413/206L4_CSS_Upgrade_022013-Web.PDF>. Consulté le 17 février 2014.

Bell Helicopter Textron, 2003. *Information Letter GEN-03-94*. En Ligne. <http://www.bellcustomer.com/files/Storage/IL%20GEN-03-94%20.pdf>. Consulté le 17 juillet 2015.

Bejarano, Carlos. 2011. « Environment Impact Assessment of the Operation of Conventional Helicopters at Mission Level ». En ligne. <https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/handle/1826/7167>. Consulté le 20 octobre 2013.

« Bluecopter Technology ». 2013. Bluecopter Technology by Eurocopter. Eurocopter. En ligne. <http://www.bluecopter.com/site/en/ref/Bluecopter-Technology_44.html>. Consulté le 20 octobre 2013.

Wiehner R. Carmen. Brevart Teaching and Research Laboratories. *Hazardous Waste Curriculum for Aviation Maintenance. 96 p.*

Caillet, Renaud (CIRANO). *Analyse multicritère : Étude et comparaison des méthodes existantes en vue d'une application en analyse de cycle de vie.* Centre Interuniversitaire de recherche en analyse des organisations (CIRANO). 2003. 52 p.

Camelot, Aurore. 2012. « Aide à la décision pour la récupération de pièces réutilisables sur un avion en fin de vie ». Mémoire de maîtrise en génie mécanique, Montréal, École Polytechnique de Montréal, 124 p.

Centre for Remanufacturing & Reuse (CRR). 2009. *Remanufacturing in the UK: A snapshot of the remanufacturing industry in the UK in 2009.* 108 p.

Chandler, David L. 2011. « When is it worth remanufacturing? ». MIT news. Massachusetts Institute of Technology. En ligne. <http://Enligne.mit.edu/newsoffice/2011/remanufacturing-0516.html>. Consulté le 20 octobre 2013.

Chapman, Adrian, Caroline Bartlett, Ian McGill, David Parker, et Ben Walsh. 2009. «Remanufacturing in the UK A snapshot of the UK remanufacturing industry». CRR Centre for Remanufacturing & Reuse. Centre for Remanufacturing and Reuse. En ligne. 108 p. http://www2.wrap.org.uk/downloads/2009REman1.01c8188a.8948.pdf. Consulté le 20 octobre 2013.

Chien, Joshua M. 2011. «Reduction of End-of-Life Impacts Through Design for Disassembly (DfD)». Berkeley, University of California. En ligne. <http://lma.berkeley.edu/posters/201106josh-poster.pdf>. Consulté le 28 juillet 2015.

Conklin & de Decker Aviation Information. 2015. « Product Sub Pages : Life Cycle Cost (LCC) ». In *Conklin & de Decker website.* En ligne. <https://www.conklindd.com/t-Productsaircraftfinanceandcostevaluationaircraftlifecyclecost.aspx>. Consulté le 24 février 2015.

Conklin & de Decker Aviation Information. 2015. « Three thoughts on market depreciation ». In *Conklin & de Decker website.* En Ligne. <https://www.conklindd.com/t-threethoughtsonmarketdepreciation.aspx>. Consulté le 15 avril 2015.

CORINE, 2015. « Conception Optimisée pour la Réduction de l'Impact des Nuisances Environnementales ». En Ligne. < http://www.corinecodesign.eu>. Consulté le 13 mars 2015.

Corrigan, James. 2012. « Designing for the Environment (DfE) – Bell Helicopter's Perspective. GARDN Second Annual Conference, 26th September 2012 ». En ligne. 31 p. <http://flygreen.info/wp-content/uploads/2012/10/bhtc_jcorrigan_ppt.pdf>. Consulté le 13 février 2014.

Costes, Bruno. «PAMELA - Process for Advanced Management of End of Life of Aircraft». En ligne. 12 p. <http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=home.showFile&rep=file&fil=ACADEMY_PAMELA.pdf>. Consulté le 20 octobre 2013.

Crick, David. Lloyds Asset Services. 2014. « Appraising Helicopters – Why They're Different ». Helicopter Finance Asia 2014. 66 p.

Defense Helicopter. 2010. « Merlin's second coming ». Defense Helicopter nO 2, vol. 29. P 20-25.

U.S. Environemental Protection Agency (EPA), 2006. *Life cycle assessment : Principles and practices.* 88 p.

« Eurocopter EC 135 ». 2013. Aerospace-technology.com. Net Resources International. En ligne. <http://www.aerospace-technology.com/projects/ec_135/>. Consulté le 20 octobre 2013.

Federal Aviation Administration (FAA), U.S. Department of Transportation. *Aviation Environmental and Energy Policy Statement.* 2012. 9 p.

Federal Aviation Administration (FAA), U.S. Department of Transportation. *Helicopter Flying Handbook (FAA-H-8083-21A)*, 2012. Flight Standards Service. 198 p.

Federal Aviation Administration (FAA), U.S. Department of Transportation. *Recycling, Reuse and Waste Reduction at Airports: A Synthesis Document.* 2013. 52 p.

Frost & Sullivan, 2012. *Global Civil and Military Helicopter Market: Helicopter Manufacturers to Stand the Test of Financial Volatility*. 10 p.

Fukushige, Shinichi, Kazuhiro Yamamoto et Yasushi Umeda. 2012. «Lifecycle scenario design for product end-of-life strategy». Journal of Remanufacturing, vol. 2, no 1, p.1.

Frosch, R.A. et N. Gallopoulos. 1989. « Strategies for manufacturing ». Scientific American 261 (3). p. 144-152.

General Aviation Manufacturers Association, 2014. *General Aviation Statistical Databook & 2015 Industry Outlook*. 64 p.

Georgiadis, Patroklos et Maria Besiou. 2009. « Environmental and economical sustainability of WEEE closed-loop supply chains with recycling: a system dynamics analysis ». The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 47, no 5-8, p. 475-493.

Graedel, T.E., T. Lanzano, W. Pott et R.J. Araujo. 2005. «Multiscale Life-Cycle Assessment». Yale School of Forestry & Environmental Studies.

Helicopters Magazine. 2015. « Depreciation – Fact or Fiction? ». In *Helicopters Magazine website.* En ligne. *<https://www.helicoptersmagazine.com/content/view/85/38/>*. Consulté le 27 avril 2015.

Hu, Yawei, Shujie Liu, Huitian Lu et Hongchao Zhang. 2014. « Remaining useful life assessment and its application in the decision for remanufacturing ». In 21st CIRP Conference on Life Cycle Engineering, CIRP LCE 2014. Vol. 15, p. 212-217. Coll. «Procedia CIRP»: Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2014.06.052>.

Ijomah, Winifred L, Steve Childe, et Chris McMahon. 2004. « Remanufacturing: A Key Strategy for Sustainable Development ». University of Bath. 13 pages.

Illinois Sustainable Technology Center, 2009. *Life Cycle Analysis : A Step by Step Approach.* Institute of Natural Resource Sustainability, University of Illinois at Urbana-Champaign. 27 p.

Jackson W Randall, Choi Taelim et Nancey Green Leigh. 2008. « Recycling and Remanufacturing in Input-Output Models ». In *47th Southern Regional Science Annual Meeting.* (Arlington, VA-Washington, DC, March 28, 2008). 10 p.

Janin M., 2000. « Démarche d'éco-conception en entreprise – Un enjeu : construire la cohérence entre outils et processus ». Thèse de doctorat. ENSAM Chambéry, France. 413 p.

Joshi, Satish. 2000. « Product Environmental Life-Cycle Assessment Using Input-Output Techniques ». *Journal of Industrial Ecology,* volume 3, n° 2 et 3. P. 95-120.

H. Krieg, R. Ilg, L. Brethauer et F. Loske. 2012. « Enviromental impact assessment of aircraft operation: A key for greening the aviation sector *». Aerotecnica Missili & Spazio, The Journal of Aerospace Science, Technology and Systems,* vol. 91, n. ¾, p. 73-78.

Kerr, Wendy et Chris Ryan. 2001. «Eco-efficiency gains from remanufacturing. A case study of photocopier remanufacturing at Fuji Xerox Australia ». Journal of Cleaner Production, Vol 9, Issue 1, p. 75-81.

Kobayashi, H. 2005. « Strategic evolution of eco-products: a product life cycle planning methodology ». Research in Engineering Design, vol. 16, no 1-2, p. 1-16.

Kulkarni, Yogesh. « A Survey of "Design for Environment" methodologies and Tools ». 2014.

Latrémouille-Viau, Julie. 2009. « Traitement en fin de vie des avions et valorisation de l'aluminium ». Mémoire de maîtrise en génie industriel, École Polytechnique de Montréal, 186 p.

Lopes, João Vasco de Oliveira Fernandes. 2010. « Life Cycle Assessment of the Airbus A330-200 Aircraft ». Universidade Técnica de Lisboa, 140 p.

Mitchell, Z., J. Hildreth et M. Vorster. 2011. « Using the Cumulative Cost Model to Forecast Equipment Repair Costs: Two Different Methodologies ». Journal of Construction Engineering and Management, vol. 137, no 10, p. 817-822.

N Kanari, J-L Pineau et S. Shallari. « End of life vehicle recycling in the European Union ». The Minerals, Metals & Materials Society. 2003. 10 pages.

Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI), 2010. *Aviation's Contribution to Climate Change.* 30 p.

Rapport-Gratuit.com

Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI), 2013, *2013 Environmental Report, Destination Green*. 224 p.

Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI), 2004. *Manuel de la réglementation du transport aérien international*. Deuxième édition de 2004. 235 p.

Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI), 2010. « Safety Management SARPs, Annex 6 – Operation of Aircraft (Amdt 33-B) ».

Paksoy, Turan, Tolga Bektaş et Eren Özceylan. 2011. « Operational and environmental performance measures in a multi-product closed-loop supply chain ». Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, vol. 47, no 4, p. 532-546.

Penner, Joyce E., IPCC (International Panel on Climate Changes), 1999. *Aviation and the global atmosphere*. Cambridge: Cambridge University Press, 373 p.

Project Ara. 2015. « Project ARA ». En ligne. < http://www.projectara.com >. Consulté le 17 juillet 2015.

Garrett, Peter. 2005. *Streamlined LCA in the Ministry of Defence (UK): The Merlin Case*. Environmental Resources Management, Oxford. LCA Forum. 17 Novembre 2005.

Pigosso, Daniela C. A., Evelyn T. Zanette, Américo Guelere Filho, Aldo R. Ometto et Henrique Rozenfeld. 2010. « Ecodesign methods focused on remanufacturing ». Journal of Cleaner Production, vol. 18, no 1, p. 21-31.

The Remanufacturing Institute, 2013. « About Reman: The Remanufacturing Institute ». En ligne. <http://www.reman.org/AboutReman_main.htm>. Consulté le 20 octobre 2013.

Recyc-Québec, 2015. « Les 3RV ». En ligne. <http://www.rncreq.org/images/UserFiles/files/3RV%20ICI%20juin%202009%20P1-6.pdf>. Consulté le 28 Juillet 2015.

Remar (Réseau Énergie et Environnement). *Éco-efficience industrielle : Atteindre l'éco-efficience à travers l'éco-conception et l'écologie industrielle.* 2011. 72 p.

Rogers, Dale S. et Ronald S. Tibben-Lembke. 1999. « Going Backwards: Reverse Logistics Trends and Practices ». Center for Logistics Management, University of Nevada, Reno. RLEC Press. 283 p.

Seppälä, Jyri. 2003. « Life Cycle Impact Assessment based on Decision Analysis ». Dissertation for the degree of Doctor of Science in Technology. Helsinki University of Technology (Espoo, Finlande). 71 p.

Spicer, Andrew et Michael H. Wang. 1997. « Environmental Design Industrial Template (EDIT): A software tool for analysis of product retirement ». Journal of Cleaner Production, vol. 5, no 3, p. 193-198.

Subramoniam, Ramesh, Donald Huisingh et Ratna Babu Chinnam. 2009. « Remanufacturing for the automotive aftermarket-strategic factors: literature review and future research needs ». Journal of Cleaner Production, vol. 17, no 13, p. 1163-1174.

Statham, Steve. Pera Knowledge. 2006. « Remanufacturing Towards a More Sustainable Future ». Technologywatch. Pera Knowledge. En ligne. 24 p. <http://www.lboro.ac.uk/microsites/mechman/research/ipm-ktn/pdf/Technology_review/remanufacturing-towards-a-more-sustainable-future.pdf>. Consulté le 2 juin 2014.

Strehaiano, Jean-Baptiste. 2014. Approche éco-efficiente de l'enlèvement sécuritaire du fluide hydraulique d'un aérodyne en fin de vie ». Mémoire de maîtrise en génie de l'environnement, Montréal, École de technologie supérieure, 89 p.

Strategic Defence Intelligence (SDI). *The Comercial Helicopter Market 2013-2023.* Octobre 2013. 135 p.

Tchertchian, N., D. Millet et A. El Korchi. 2012. « Design for remanufacturing: what performances can be expected? ». International Journal of Environmental Technology and Management, vol. 15, no 1, p. 28-49.

Transport Canada, 2014. *Règlement de l'aviation canadien (RAC) – SOR/96-433.* Version du 28 Novembre, 2014. 1 031 p.

Visiongrain, 2015. *Civil Helicopter Market Forecast 2015-2025.* Avril 2015. 478 p.

Warsen, Jens, Marlisa Laumer et Wolfgang Momberg. 2011. « Comparative life cycle assessment of remanufacturing and new manufacturing of a manual transmission ». In 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering: Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing, May 2, 2011 - May 4, 2011. (Braunschweig, Germany), p. 67-72. Coll. «Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing - Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering»: Springer Science and Business Media, LLC.

Warwick, Graham. 2013. «New Chinook models extend heavylift helicopter's life». Flightglobal. En ligne. <http://www.flightglobal.com/news/articles/new-chinook-models-extend-heavylift-helicopters-life-222555/>. Consulté le 20 octobre 2013.

Weitz, K.A. et al, 1996. *Accurate Streamlined Life Cycle Assessment – Is it possible?*. North Carolina's Research Triangle Institute for SETAC Press. Pensacola, Florida, United States of America.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

World Business Council for Sustainable Development. 1996. *Eco-efficient leadership for improved economic and environmental performance*. 17 p.

Yang, Yongxiang, Rob Boom, Brijan Irion, Derk-Jan van Heerden, Pieter Kuiper, et Hans de Wit. 2010. « Recycling of composite materials. » Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. En ligne. <www.elsevier.com/locate/cep>. Consulté le 20 octobre 2013.