

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

TRAITEMENT EN FIN DE VIE DES AVIONS
ET VALORISATION DE L'ALUMINIUM

JULIE LATRÉMOUILLE-VIAU
DÉPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES ET DE GÉNIE INDUSTRIEL
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE INDUSTRIEL)
DÉCEMBRE 2009

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

TRAITEMENT EN FIN DE VIE DES AVIONS
ET VALORISATION DE L'ALUMINIUM

présenté par : LATRÉMOUILLE-VIAU, Julie

en vue de l'obtention du diplôme de: Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. PELLERIN Robert, ing., Ph.D., président

M. BAPTISTE Pierre, ing., Doct., membre et directeur de recherche

M. MASCLE Christian, Ph.D., membre et codirecteur de recherche

M. ISAC Patrick, Maîtrise, membre

DÉDICACE

À Céline Latrémouille & Jean-Marie Viau

REMERCIEMENTS

Nous désirons remercier les représentants des sites de démantèlement aéronautique qui ont volontairement accepté de contribuer à ce travail de recherche et plus particulièrement les personnes suivantes : Charles Shooke (Evergreen Trade Inc.), Derk-Jan van Heerden (Aircraft End-Of-Life Solutions), Charles Kofyan (Bartin Aero Recycling) et Mark Gregory (Air Salvage International).

Nous remercions également Francis Caron (Alcoa) pour son aide lors de la validation des aspects techniques du recyclage de l'aluminium.

RÉSUMÉ

Depuis les débuts de l'industrie de l'aluminium, soit en 1886, la production d'aluminium n'a pas cessée d'augmenter, faisant de ce matériau le second métal le plus utilisé par l'homme. Sa capacité à être recyclé à répétition sans perdre ses propriétés physiques fait en sorte que l'industrie du recyclage joue un rôle important dans la production d'aluminium. Non seulement le recyclage de l'aluminium permet de réduire la quantité de bauxite extraite de la croûte terrestre, mais il représente aussi une économie d'énergie et d'eau ainsi qu'une réduction de la quantité de déchets produite et de polluants émis dans l'air comparativement à la production primaire d'aluminium. Les procédés de fabrication utilisés et les technologies de tri de l'aluminium postconsommation disponibles influencent grandement la pureté, donc la valeur marchande, des alliages d'aluminium obtenus par recyclage. Il est présentement trop coûteux d'obtenir des alliages purs à partir de l'aluminium issu de produits obsolètes pour que cette pratique soit courante dans l'industrie. Le recyclage de l'aluminium à forte valeur marchande entraîne alors une perte de valeur liée à une réutilisation dans la production d'alliages moins purs et moins dispendieux. Cette problématique est observable dans l'industrie aéronautique puisque les alliages utilisés dans la fabrication d'aéronefs requièrent des propriétés particulières, et par conséquent un faible taux d'impuretés. En considérant qu'il est possible de collecter une quantité équivalente à 5 769 231 canettes d'aluminium à partir d'un Airbus 320, soit environ 75 tonnes de débris d'alliages d'aluminium, et en considérant la quantité importante d'avions commerciaux qui atteindront leur fin de vie dans les années à venir, soit plus de 7 000 dans les 20 prochaines années, le recyclage en boucle ouverte de l'aluminium en provenance de l'aéronautique représente une perte de valeur ajoutée importante.

L'industrie du recyclage des métaux en Amérique du Nord est très développée et plusieurs filières spécialisées sont implantées. Le démantèlement aéronautique est une pratique récente et constitue un marché en pleine expansion, surtout aux États-Unis et en Europe. L'étude de cinq compagnies, soit Tarmac Aerosave, Bartin Aero Recycling,

Evergreen Trade Inc., Aircraft End-Of-Life Solutions et Air Salvage International a permis de modéliser ce nouveau secteur industriel et les processus d'affaires associés. Une collecte de données a d'abord été réalisée auprès de ces entreprises par l'intermédiaire de différents outils tels qu'un questionnaire, des échanges de courriels, des conversations téléphoniques et des visites industrielles. Plusieurs informations pertinentes ont été trouvées sur les sites web de ces compagnies et dans des articles de journaux publiés par les localités dans lesquelles sont implantés les sites de démantèlement aéronautique (SDA) à l'étude. L'analyse et le traitement des données collectées mènent à la conclusion que ces SDA ont des approches de démantèlement uniques permettant d'atteindre différents taux de valorisation des matériaux.

Une éventuelle réglementation au niveau du traitement en fin de vie des avions est anticipée par les manufacturiers d'aéronefs compte tenu de l'émergence de législations environnementales. Il faut alors s'assurer que le processus de démantèlement aéronautique soit rentable. Dans ce projet de recherche, nous proposons un algorithme ayant pour objectif de minimiser le temps requis à la détermination de la meilleure séquence de démantèlement d'une carcasse d'avion en fonction des connaissances et de l'expérience de l'employé assigné à cette tâche, tout en maximisant la valorisation de l'aluminium et en minimisant les coûts d'opération associés. Un modèle de programmation linéaire binaire est développé pour permettre la mise en application d'une étape de cet algorithme, c'est-à-dire l'optimisation de la séquence d'opérations de démantèlement. Ce modèle mathématique est testé à l'aide d'un exemple d'application. L'analyse de l'utilisation et du comportement du programme implanté dans le logiciel AmplStudio mène finalement à la conclusion que le modèle mathématique et le programme sont adéquats et permettent d'atteindre les objectifs visés.

Mots clés : démantèlement aéronautique, recyclage de l'aluminium, récupération des matériaux, avions en fin de vie, optimisation mathématique, modèles d'affaires.

ABSTRACT

Since the beginning of the aluminum industry in 1886, the aluminum production has never stopped increasing which makes this material the second most used metal by man. Its capacity to be recycled repetitively without losing its physical properties leads the recycling industry to play an important role in the aluminum production. Aluminum recycling reduces the quantity of bauxite extracted from the earth's crust and also diminishes the energy and the water consumption, the wastes production and the air pollutants emissions compared to the primary aluminum production. The used manufacturing processes and the availability of post-consumption aluminum sorting technologies highly influence the purity, so the market value, of recycled aluminum alloys. It is still too expensive to produce pure aluminum alloys from obsolete products' aluminum for this activity to be part of the aluminum industry business. High value aluminum recycling leads to a loss of value due to the reuse of these alloys in less pure and cheaper aluminum alloys production. This problem is observable in the aeronautic field because the used aluminum alloys in aircrafts production require particular properties and low impurity levels. Considering that it is possible to collect an equivalent quantity of 5 769 231 aluminum cans from an Airbus 320, which means approximately 75 tons of aluminum scraps, and considering the important quantity of end-of-life aircrafts predicted for coming years, more than 7000 in the next twenty years, open loop aerospace aluminum alloys recycling represents a significant loss of added value.

The North American aluminum recycling industry is well developed and many specialized networks are established. Aeronautical dismantling remains a recent practice and represents a market in expansion, particularly in the United States and in Europe. The study of five companies, Tarmac Aerosave, Bartin Aero Recycling, Evergreen Trade Inc., Aircraft End-Of-Life Solutions and Air Salvage International has made possible the modelization of this new industrial sector and the modelization of the business processes associated. First, a data collection has been done using different tools

such as a questionnaire, phone conversations, emails and industrial visits. Other information was collected on the web sites of these companies and in journals' articles published in the city where are located the aeronautic dismantling sites (ADS). The data collected and their analyse force to conclude that ADS have unique dismantling approaches which leads to different material valorization rates.

A possible legislation for aircrafts' end-of-life treatment is anticipated by the aircrafts manufacturers because of the emergence of environmental legislations. It is important to make sure that the aircraft dismantling process is profitable. In this research project an algorithm is proposed in order to minimise the time needed to determine the best dismantling operations sequence according to the knowledge of the employee assigned to this task while maximizing the aluminum valorization and minimizing operational costs. A linear and binary program model is developed to enable the optimisation of the dismantling sequence which is in one of the main steps of the algorithm. This mathematical model is tested with an application example. Analysing the program utilization with the software AmplStudio and its behaviour, it is justified to conclude that the mathematical model and the implemented program reach to the objectives mentioned.

Key words: aeronautical dismantling, aluminum recycling, material recovery, end-of-life aircrafts, mathematical optimization, business processes.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE	iii
REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ	v
ABSTRACT	vii
TABLE DES MATIÈRES	ix
LISTE DES TABLEAUX.....	xiii
LISTE DES FIGURES.....	xiv
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xv
LISTE DES ANNEXES.....	xvii
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 : ASPECTS TECHNIQUES, SOCIAUX, ENVIRONNEMENTAUX ET ÉCONOMIQUES ASSOCIÉS AU RECYCLAGE DE L'ALUMINIUM	3
1.1. Statistiques générales	5
1.2. Alliages de corroyage et de moulage	9
1.2.1. Alliages de corroyage.....	9
1.2.2. Alliages de moulage.....	10
1.3. Impuretés et contaminants.....	11
1.4. Processus de recyclage	14
1.4.1. Collecte	14
1.4.2. La préparation	15
1.4.3. Affinage.....	21
1.4.4. Mise en forme	25

1.5.	L'industrie du recyclage.....	26
1.5.1.	Recyclage des véhicules.....	26
1.5.2.	Recyclage des emballages.....	27
1.5.3.	Recyclage des déchets municipaux.....	28
1.5.4.	Recyclage des matériaux de construction et bâtiments.....	30
1.5.5.	Recyclage en aéronautique.....	31
1.6.	Santé et sécurité.....	34
1.7.	Législation, régularisation et standardisation.....	36
1.7.1.	Principe pollueur-payeur et responsabilité élargie des producteurs.....	37
1.7.2.	Politiques environnementales et standardisation	38
1.8.	Conclusion.....	40
CHAPITRE 2 : ÉTUDE DES SITES DE DÉMANTÈLEMENT AÉRONAUTIQUE ET MODÈLES D'AFFAIRES.....		41
2.1.	Définitions et collecte de données.....	44
2.2.	Aircraft Fleet Recycling Association (AFRA).....	46
2.3.	Le centre Tarmac.....	47
2.3.1.	Historique du site Tarmac	47
2.3.2.	Description du site de démantèlement aéronautique.....	49
2.3.3.	Modèle d'affaires du site.....	52
2.4.	La compagnie Bartin Aero Recycling	53
2.4.1.	Historique de la compagnie Bartin Aero Recycling	53
2.4.2.	Description du site de démantèlement aéronautique.....	54
2.4.3.	Modèle d'affaires du site.....	55
2.5.	La compagnie Evergreen Trade Inc.	57

2.5.1.	Historique de la compagnie Evergreen Trade Inc.....	57
2.5.2.	Description du site de démantèlement aéronautique.....	57
2.5.3.	Modèle d'affaires du site.....	59
2.6.	La compagnie Aircraft End-Of-Life Solutions (AELS).....	61
2.6.1.	Historique de la compagnie AELS.....	61
2.6.2.	Description des sites de démantèlement aéronautique.....	62
2.6.3.	Modèle d'affaires de la compagnie.....	62
2.7.	La compagnie Air Salvage International (ASI).....	63
2.7.1.	Historique de la compagnie ASI.....	63
2.7.2.	Description des sites de démantèlement aéronautique.....	64
2.7.3.	Modèle d'affaires de la compagnie.....	65
2.8.	Comparaison du profil des entreprises impliquées dans le démantèlement aéronautique.....	66
2.9.	Conclusion.....	70
CHAPITRE 3 : OPTIMISATION DE LA STRATÉGIE DE DÉMANTÈLEMENT D'AVIONS POUR LA VALORISATION DE L'ALUMINIUM.....		71
3.1.	Recyclage de l'aluminium en provenance de l'aéronautique.....	72
3.2.	Revue des méthodes de planification des opérations de désassemblage et de démantèlement.....	75
3.3.	Description de l'algorithme de démantèlement.....	80
3.4.	Description du modèle d'optimisation mathématique.....	82
3.4.1.	Hypothèses.....	83
3.4.2.	Indices et ensembles.....	84
3.4.3.	Paramètres.....	84

3.4.4. Variables	86
3.4.5. Fonction objectif	86
3.4.6. Contraintes	87
3.5. Méthodologie de résolution du modèle d'optimisation.....	88
3.6. Exemple d'application – Empennage d'avion.....	88
3.7. Analyse du comportement du programme	91
3.8. Conclusion.....	94
CONCLUSION.....	95
RÉFÉRENCES.....	99
ANNEXES	109

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Effets des émissions dans l'air sur la santé et sur l'environnement.....	22
Tableau 2.1 : Liste des composantes et des matériaux d'un aéronef à considérer dans la gestion en fin de vie	45
Tableau 2.2 : Objectifs détaillés du projet Pamela.....	48
Tableau 2.3 : Comparaison du profil global des sites de démantèlement aéronautique	68
Tableau 3.1 : Parts des revenus bruts de la valorisation de la coque d'un avion par types de matériaux	72
Tableau 3.2 : Comparaison des prix des alliages d'aluminium corroyés de première fusion (2009)	73

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Production mondiale d'aluminium de première fusion (<i>Source : International Aluminium Institut</i>)	4
Figure 1.2 : Valeur marchande annuelle moyenne de l'aluminium (<i>Source : LME</i>)	6
Figure 1.3 : Valeur marchande de l'aluminium primaire, US\$/t (<i>Source : LME</i>)	6
Figure 1.4 : Principaux pays producteurs de bauxite (<i>Source : LME</i>)	9
Figure 2.1 : Emplacement des sites de démantèlement aéronautique à l'étude	45
Figure 2.2 : Site de démantèlement – Tarmac.....	50
Figure 2.3 : Structure logistique – Tarmac.....	53
Figure 2.4 : Plate-forme de démantèlement – Bartin Aero Recycling	55
Figure 2.5 : Structure logistique – Bartin Aero Recycling.....	56
Figure 2.6 : Site de démantèlement – Evergreen Trade Inc. (<i>Source : Evergreen Trade Inc.</i>)	58
Figure 2.7 : Structure logistique – Evergreen Trade Inc.	60
Figure 2.8 : Structure logistique – Aircraft End-Of-Life Solutions	63
Figure 2.9 : Structure logistique – Air Salvage International	65
Figure 3.1 : Pratiques actuelles de valorisation de l'aluminium collecté à partir d'avions désuets	75
Figure 3.2 : Algorithme du modèle d'optimisation de la valorisation de l'aluminium ...	81
Figure 3.3 : Arbre de démantèlement.....	83
Figure 3.4 : Arbre de démantèlement – Empennage.....	89
Figure 3.5 : Données du fichier .dat – Empennage	90

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AAC	Association de l'Aluminium du Canada
AEAT	Aircraft Engineering and Aerospace Technology
AELS	Aircraft End-Of-Life Solutions
AESA	Agence Européenne de la Sécurité Aérienne
AFRA	Aircraft Fleet Recycling Association
ASA	Aviation Suppliers Association
ASI	Air Salvage International
ASR	Automotive Shredder Residue
ATE&M	Aircraft Technology Engineering and Maintenance Magazine
ATI	Alcan Global Aerospace, Transportation and Industry
EAA	European Aluminium Association
EPSRC	Engineering and Physical Sciences Research Council
EMC	Evergreen Maintenance Center
FAA	Federal Aviation Administration
GE	Grandes Entreprises
IAI	International Aluminium Institut
ICPE	Installation Classée pour la Protection de l'Environnement
ISTAT	International Society of Transport Aircraft Trading
LIBS	Laser-Induced Breakdown Spectroscopy
LME	London Metal Exchange/Bourse des métaux de Londres
NRC	Natural Resources Canada
OEA	Organisation des États Américains
PAMELA	Process for Advanced Management of End-of-life Aircraft/ Procédé Innovant de Management des Avions en fin de vie
PME	Petites et Moyennes Entreprises
RAC	Règlement de l'Aviation Canadien
REP	Principe de la Responsabilité élargie des Producteurs
SDA	Site de Démantèlement Aéronautique

SGE	Systeme de Gestion de l'Environnement
TARMAC	Tarbes Advanced Recycling and Maintenance Aircraft Company
USD	Dollar des États-Unis/ United States Dollar
VLEEM	Global Model on Very Long Term Energy Environment/ Modèle Mondial sur l'Environnement Énergétique à Très Long Terme

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A : POURCENTAGE MAXIMAL DE FER DANS LES ALLIAGES DE CORROYAGE.....	109
ANNEXE B : PROCESSUS DE RECYCLAGE, CYCLE DE VIE ET ACTEURS ...	110
ANNEXE C : ÉQUIPEMENTS DE FUSION	112
ANNEXE D : PROCESSUS DE RECYCLAGE DES VÉHICULES.....	114
ANNEXE E : CARACTÉRISTIQUES DES EMBALLAGES D’ALUMINIUM	115
ANNEXE F : RÉSEAU DE CRÉATION DE VALEUR ASSOCIÉ AU DÉMANTÈLEMENT D’AVIONS.....	116
ANNEXE G : EMBLACEMENT DES COMPOSANTS D’UN AVION.....	117
ANNEXE H : QUESTIONNAIRE FOURNI AUX ENTREPRISES DE DÉMANTÈLEMENT AÉRONAUTIQUE	118
ANNEXE I : DESCRIPTION DE L’AVION PROTOTYPE DE PAMELA ET RÉSULTATS	120
ANNEXE J : CARACTÉRISTIQUES DES ALLIAGES D’ALUMINIUM DE CORROYAGE EN AÉRONAUTIQUE.....	122
ANNEXE K : PROGRAMME MATHÉMATIQUE IMPLANTÉ DANS AMPLSTUDIO.....	123
ANNEXE L : RÉSULTATS DE LA RÉOLUTION DU PROGRAMME LINÉAIRE BINAIRE – EMPENNAGE.....	126
ANNEXE M : VARIATION DES VALEURS DES CONSTANTES VM, C1, C2 ET C3.....	129
ANNEXE N : VARIATION DES TAUX HORAIRES CD, CB ET CT	144
ANNEXE O : ARTICLE – AIRFRAME DISMANTLING OPTIMIZATION FOR ALUMINUM VALORIZATION	154

ANNEXE P : DROITS ACQUIS POUR LES IMAGES161

INTRODUCTION

L'abandon d'avions à proximité des aéroports et en zones désertiques est une pratique répandue dans l'industrie aéronautique. Ces abandons représentent un potentiel de dommages environnementaux non négligeable, encouragent des démantèlements d'avions non contrôlés et favorisent l'introduction de pièces détachées dans l'aviation par l'intermédiaire d'un marché noir. Leur occurrence pourrait s'accroître dans les années à venir en considérant l'augmentation prévue de mises hors service, la capacité d'entreposage sécurisé d'avions limitée et le fait qu'il n'existe aucune réglementation en matière de traitement des aéronefs en fin de vie. La hausse du coût de l'essence doit aussi être prise en compte, puisque ce facteur pourrait forcer les propriétaires à condamner leurs appareils avant l'échéance envisagée, ceux-ci étant incapables de supporter financièrement la mise en service d'avions à forte consommation en carburant. Heureusement, les propriétaires d'avions (compagnies de location, compagnies aériennes, banques, courtiers en pièces détachées, particuliers, etc.) sont de plus en plus soucieux de l'environnement. L'image verte associée à un traitement en fin de vie respectueux de l'environnement s'installe graduellement en tant que critère de compétitivité sur le marché mondial. Par ailleurs, les producteurs aéronautiques anticipent qu'une réglementation soit éventuellement adoptée au niveau de leur responsabilité envers la gestion de la fin de vie de leurs produits.

C'est dans l'optique de remédier à cette situation que Bombardier, membre du Consortium de Recherche et d'Innovation en Aérospatial au Québec (CRIAQ), a regroupé plusieurs chercheurs universitaires de l'École Polytechnique de Montréal, de l'École de Technologie Supérieure et de McGill ainsi que des professionnels de la compagnie Alcoa et du centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits, procédés et services (CIRAIG) pour développer une approche durable envers l'environnement dans le secteur de l'aéronautique. L'ensemble de ces personnes sont impliquées dans un projet d'envergure s'échelonnant sur une période de trois ans. Ce projet a pour objectifs l'étude des différentes stratégies de désassemblage (sous-

assemblages, pièces, moteurs, trains d'atterrissage, etc.), de démantèlement (structure de l'avion, cabine, fuselage, ailes et empennage) et de recyclage (matériaux) au niveau de leur efficacité et des retombés économiques de la récupération, de la réutilisation et du recyclage ou de la valorisation des constituants de l'avion. Une plateforme expérimentale sera choisie pour y simuler diverses stratégies sur un modèle d'avion fourni par Bombardier à l'aide de différentes technologies et de différents procédés et outils.

Ce mémoire est un document de référence qui vise à démystifier l'industrie du recyclage de l'aluminium, les technologies de fusion, de traitement du métal, de broyage et de tri actuelles et en développement ainsi que les acteurs et les filières impliqués. Cinq compagnies de démantèlement aéronautique ont été contactées pour modéliser la filière du recyclage de l'aluminium en provenance de ce domaine qui représente un secteur industriel émergent. Pour ce faire, le modèle d'affaires de chacune de ces entreprises est présenté afin de se familiariser avec cette nouvelle pratique peu documentée dans la littérature. Un algorithme est ensuite proposé dans le but d'optimiser le démantèlement d'un aéronef, c'est-à-dire minimiser le temps et les efforts requis à la détermination de la séquence des opérations de démantèlement de sa carcasse, maximiser la valorisation de l'aluminium qu'il contient et minimiser les coûts d'opération de façon à maximiser les profits monétaires réalisés, le tout pour promouvoir un traitement écologiquement responsable de la fin de vie des avions auprès d'entreprises qui, souvent, considèrent cette option comme étant trop coûteuse. Le premier chapitre présente donc les aspects techniques, sociaux, environnementaux et économiques associés au recyclage de l'aluminium, tandis que le second chapitre est une étude des sites de démantèlement aéronautique (SDA). Finalement, dans le troisième chapitre, une méthode d'optimisation de la valorisation de l'aluminium en provenance de l'aéronautique est développée, laquelle consiste en un algorithme pour lequel un modèle de programmation linéaire binaire est élaboré et testé.

CHAPITRE 1 : ASPECTS TECHNIQUES, SOCIAUX, ENVIRONNEMENTAUX ET ÉCONOMIQUES ASSOCIÉS AU RECYCLAGE DE L'ALUMINIUM

L'industrie de l'aluminium n'a qu'une centaine d'années, mais elle a déjà généré plus de 700 millions de tonnes d'aluminium. En considérant que le recyclage de l'aluminium présente de nombreux avantages comparativement à la production primaire, notamment en matière de consommation énergétique et d'émissions de polluants, il s'avère important d'optimiser ce processus de façon à réduire les externalités nuisibles de l'industrie de l'aluminium. Une telle optimisation n'est possible qu'avec une pleine connaissance de ce secteur industriel tant au niveau des alliages d'aluminium, des méthodes et procédés utilisés, des réseaux de recyclage implantés et de la réglementation s'y rattachant.

En trois cents ans, la population mondiale a augmentée de plus de 6 milliards d'habitants. Le système économique tel que nous le connaissons aujourd'hui est mondial. Les gouvernements, les corporations et les consommateurs évoluent dans ce système constitué de six entités principales: les ressources naturelles, les industries de première transformation, les industries de deuxième transformation, les détaillants, les ménages et les sites d'enfouissement. La survie de ce système réside dans la consommation continue de biens et services fortement encouragée par le marketing. L'humanité est entrée dans une ère de surconsommation dans laquelle de nombreuses inégalités subsistent et s'accroissent entre les pauvres et les riches, les pays développés et sous-développés. D'après les résultats obtenus à partir du Modèle Mondial sur l'Environnement Énergétique à Très Long Terme (VLEEM) conçu à l'université de l'Utrecht, nous exerçons une pression importante sur les ressources naturelles de notre planète (Reh, 2006). La figure 1.1 de la page suivante montre que la production mondiale d'aluminium à partir de la bauxite, soit la production d'aluminium de première fusion, a connu un accroissement notable durant les dernières années (cinq tonnes de bauxite donnent deux tonnes d'alumine qui permettent d'obtenir une tonne

d'aluminium) (Chabanet, 2007). La production de 2008 correspond à plus du double de la production évaluée en 1980.

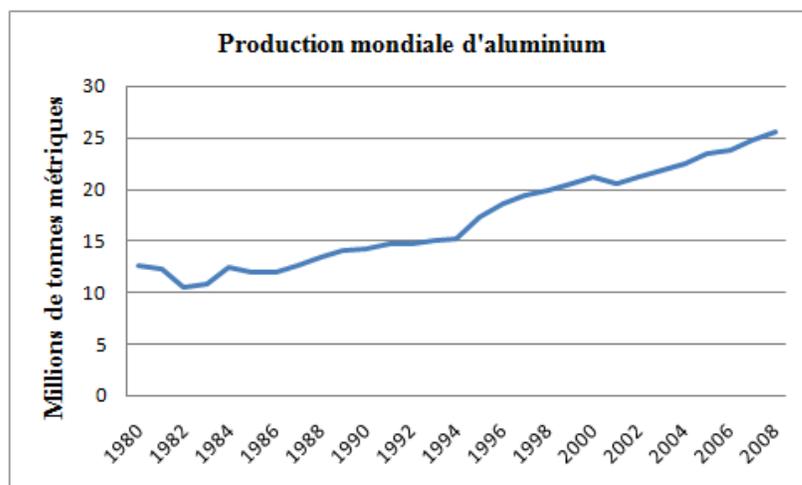


Figure 1.1 : Production mondiale d'aluminium de première fusion (Source : *International Aluminium Institut*)

Depuis peu, nous assistons à la conscientisation du public, des politiciens et des industriels envers l'environnement et les changements climatiques occasionnés par l'activité humaine. L'industrie de l'aluminium est un secteur économique dans lequel le recyclage est une pratique courante qui prend de plus en plus d'importance et qui requiert l'implication de tous les agents de notre système économique, soient les gouvernements, les corporations et les consommateurs. Le chapitre 1 est une revue de la littérature qui donne une vue d'ensemble des multiples aspects associés au recyclage de l'aluminium, dont les pratiques actuelles et innovatrices de l'industrie de l'aluminium de deuxième fusion (recyclage), en considérant quatre dimensions principales: technique, sociale, économique et environnementale.

Dans un premier temps, des statistiques générales sont données afin de montrer l'importance grandissante du recyclage de l'aluminium. Les alliages d'aluminium de moulage et de corroyage sont ensuite brièvement présentés ainsi que leurs principales propriétés physiques, mécaniques et chimiques. Par la suite, les impuretés et les contaminants que nous retrouvons dans les composantes d'aluminium ainsi que les

techniques pouvant être utilisées pour s'en débarrasser sont énumérés. Puis, les principales étapes du processus de recyclage des biens de consommation contenant de l'aluminium sont décrites ainsi que les technologies commercialisées et en développement associées. Les sujets suivants font l'objet d'une étude plus approfondie : véhicules, emballages, déchets municipaux, construction et bâtiments, aéronautique. Une section traitant de la santé et de la sécurité reliées aux pratiques de l'industrie de l'aluminium est aussi incluse dans ce chapitre. Finalement, la législation gouvernementale et certaines normes sont présentées.

1.1. Statistiques générales

Au niveau mondial, le Canada est le troisième plus grand producteur d'aluminium de fusion primaire et le deuxième pays qui exporte le plus d'aluminium, la Russie étant le premier (Natural Resources Canada [NRC], 2006). Plus de 50 % de l'aluminium produit en Amérique du Nord et plus du tiers de l'aluminium produit mondialement proviennent de matériaux recyclés (Schlesinger, 2007). Le recyclage de l'aluminium en Amérique du Nord est d'ailleurs le système économique de recyclage de métaux le plus développé dans le monde (Green, 2007).

Depuis les débuts de l'industrie de l'aluminium, soit en 1886, plus de 700 millions de tonnes d'aluminium ont été produites. Encore aujourd'hui, environ 73 % de cette production est en phase d'usage (Green, 2007). Ces chiffres font de l'aluminium le second métal le plus utilisé au monde, l'acier étant le premier. Le commerce international de l'aluminium assure un approvisionnement continu et stable aux manufacturiers. Il existe également un commerce international des déchets neufs ou des vieux débris d'aluminium utilisés principalement par les unités de deuxième fusion, c'est-à-dire par les entreprises qui recyclent l'aluminium, ainsi qu'un commerce d'aluminium recyclé. La valeur marchande de l'aluminium de première et de deuxième fusion est dictée par la Bourse des Métaux de Londres (LME) qui est le marché mondial le plus important dans le secteur des métaux d'échange. La figure 1.2 de la page suivante montre l'évolution dans le temps du prix de l'aluminium pour les échanges au comptant.

Nous constatons que la valeur marchande de l'aluminium recyclé est inférieure à celle de l'aluminium de première fusion et qu'elle subit des variations de prix semblables.

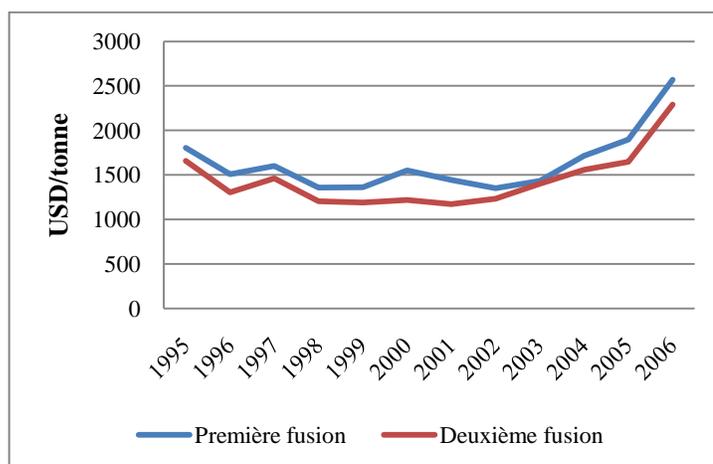


Figure 1.2 : Valeur marchande annuelle moyenne de l'aluminium (Source : LME)



Figure 1.3 : Valeur marchande de l'aluminium primaire, US\$/t (Source : LME)

La figure 1.3 illustre la forte dépréciation subie par l'aluminium durant 2008. Cette dévaluation est nuisible pour le secteur de la transformation primaire de l'aluminium et plus particulièrement pour les activités de recyclage. Par conséquent, une emphase doit être mise sur l'optimisation des procédures de recyclage afin de minimiser le prix de revient des alliages d'aluminium de deuxième fusion.

L'industrie de l'aluminium de première fusion est une grande consommatrice d'électricité. La majeure partie de cette consommation énergétique est associée à la production d'alumine et au processus d'électrolyse : pour produire une tonne métrique d'aluminium, environ quinze kilowattheures sont requis (Green, 2007). Non seulement la production d'aluminium à partir de la bauxite est énergivore et consomme une quantité importante de ressources naturelles non renouvelables, mais elle génère aussi des émissions dans l'air et dans l'eau, des coproduits, des déchets solides et des émissions de fluorure qui ont un impact néfaste sur notre environnement. Chaque kilogramme d'aluminium fabriqué correspond à l'émission de 3.5 kg eqCO₂ (Reh, 2006). Comparativement à la production d'aluminium primaire, le recyclage de l'aluminium permet de réduire la consommation de matières qu'il s'agisse d'énergie, de matériaux, d'eau, d'occupation de territoire, d'émissions dans l'air et dans l'eau, de mise en décharge et d'émissions de matières toxiques. En effet, le recyclage de l'aluminium représente une économie d'énergie située entre 80 et 95 %, réduit la quantité de déchets produite de 90 %, réduit la quantité d'émissions dans l'air de 90 % par tonne d'aluminium fabriquée (CO₂, fluorure, SO₂) et réduit les coûts d'équipement de 80 à 85 % par tonne d'aluminium puisque les équipements requis sont moins complexes et donc moins coûteux (Schlesinger, 2007). Si nous recyclions les 500 millions de tonnes d'aluminium présentement en service, nous effectuerions une économie d'énergie d'environ 50 000 pétajoules (Green, 2007). En 2000, plus de 2 569 166 tonnes métriques d'aluminium ont été recyclées selon l'Institut International de l'Aluminium (IAI), ce qui correspond à une économie de 256 pétajoules.

D'autre part, le recyclage des biens de consommation contenant de l'aluminium permet annuellement de réaliser une réduction des émissions de gaz à effet de serre d'environ 84 millions de tonnes, ce qui correspond à l'utilisation annuelle de 15 millions de voitures (Green, 2007). En sachant qu'au Canada il y avait environ 19 millions de véhicules de moins de 4 500 kg immatriculés en 2008 (Statistiques Canada), il semble que cette réduction des émissions de gaz à effet de serre ne soit pas négligeable! Des études ont aussi démontré que l'utilisation grandissante de l'aluminium dans la

conception des véhicules routiers entraîne une réduction de la consommation d'essence notable à un point tel que d'ici 2020 les chercheurs stipulent que l'industrie de l'aluminium sera neutre au niveau des émissions de gaz à effet de serre. Cet accroissement de la demande en aluminium n'est pas ressenti uniquement dans le domaine des transports, mais également dans l'ensemble des secteurs économiques reliés à l'industrie de l'aluminium : construction et bâtiments, machineries et équipements, emballages, biens de consommations, etc.

Il ne faut pas oublier que l'aluminium est le métal le plus abondant dans la croûte terrestre et qu'il est également le troisième élément chimique le plus présent sur Terre, après l'oxygène et le silicium (Schlesinger, 2007). Il se retrouve principalement dans la bauxite (Fig. 1.4, p.9). Au rythme auquel nous consommons actuellement la bauxite, cette ressource naturelle pourrait satisfaire nos besoins pour des centaines d'années à venir. Toutefois, compte tenu des avantages que représente le recyclage de l'aluminium au point de vue environnemental, il est primordial que nous développions des technologies économiquement compétitives par rapport à la production d'aluminium de première fusion, que nous ayons des stocks de métaux abondants et récurrents justifiant les coûts de collecte ainsi que des infrastructures spécialisées dans la collecte et le tri des métaux.

L'avantage principal de l'aluminium comparativement à d'autres métaux consiste en sa capacité d'être recyclé à répétition sans perdre ses propriétés physiques malgré les pertes dues à l'oxydation et la contamination par quelques impuretés. Cette propriété fondamentale s'observe facilement dans le recyclage et la production de canettes de breuvage. Aux États-Unis, lorsqu'une canette est mise au recyclage, elle est de retour à 95 % sur le marché et ce, en soixante jours seulement. Chaque canette en service est constituée de 49 % d'aluminium recyclé (Green, 2007).



Figure 1.4 : Principaux pays producteurs de bauxite (Source : LME)

1.2. Alliages de corroyage et de moulage

L'aluminium se retrouve dans les produits de consommation sous la forme d'alliages. Les alliages d'aluminium sont constitués de proportions différentes d'aluminium et d'éléments tels que le cuivre, le manganèse, le magnésium, le silicium, le zinc, l'étain, le nickel et le chrome. Jusqu'à ce jour, plus de trois cents alliages différents ont été recensés. En fait, il existe deux grandes familles d'alliages. Les alliages de corroyage sont des métaux dont la mise en forme est effectuée par laminage, filage ou forgeage, tandis que les alliages de fonderie sont mis en forme par moulage.

1.2.1. Alliages de corroyage

Les alliages de corroyage sont regroupés en huit séries caractérisées par le premier chiffre de leur appellation. La série 2000 ou 2xxx regroupe tous les alliages aluminium-cuivre. La présence du cuivre donne de bonnes caractéristiques mécaniques à l'alliage, améliore son usinabilité, sa forgeabilité et sa résistance au fluage, mais diminue sa résistance à la corrosion et sa soudabilité. La série 3xxx regroupe les alliages aluminium-manganèse. Le manganèse confère à l'alliage une bonne résistance à la

corrosion et une meilleure aptitude à l'emboutissage. Les alliages de la série 5xxx contiennent du magnésium qui améliore également la résistance à la corrosion, la soudabilité, l'usinabilité et l'aptitude à l'anodisation de l'alliage. Les alliages aluminium-magnésium-silicium de la série 6xxx sont prédisposés au filage et grandement utilisés dans les profilés pour bâtiment. La série 7xxx est plutôt utilisée dans le domaine de l'aéronautique compte tenu des bonnes caractéristiques mécaniques que le zinc confère à l'aluminium. Cet alliage requiert cependant une protection contre la corrosion. Finalement, l'étain est aussi quelques fois combiné avec l'aluminium pour créer des alliages ayant une forte résistance au frottement. L'ajout de nickel à l'aluminium augmente la résistance au fluage et le chrome sert dans certains cas comme complément au manganèse afin de réduire le risque d'apparition de criques (Herbulot, 2009a).

1.2.2. Alliages de moulage

Les alliages de moulage sont également regroupés en huit séries caractérisées par le premier chiffre de leur appellation. La série 2xx.x contient du cuivre qui donne une bonne résistance mécanique et thermique à l'alliage. Il faut cependant utiliser un revêtement anticorrosion sur ce type d'alliage. La série 3xx.x regroupe les alliages de moulage les plus utilisés. Ils sont constitués d'aluminium, de silicium et de cuivre. Le silicium améliore la coulabilité du liquide, réduit le risque de formation de criques et minimise la porosité par retrait. Les alliages de la série 4xx.x contiennent aussi du silicium et quelques fois du cuivre, du fer ou du nickel. La série 5xx.x contient du magnésium, tandis que la série 7xx.x contient du zinc, du magnésium et du chrome. Les alliages de la série 8xx.x contiennent plutôt de l'étain et du cuivre qui leur confèrent une bonne résistance mécanique et une bonne coulabilité (Herbulot, 2009a).

Il est important de mentionner que la tolérance aux impuretés des alliages de moulage est beaucoup plus grande que celle des alliages de corroyage. Ceci explique donc qu'il soit extrêmement difficile, voir impossible, de recycler les alliages de moulage en alliage de corroyage. Le recyclage (boucle fermée) est le terme généralement utilisé pour les

alliages de la série 3xxx et 5xxx, tandis que l'affinage (boucle ouverte) est plutôt employé pour les alliages de fonderie. Dans l'ensemble du présent texte, le terme recyclage est employé dans les deux cas à des fins de simplification. Le terme « boucle fermée » est utilisé lorsqu'un alliage donné est recyclé en ce même alliage, tandis que le terme « boucle ouverte » correspond à l'utilisation d'alliages d'aluminium combinés à d'autres matières premières pour produire des alliages ayant des teneurs différentes en éléments d'alliage. D'après l'Organisation des États Américains (OEA), la consommation énergétique associée au recyclage est moindre que celle requise pour l'affinage : entre 7 100 et 8 400 MJ/t d'aluminium pour le recyclage, entre 4 200 et 12 600 MJ/t d'aluminium pour l'affinage.

1.3. Impuretés et contaminants

La majorité des métaux conservent leur structure élémentaire durant leur usage, ce qui permet de les réutiliser et de les recycler à répétition. Cependant, la pureté des matériaux recyclés est grandement influencée par l'état et la constitution chimique des composants utilisés comme intrants. Dans le cas de l'aluminium, la concentration en impuretés augmente à chaque cycle de fonte compte tenu de l'efficacité insuffisante de certains procédés. Cette faiblesse est contrée par l'ajout d'aluminium de première fusion lors de la refonte, c'est-à-dire durant la deuxième fusion. La présence des impuretés et de nombreux contaminants altère les propriétés physiques, chimiques et mécaniques des alliages recyclés. Parmi ces contaminants, nous retrouvons du verre, de la céramique, de la poussière, de la peinture, des polymères, du plastique, de l'acier, de la fonte, des revêtements organiques, du papier, du magnésium, du zinc, de la terre, du plomb, de l'étain, du laiton, de l'acier inoxydable, de l'oxygène, des oxydes, de l'hydrogène, du chlore, du fer, du manganèse, des contaminants organiques et biologiques, d'autres métaux liés mécaniquement, du sodium, du calcium, etc. (Schlesinger, 2007). Il n'est pas surprenant que des éléments d'alliage fassent partie de cette liste puisque les alliages de corroyage sont très sensibles aux variations de concentration de ces éléments. Il est

également important de repérer et d'éliminer les explosifs, les matières radioactives, les corps creux et les métaux toxiques avant de procéder à la fonte des produits collectés.

Pour que le métal de deuxième fusion rivalise avec celui de première fusion, une étape de traitement du métal est nécessaire. L'élimination des impuretés se fait par procédés chimiques et thermiques dans les fours de fusion. Lorsque des pièces sont jointes, un démontage est requis à priori. Il est à noter que le démantèlement manuel n'est pas toujours une opération rentable compte tenu du coût élevé en main-d'œuvre de certaines régions. De plus, plusieurs procédés peuvent être utilisés pour éliminer un type de contaminant et, d'un autre côté, un procédé peut permettre de retirer plusieurs contaminants simultanément. L'étendue des variables qui entrent dans le calcul de l'efficacité énergétique des fours de fusion implique que l'allocation de l'énergie requise pour éliminer une impureté en particulier est difficilement réalisable : type de four, capacité volumique, taux de fusion, coût de l'électricité, émissions, etc.

La surface des pièces d'aluminium sont recouvertes d'une couche d'oxyde dont il faut se départir pour améliorer les propriétés du métal recyclé et plus particulièrement pour le métal destiné au laminage. Afin d'optimiser les caractéristiques du métal obtenu, un écrémage ou décrassage du bain de fusion doit être opéré pour éliminer les *oxydes*. Cette séparation physique entre les oxydes et le métal liquide peut être réalisée durant la coulée par flottation suite à l'injection de gaz (chlore, argon) et par filtration à l'aide de dalles poreuses, lorsqu'une filtration de base est requise, ou à l'aide d'un lit de billes d'alumine ou de cartouches filtrantes en carbure de silicium pour une filtration plus fine. Aux États-Unis et en Europe, le sel est grandement utilisé comme technique de séparation des oxydes dans le bain de fusion. Un mélange de chlorure de sodium, de potassium et de fluorure est injecté dans le four en quantité proportionnelle à celle des oxydes formant ainsi de la scorie, laquelle peut être retirée facilement dû à sa bonne fluidité (Herbulot, 2009c). Dans ce cas, les oxydes sont scorifiés. Il faut également limiter la présence d'*oxygène* dans les fours de fusion puisqu'elle est responsable d'une

perte au feu causée par l'oxydation. La séparation des oxydes contribue également à cette perte.

Le *fer* est présent dans tous les alliages de corroyage (Annexe A, p.109) et il est considéré comme étant l'impureté principale des alliages recyclés (Das, 2007). Le fer se dissout facilement dans l'aluminium liquide et il est difficile de l'en séparer, ce qui explique qu'un enrichissement en fer est observable à chaque fonte. Deux options sont envisageables pour ne pas obtenir une mise en solution du fer. La séparation Al-Fe à froid consiste en une solidification partielle du bain de fusion dans laquelle la concentration en fer est amoindrie. La partie non solidifiée, le reliquat, voit sa concentration en fer augmentée. Il s'agit donc de séparer les deux phases obtenues. La complexification du fer est, quant à elle, une fusion sélective (Herbulot, 2009c). Ce procédé permet d'éliminer une certaine quantité de fer dans un alliage liquide à faible température. Cependant, ces méthodes sont peu rentables et peu employées en industrie. Une importance notable est accordée à la recherche et au développement de procédés plus efficaces dans ce domaine, notamment en Europe et au Japon. Pour Alcoa, compagnie canadienne de production d'aluminium primaire, il est plus intéressant financièrement d'opter pour une dilution en ajoutant une quantité donnée d'aluminium plus pure dans le bain de fusion afin d'en diminuer la concentration en fer.

En ce qui concerne la présence de *zinc* dans les alliages généralement utilisés en aéronautique et en armement, il suffit de procéder à une surchauffe de l'alliage lors de sa fusion. Une condensation des vapeurs de zinc est ensuite effectuée. Lors de cette opération, le *magnésium* est simultanément distillé. L'entreprise Air Liquide a aussi développé une technique d'élimination du zinc avec de l'azote liquide, mais cette méthode n'est pas rentable. Le magnésium peut également être retiré de l'aluminium en fusion lors de l'injection de chlore et de fluorure sous forme gazeuse dont il a été question dans la partie portant sur l'élimination des oxydes. Durant cette étape, le *sodium* et le *calcium* ainsi que l'*hydrogène* sont aussi retirés.

Le *phosphore* et l'*antimoine* sont présents dans les alliages de moulage car ils permettent un meilleur contrôle de leur structure. Ils sont cependant difficiles à éliminer lors du recyclage qui doit se faire avec dilution. La *peinture*, les *laques*, le *plastique* et les *matériaux combustibles* sont éliminés en utilisant des fours rotatifs à bain fluidisé (Green, 2007). L'élimination des *polymères* se fait de façon similaire avec un cycle de fusion en trois phases : délaquage et préchauffe, fusion, surchauffe. D'autres contaminants peuvent être éliminés lors du tri de la matière première récupérée, sujet qui sera traité dans la prochaine section.

1.4. Processus de recyclage

Le processus de recyclage de l'aluminium est constitué de quatre phases distinctes : la collecte d'aluminium homogène et hétérogène, la préparation de l'aluminium, l'affinage des alliages et la mise en forme (Annexe B, p.110).

1.4.1. Collecte

La collecte d'objets obsolètes est effectuée de manière à former des lots commerciaux. Il en est de même pour les chutes neuves et les tournures issues des activités de production. La décentralisation des matériaux recyclables et les petits lots constituent une problématique non négligeable pour l'industrie de l'aluminium secondaire, ce qui n'empêche pas que plusieurs PME québécoises soient spécialisées dans ce domaine. Dans l'industrie de l'aluminium primaire, il est possible de réaliser des économies d'échelles lors de l'extraction de la bauxite, car la collecte de la bauxite se fait en un seul endroit. Il est donc important d'adopter une approche optimale de collecte de l'aluminium pour encourager son recyclage.

Il n'y a pas que la valeur, la localisation et la disponibilité des produits en aluminium qui aient une influence sur le taux de recyclage. Le secteur des produits, leur durée de vie, l'engagement social, la législation et la demande en recyclage ont également une grande influence sur ce dernier. On observe d'ailleurs l'importance de cette demande en

considérant la localisation des fonderies, généralement situées à proximité des manufacturiers de voitures et des régions à forte consommation.

1.4.1.1. Aluminium homogène

L'aluminium homogène ou les déchets neufs proviennent de la fabrication et de l'assemblage des produits manufacturés. Ils sont donc constitués de rebuts de production. L'aluminium recyclé qui provient de ces rebuts est utilisé dans l'industrie primaire et dans l'affinage des alliages d'aluminium de deuxième fusion. Dans le premier cas, les rebuts sont déjà caractérisés et directement utilisés par l'usine qui les a produits. Par conséquent, ils ne sont généralement pas recensés dans les statistiques relatives au recyclage de l'aluminium.

1.4.1.2. Aluminium hétérogène

L'aluminium hétérogène ou les vieux débris sont collectés à la fin de vie des produits. Ils peuvent provenir de diverses sources telles que le secteur du transport (concessionnaires, réparateurs, autorités des voies rapides, propriétaires de « cours de scrap »), du secteur des bâtiments et de la construction (entrepreneurs), des emballages (commerçants, centres de récupération) et du secteur électrique (manufacturiers, compagnies de téléphone). Les vieux débris peuvent contenir une multitude de contaminants qui représentent un certain potentiel de danger pour l'environnement et l'humain : présence de produits chimiques dangereux, présence de matériaux explosifs (aérosols, équipements militaires, briquets au butane) et présence de matériaux radioactifs et de moisissure.

1.4.2. La préparation

Les lots commerciaux formés par les collecteurs sont ensuite acheminés à des industries qui se spécialisent dans la préparation des métaux. Puisque la composition chimique des chutes neuves est généralement connue, ce type de produit ne requiert qu'une étape de broyage qui est directement réalisée par les raffineurs qui procèdent ensuite directement à l'étape d'affinage du processus de recyclage de l'aluminium. Compte tenu de la

méconnaissance de la composition chimique de l'aluminium hétérogène, la caractérisation, la préparation et l'affinage se font par des refondeurs. Puisque les alliages de corroyage ont une plus grande intolérance aux impuretés, ils sont produits par les raffineurs qui utilisent presque exclusivement des chutes neuves, tandis que les alliages de moulage sont fabriqués par les refondeurs à partir d'aluminium homogène et hétérogène (European Aluminium Association [EAA], 2004). La préparation des matières premières secondaires nécessite des équipements coûteux et un grand savoir-faire technique et commercial de la part des établissements qui effectuent cette étape. Celle-ci est constituée de trois phases principales. Dans un premier temps, un broyage est effectué afin de réduire et de densifier les produits collectés. Ensuite, un tri est requis afin de séparer les différents composants des produits broyés. Finalement, le rendement de l'aluminium collecté, broyé et trié est déterminé.

1.4.2.1. Broyage

Différents outils de broyage sont actuellement utilisés en fonction de la dimension souhaitée des débris et des caractéristiques physiques des matériaux. Par ailleurs, le choix de la granulométrie requise doit être fait en fonction des équipements de manutention, de triage et de fusion envisagés.

Le *broyeur ou déchiqueteur à déchets* est généralement utilisé pour les véhicules hors d'usage, tandis que le *broyeur à tournures* est employé pour traiter les tournures à long frisons ou ayant une faible masse volumique. Les *concasseurs à percussion*, les *broyeurs à boulets* et les *broyeurs autogènes aérofall* sont utilisés par les fonderies pour récupérer l'aluminium à partir des crasses issues de la perte à feu. Toutefois, les broyeurs sont de moins en moins utilisés dans le traitement des crasses. Le *granulateur à couteaux* sert, quant à lui, à broyer les câbles d'aluminium isolés, les capsules de bouteilles, les emballages, les tournures et les profilés ayant des revêtements en polymères.

Les cisailleuses sont également largement utilisées dans le broyage des produits en aluminium, dont la *cisailleuse alligator*, la *cisailleuse sur pelle hydraulique* pour les produits devant être démontés sur place (avions, bateaux) et la *guillotine*. Celle-ci est reconnue pour avoir une meilleure productivité que la cisailleuse alligator, mais elle requiert une plus grande puissance.

1.4.2.2. Tri

Le tri est une opération clé du recyclage de l'aluminium, car elle influence directement la rentabilité de ce processus en identifiant et en séparant les produits de manière à réutiliser les alliages d'aluminium de la façon la plus avantageuse. Cette phase est réalisée à l'aide de différents procédés physiques et physico-chimiques en fonction de la composition des matériaux. À ce titre, plus la composition est variée, plus le tri est difficile. Il s'en suit que la mise en pratique du « design for recycling » et du « design for disassembling » serait des options de conception favorables à l'augmentation de la rentabilité économique du recyclage de l'aluminium dans une optique de développement durable.

Le *tri manuel* est une méthode qui permet de trier les déchets ménagers et industriels. Celle-ci requiert cependant beaucoup de main-d'œuvre et c'est pourquoi la majorité de l'aluminium en provenance de l'industrie automobile nord-américaine est envoyée en Chine. Cette approche est même plus avantageuse financièrement que le tri automatisé dans de telles circonstances. Le tri manuel est basé sur la reconnaissance visuelle et de la forme, ce qui explique sa faible efficacité pour les composantes ayant de la peinture ou un revêtement quelconque. Des efforts en recherche et développement sont déployés pour trouver une technologie de reconnaissance visuelle qui permettrait de contrer cette faiblesse (Schlesinger, 2007).

Le *tamissage* est utilisé pour retirer la terre et d'autres petits contaminants, tandis que la *classification à jet d'air* permet de retirer les particules de tapis, de plastique, de papier et des éléments de faible densité. Cette méthode est utilisée pour les circuits imprimés et

l'aluminium des voitures lorsque la quantité de matériaux à faible densité est supérieure à celle des matériaux à haute densité. Les équipements existants pour cette opération sont des classificateurs zigzags verticaux à air et des tables pneumatiques.

Il est aussi possible de procéder à une séparation magnétique des matières de recyclage et des matériaux non ferreux à l'aide de *séparateurs magnétiques à tambour* ou de *convoyeurs à courroie magnétique*. Le triage par *courants de Foucault* permet, sous l'effet d'un courant magnétique induit, de faire dériver le parcours des matériaux en fonction de leur conductivité et de leur densité. Pour que ce procédé soit efficace, il faut que les composants aient une conductivité électrique différente. Il est présentement utilisé en Europe pour les débris provenant d'ordinateurs (EAA, 2004). Il est aussi employé pour extraire les canettes d'aluminium des déchets ménagers et dans le traitement des broyats de l'industrie automobile. Les courants de Foucault permettent de séparer les métaux ferreux des métaux non ferreux et stériles. Il existe également des *séparateurs électromagnétiques* qui trient les pièces de façon automatique en analysant la signature électromagnétique de ces pièces. Cette approche est intéressante compte tenu de son faible coût d'opération (Herbulot, 2009b).

Le *trriage par densité* en liqueur dense aqueuse est la méthode la plus utilisée pour la séparation de l'aluminium. Cette méthode consiste à plonger les objets ayant des densités différentes dans un liquide dont la densité est ajustée de façon à ce que les matériaux ayant une densité inférieure flottent et que les autres coulent (Schlesinger, 2007). Ce procédé a lieu dans des séparateurs selon la granulométrie des débris: séparateur Drew Boy (grossière), séparateur à tambour Wemco (grossière), cyclone (fine à moyenne). Les coûts d'exploitation d'un atelier de triage par densité sont répartis de la façon suivante : 30-40 % main-d'œuvre, 15-25 % énergie, 25-35 % maintenance et 10-25 % matières consommables (Herbulot, 2009b).

D'autres techniques sont envisageables pour le tri des alliages corroyés servant à la production d'alliages du même type. La première est basée sur la reconnaissance

visuelle et la réactivité des surfaces des matières recyclables. Il s'agit du *tri par coloration* des composantes à l'aide d'une solution d'hydroxyde de sodium. Les pièces en aluminium ayant du silicium, du fer et du manganèse présentent une teinte grise, tandis que les pièces constituées de cuivre et de zinc auront une teinte noire. Tout comme c'était le cas pour le tri manuel, dès que les pièces ont un revêtement quelconque, cette approche ne peut pas être utilisée. La seconde technique est l'*imagerie au rayon X*. Elle permet de séparer les éléments en fonction d'une image dont la teinte est induite par le numéro atomique et la luminescence qui est fonction de l'épaisseur de la particule. Ce procédé permet de séparer les pièces ayant du cuivre, du fer, du manganèse et du zinc de celles qui ont du magnésium et du silicium (Green, 2007).

Il est aussi pertinent de vouloir séparer les alliages de corroyage des alliages de moulage. Pour réaliser ce tri, il est possible d'utiliser la *méthode « Hot Crush »*. Celle-ci consiste en un chauffage suivi d'un broyage des alliages de moulage et d'un tamisage. Il s'agit de chauffer le mélange d'alliages à une température tout juste en-dessous de la température de fusion des alliages de moulage. Ainsi, les alliages de corroyage, qui ont une température de fusion supérieure, ne sont pas ramollis. Le chauffage permet entre autres de nettoyer la surface des pièces et d'éliminer la peinture et les revêtements. Les alliages de moulage sont ensuite broyés. Après cette étape, il est alors facile de séparer les alliages de moulage des alliages de corroyage qui sont demeurés quasi intacts. L'efficacité de cette approche est d'environ 96 % (De Gaspari, 1999). Le tri manuel peut également être utilisé pour séparer les alliages de corroyage et de moulage en se basant sur l'état de surface plus étincelant des alliages moulés. La méthode de l'imagerie au rayon X peut aussi être employée ainsi que la méthode du tri par coloration.

La technologie la plus récente en matière de tri des pièces en aluminium est le « *Laser-Induced Breakdown Spectroscopy* » (LIBS) qui consiste en une analyse par faisceau de photons de la composition d'un alliage donné en le comparant aux spécifications des standards. Une fois identifiée, la pièce est dirigée vers le bac approprié. Le spectromètre compare la proportion de zinc, de cuivre, de silicium, de manganèse et de magnésium

par rapport aux standards saisis. Il est à noter que la surface analysée ne doit pas avoir de peinture, ni de revêtement. Pour ce faire, un premier faisceau de laser est requis pour évaporer la peinture ou le revêtement et un second faisceau permet de procéder à l'analyse. Cette technologie peut être utilisée pour des pièces de 20 à 50 grammes. Elle est considérée comme étant très performante compte tenu de sa vitesse d'exécution : taux de 3 à 6 tonnes par heure (Schlesinger, 2007). Deux méthodes de tri semblables à la précédente existent, mais elles ne sont pas commercialisées. Il s'agit de tris sans contact basés sur la composition chimique par *spectroscopie fluorescente à rayon X* et de *l'activation spectroscopie fluorescente à rayon gamma*. Cette dernière requiert une longue exposition du faisceau sur le matériau, ce qui est peu profitable pour le tri de débris (Green, 2007). Pendant l'étape du tri, il est aussi courant que des traitements thermiques aient lieu tels que le séchage des tournures et le délaquage.

Il est donc possible de trier les débris métalliques par type d'alliage et par catégorie d'alliage (corroyage vs. moulage). Il pourrait aussi être pertinent de vouloir isoler chaque élément d'alliage. La *crystallisation fractionnée* est une méthode qui permet d'éliminer les impuretés d'un mélange d'alliages et de séparer les éléments d'alliage en immergeant le mélange dans un solvant, en le chauffant et en le refroidissant graduellement de façon à retirer graduellement les matériaux homogènes et purs en fonction de leur point de cristallisation respectif (Gaustad, Olivetti & Kirchain, 2008).

Une fois que la phase de tri est terminée, il faut procéder à la formation de lots commerciaux spécifiques. Les matériaux triés sont homogènes et l'entreprise connaît leur composition chimique. À l'aide de techniques d'optimisation assistées par ordinateur, il est possible de sélectionner le mélange qui engendrera le plus de gains (De Gaspari, 1999).

1.4.2.3. Rendement

Le rendement du métal est exprimé en pourcentage massique. Il correspond à la quantité de métal qu'il sera possible de récupérer suite à l'affinage. Il s'agit de prendre un

échantillon du lot de métal approvisionné qui aura préalablement été compacté. Cet échantillon est refondu dans un four à creuset ou dans un petit four tournant à bain de sel. Le rendement théorique du lot de métal est déterminé en fonction de la perte à feu causée par l'oxydation du métal et l'élimination des oxydes qui a lieu durant cette refonte.

1.4.3. Affinage

L'affinage est effectué par les raffineurs qui utilisent l'aluminium homogène et caractérisé provenant des industries de fusion d'aluminium primaire, mais aussi par les refondeurs qui utilisent un mélange d'alliages corroyés et de moulage provenant de diverses sources. Les principales activités de l'affinage sont la fusion, durant laquelle les lots d'aluminium sont refondus, la séparation des oxydes, durant laquelle les oxydes sont enlevés du mélange liquide, et le traitement du métal, qui permet d'éliminer les impuretés et les contaminants. Dans tous les cas, une dilution avec de l'aluminium primaire est requis dû à la présence d'impuretés et à la concentration élevée en éléments d'alliage. La quantité d'aluminium de première fusion insérée dans le mélange variera selon les propriétés chimiques des lots d'aluminium recueillis, le volume de matériau traité et le type d'alliage à produire.

1.4.3.1. Fusion

La fusion des mélanges d'aluminium se fait dans des fours. Le rôle des fours de fusion est de porter tous les morceaux d'aluminium à l'état liquide par une hausse de température de manière à constituer un bain de métal liquide. Il est à noter que les fours de fusion utilisés pour le recyclage de l'aluminium sont les mêmes que pour la production d'aluminium primaire. Le choix de la technologie d'affinage doit être fait en considérant plusieurs facteurs dont la concentration d'oxydes, de matériaux étrangers, les propriétés physiques de l'aluminium (dimension, ratio masse/surface) et les conditions d'opérations. Plusieurs types de fours peuvent être utilisés : les fours électriques à creuset à bobine courte ou à canal, les fours à sole, les fours tournants et les

fours réverbères (Annexe C, p.112). Les refondeurs préconisent les fours tournants, tandis que les raffineurs utilisent généralement les fours à sole.

Les principales émissions de la fusion de l'aluminium sont des émissions dans l'air. Parmi celles-ci, nous retrouvons de la poussière, de la fumée, des particules métalliques, des matériaux organiques, des oxydes d'azote, du dioxyde de soufre, du chlorure et du dioxyde de carbone. Le tableau 1.1 ci-dessous montre les externalités nuisibles liées à ces émissions (Le Cloirec, 2009).

Tableau 1.1 : Effets des émissions dans l'air sur la santé et sur l'environnement

Catégories	Effets	
	Sur la santé	Sur l'environnement
Poussières	Altération fonction respiratoire: - Irritant - Allergène - Cancérogène ou mutagène	Impact visuel
Métaux lourds	Toxicité	Toxicité et accumulation dans la chaîne alimentaire
Composés organiques	Toxicité: - Cancérogène et/ou mutagène	Effet de serre: - Détérioration couche d'ozone - Dérèglement cycle de Chapman
Oxydes d'azote	- Irritation des muqueuses, yeux et voies respiratoires - Altération des la fonction respiratoire	- Acidification - Corrosion des métaux - Dégradation de la pierre - Pollution photo-oxydante
Dioxyde de carbone	Toxicité: - Altération de la fonction respiratoire (asthme, accélération du débit)	Effet de serre: - Réchauffement climatique - Pluies acides - Acidification de l'océan
Dioxydes de soufre	Irritations pulmonaires	- Acidification - Corrosion des métaux - Dégradation de la pierre

Plusieurs technologies sont disponibles pour réduire l'émission de ces polluants et répondre aux normes environnementales (De Gaspari, 1999). Les électrofiltres, les filtres à tissu, les laveurs, les cyclones et les chambres de décantation peuvent être utilisés pour le traitement des poussières en fonction de la granulométrie de celles-ci. Les procédés de désulfuration peuvent se faire par voie humide (lavage), semi-sèche (tour d'absorption) ou sèche (absorption par agents solides). Les oxydes d'azote sont récupérés par procédés catalytiques ou non catalytiques selon la température des émissions. Pour diminuer l'émission de composés organiques, il est possible d'utiliser des procédés destructifs (oxydation thermique et dégradation biologique), des procédés par transfert (absorption et adsorption) ou des procédés par changement de phase (condensation).

Durant la fusion de l'aluminium, il y a formation d'une couche de laitier composée d'un mélange de sels, d'oxydes d'aluminium, d'aluminium et d'impuretés. Il s'agit du principal résidu produit par la fonte de l'aluminium dans les fours tournants : plus de 500 kg par tonne de matières premières fondues (De Gaspari, 1999). Le laitier est généralement envoyé dans des sites d'enfouissement, mais il est désormais recyclé dans l'industrie de fabrication de canettes et de certains alliages d'aluminium en Europe. Les utilités du laitier dans la fusion de l'aluminium sont les suivantes : (1) recouvre le métal en fusion pour le protéger de l'oxydation, (2) augmente la concentration de métal, (3) élimine certains composants non métalliques et certaines impuretés (calcium, magnésium) et (4) aide à maintenir la température de l'aluminium en fusion par ses propriétés isolantes, mais diminue par le fait même l'efficacité thermique des fours lors de la fonte.

Suite au recyclage du laitier, les impuretés et les oxydes restants sont rendus inertes à perpétuité (stables chimiquement) et utilisés dans l'industrie de fabrication de ciment ou enfouis. En considérant le traitement du laitier, la consommation énergétique associée au recyclage de l'aluminium peut atteindre 12 % de la consommation énergétique de l'industrie primaire. En 1998, l'Association de l'Aluminium du Canada (AAC) a publié un document qui recense les meilleures pratiques en matière d'efficacité énergétique

dans les alumineries. Puisque les équipements de fusion utilisés dans l'industrie secondaire correspondent à ceux de l'industrie primaire, les recommandations de cette publication sont aussi applicables pour le recyclage de l'aluminium. Voici quelques recommandations :

- Conversion d'un type d'énergie à un autre dont le rendement est supérieure.
- Remplacer les moteurs existants par des moteurs à haut rendement.
- Installer des calorifuges sur la tuyauterie qui transfert le métal fondu d'un endroit à un autre.
- Optimiser la position des bruleurs dans les fours réverbères (favorise le transfert de chaleur).
- Améliorer l'étanchéité des fours (saine gestion de l'ouverture et de la fermeture des portes, maîtrise de l'effet de tirage).
- Installation de récupérateurs et de régénérateurs de chaleur sur les cheminées des fours de fusion.

Une fois que la composition du métal liquide désirée est obtenue, le mélange est dirigé vers un four de maintien dans lequel l'affinage des alliages est effectué par l'ajout de composants chimiques et d'agents d'affinage. Des filtres sont aussi utilisés pour éliminer certaines impuretés.

1.4.3.2. Séparation des oxydes

La séparation des oxydes est une opération préalable à l'affinage qui a lieu dans les fours de fusion. Il s'agit de retirer physiquement le laitier en utilisant les méthodes présentées à la section portant sur les impuretés et les contaminants (section 1.3, p.11).

1.4.3.3. Traitement du métal

Le métal liquide doit être traité qu'il s'agisse de la production d'alliages d'aluminium à partir de métal vierge provenant de cuves d'électrolyse dans l'industrie primaire ou de la fusion de métal pour le recyclage. L'objectif principal du traitement du métal liquide est

d'éliminer les métaux très réactifs tels que le magnésium, d'éliminer le fer, de réduire la teneur en hydrogène et la teneur en oxydes. Les procédés utilisés pour ce type de traitement sont détaillés dans la section portant sur les impuretés et les contaminants (section 1.3). Par ailleurs, il est possible d'effectuer cette opération dans les fours de maintien, pendant la coulée des alliages de moulage ou dans les poches de transport, lesquelles permettent la manutention du métal liquide d'un établissement à un autre (Herbulot, 2009c). Durant la fusion, des échantillons du bain de métal liquide sont prélevés afin de procéder à l'analyse de la composition de l'alliage en cours de production. Ce contrôle de qualité s'effectue à l'aide de technologies assistées par ordinateur. La moindre anomalie peut être perçue à la partie-par-million près. Ainsi, suite à plusieurs ajustements, l'alliage produit peut obtenir la certification voulue.

1.4.4. Mise en forme

La mise en forme a lieu à différentes étapes du processus de recyclage de l'aluminium : après le tri, la fusion et/ou l'affinage. Elle peut se faire soit à l'état solide ou à l'état liquide lorsque le mélange de métal en fusion est destiné à la production d'alliages de moulage dès sa réception à la fonderie.

1.4.4.1. Solide

Suite au tri, il est courant que les entreprises procèdent soit à un paquetage, pour les produits minces en vrac et à faible masse volumique apparente, ou à un briquetage. Le paquetage s'effectue à l'aide d'une presse à paqueter hydraulique et permet d'obtenir des paquets facilement enfournables. Le briquetage est plutôt un compactage très dense qui s'effectue également avec une presse hydraulique. Ce procédé permet d'obtenir des briquettes, destinées à la refusion, d'un diamètre de 100 à 150 mm et d'une épaisseur de 100 mm. En ce qui concerne les alliages de corroyage, ceux-ci sont mis sous la forme de billettes, pour la fabrication de profilés et de barres par extrusion, en plaques ou en bandes pour le laminage. Les alliages de moulage sont plutôt mis sous la forme de gros blocs pouvant peser jusqu'à 500 kg ou de lingots dont la masse varie entre 5 et 11 kg.

1.4.4.2. Liquide

L'aluminium peut aussi être transporté à l'état liquide par des poches étanches dans le cas de livraisons juste-à-temps. Cette approche permet de diminuer les coûts et la consommation d'énergie associés à une mise en forme solide intermédiaire.

1.5. L'industrie du recyclage

L'industrie du recyclage des métaux en Amérique du Nord est très développée et plusieurs filières spécialisées sont implantées. En ce qui concerne le recyclage de l'aluminium, nous retrouvons des filières de recyclage de véhicules, d'emballages, de déchets municipaux, de matériaux de construction et d'appareils du domaine de l'aéronautique.

1.5.1. Recyclage des véhicules

Il est aujourd'hui rentable de procéder à un traitement en fin de vie des véhicules obsolètes compte tenu de la disponibilité de leur documentation, de la dimension des véhicules, de la valeur marchande de leurs composants et des technologies existantes. En considérant un poids moyen de 1000 kg par voiture, plus de 13 millions de tonnes de déchets sont produites annuellement par les automobiles hors d'usage en Amérique du Nord (De Marco, Caballero, Cabrero, Laresgoiti, Torres & Chomo, 2007). Heureusement, les filières de recyclage de véhicules sont en mesure de récupérer environ 75 % de la masse des métaux présents dans chaque unité. Près de 70 % des métaux récupérés sont du fer et de l'acier, tandis que les 5 % restants sont constitués de métaux non-ferreux (Srogi, 2008). Par contre, ces métaux non-ferreux représentent environ 50 % de la valeur d'un véhicule hors d'usage (Herbulot, 2009a). Par ailleurs, la valeur marchande de l'aluminium ainsi que sa quantité croissante dans la conception des voitures justifient économiquement son recyclage. Entre 90 et 95 % de l'aluminium présent dans une automobile sont généralement récupérés en pièces ou en alliages via un processus de recyclage en boucle fermée (EAA, 2004). La Directive 2000/53/CE de la

Commission Européenne obligera d'ailleurs que 95 % de la masse d'un véhicule soit recyclée ou récupérée dès 2015.

Le processus de recyclage des véhicules ainsi que les acteurs impliqués sont présentés à l'annexe D, à la page 114. Il est à noter que ce processus sera appelé à être modifié dans les années à venir puisque l'utilisation de matériaux non métalliques risque de s'accroître (Williams, J.A.S., Wongweragiat, S., Qu, X., McGlinch, J.B., Bonawi-tan, W., Choi, J.K., et al., 2007). Le processus de recyclage actuel commence par le drainage des fluides et la décontamination de la voiture. À cette étape, la batterie, les pneus, l'essence et les huiles sont retirés. Cette opération est généralement effectuée par des industries spécialisées dans le démantèlement de voitures. Les démonteurs procèdent ensuite au démantèlement du véhicule en récupérant les pièces valorisables et réutilisables telles que les roues et les boulons de fixation. Le reste du véhicule est ensuite transporté à des industries spécialisées dans le broyage de voitures ainsi que dans le tri des matériaux. Les facteurs qui influencent la rentabilité économique de cette opération sont la valeur marchande du métal, la teneur en métal du véhicule, les équipements utilisés et la proximité de l'entreprise par rapport aux refondeurs (Williams et al., 2007). Par la suite, les débris de broyage passent à travers une série de procédés de tri physiques et automatiques qui permettent de séparer les débris en trois grandes catégories : métaux non-ferreux, métaux ferreux et résidus de déchetage. Une autre approche normalisée et adoptée par les européens permet de séparer les débris par la méthode de tri par densité et à l'aide de la méthode du courant de Foucault (EAA, 2004). Finalement, les métaux non-ferreux sont triés et traités selon les méthodes vues dans les sections précédentes de façon à produire de nouveaux alliages de moulage et d'autres types d'extraits.

1.5.2. Recyclage des emballages

Les emballages sont majoritairement fabriqués à partir de ressources naturelles non renouvelables et, après une courte utilisation, se retrouvent dans la nature. Plusieurs

emballages sont faits à partir d'aluminium comme le montre l'annexe E, à la page 115. Il existe de nombreuses compagnies spécialisées dans le recyclage de ces produits. Le processus général de recyclage présente six étapes: consommation, tri par le consommateur, collecte, triage dans un centre de tri, affinage et fabrication de nouveaux emballages. La collecte des produits d'emballage peut se faire à la source ou par collecte sélective. Dans le premier cas, l'utilisateur apporte à un lieu de regroupement un seul type d'emballage, tandis que dans le second cas, le consommateur regroupe plusieurs matériaux qui devront être triés par la suite (Pothet, 2009).

Le processus de recyclage des canettes de boisson est le plus développé. Une fois les canettes collectées, celles-ci sont mises sous la forme de balles ou de briques ayant une densité maximale de 500 kg/m^3 . Par la suite, ces balles ou ces briques sont broyées, ce qui permet d'obtenir de petits débris et d'éliminer les liquides présents. Les débris métalliques passent ensuite à travers des séparateurs magnétiques permettant de retirer les métaux ferreux. Puis, un tri par jet d'air est effectué pour retirer certains contaminants non-ferreux tels que le zinc et l'acier. Les débris restants sont soumis à un traitement thermique, la pyrolyse, afin d'éliminer les revêtements, les liquides et d'autres contaminants. Ce procédé peut se faire soit par une longue exposition sur un convoyeur circulant dans une chambre à une température de $520 \text{ }^\circ\text{C}$, soit par une exposition à des augmentations de température allant jusqu'à $615 \text{ }^\circ\text{C}$. Ces approches permettent de traiter 1,25 millions de canettes par heure. Suite à la pyrolyse, le métal est fondu, traité contre les impuretés, coulé en lingot ou transporté par poche. Finalement, le métal est mis sous la forme de métal en feuille par procédé thermomécanique en vue de servir de matières premières pour la fabrication de nouvelles canettes (Green, 2007). Il s'agit donc d'un processus de recyclage en boucle fermée.

1.5.3. Recyclage des déchets municipaux

La majorité des municipalités des pays industrialisés sont dotées d'un système de collecte et de recyclage de produits constitués de matériaux valorisables. Il est à noter que la liste des matériaux recyclables varie d'une ville à une autre selon les équipements

et les technologies disponibles. Aussi, les citoyens et les entreprises jouent un rôle important dans ces systèmes puisque ce sont eux qui ont la responsabilité d'effectuer un premier tri manuel des produits après leur consommation. Habituellement, il leur est demandé de mettre dans un contenant les matériaux recyclables, les séparant ainsi des autres déchets. Certains systèmes requièrent plutôt que les ménages et les entreprises trient les produits en fonction de leurs matériaux dans différents contenants ou différents compartiments d'un même contenant. Pour que les systèmes de recyclage municipaux soient efficaces et rentables, il faut donc une participation active des citoyens et des entreprises. De plus en plus, ceux-ci sont sensibilisés par le biais de la publicité ou de projets sociaux.

Suite au premier tri des produits recyclables, des tournées de collecte par camions sont organisées par les municipalités pour récupérer les produits. Quelques fois, un employé se charge de séparer les produits par type de matériaux (métaux, papier, verre) lorsque cette opération n'a pas été réalisée préalablement, tandis que dans d'autres cas, les matériaux sont soit broyés ensemble dans un camion comparable à un camion à ordures ou simplement empilés dans un camion ordinaire. Les camions transportent ensuite leur cargaison à une installation de recyclage municipale. C'est à cet endroit qu'un processus de tri s'opère. Le tri manuel est la méthode de tri la plus répandue. Cette opération peut être facilitée en utilisant un tri par tamisage avec des trommels, lequel permet de séparer les petits éléments, tels que les capsules de bouteilles et le verre, des plus gros produits, tels que le papier et le carton. L'utilisation d'un séparateur à air permet aussi de séparer les matériaux lourds (verre, acier) des matériaux plus légers (aluminium, plastique). Des séparateurs magnétiques peuvent être employés pour séparer les métaux non-ferreux des métaux ferreux. Il est à noter que le procédé de séparation par courant de Foucault est pratiqué dans quelques établissements.

Suite au tri, les produits en aluminium sont finalement achetés par des entreprises de recyclage qui se chargent de produire de nouveaux alliages d'aluminium qui permettront la fabrication de nouveaux produits.

Soit par manque d'information au niveau des produits recyclables ou dû à une faible accessibilité aux systèmes de collecte municipaux, une quantité importante de matériaux recyclables se retrouvent dans les déchets municipaux. Aussi, puisque les établissements de recyclage sont coûteux à construire et à opérer, les pays sous-développés ou en développement optent plutôt pour la mise en décharge des produits recyclables (Schlesinger, 2007). Cela permet à des individus ou à de petites sociétés de récupérer les produits en aluminium et les produits métalliques directement dans les sites d'enfouissement, tel que c'est le cas au Mexique. D'autres municipalités procèdent à l'incinération de leurs déchets, procédé par lequel les déchets sont brûlés à des températures variant entre 700 et 900 °C. Cette approche permet de réduire la masse des déchets de près de 70 % et environ 90 % de leur volume (Ménard, 1999). L'énergie libérée lors de la combustion est réutilisable pour la production d'électricité ou de chaleur. Les résidus de l'incinération, soit les mâchefers, contiennent de l'aluminium et d'autres matériaux. Cet aluminium peut, par la suite, être séparé et récupéré en utilisant la méthode du courant de Foucault (Pothet, 2009).

1.5.4. Recyclage des matériaux de construction et bâtiments

Les bâtiments ont une durée de vie d'environ 50 ans. Ce fait entraîne une problématique au niveau de la connaissance exacte de leur composition en aluminium. Toutefois, il est connu que la majorité de l'aluminium utilisé dans le domaine de la construction se présente sous la forme d'aluminium laminé et que la quantité totale d'aluminium contenue dans un bâtiment représente environ 1 % de sa masse (EAA, 2004). Une étude commandée par l'Association Européenne de l'Aluminium a été menée en France, en Italie, en Espagne, en Angleterre, en Allemagne et au Pays-Bas pour déterminer le taux de récupération de l'aluminium lors de la démolition de bâtisses. Les résultats de l'étude, qui ont été rendus publics en juillet 2007, montrent que ce taux varie entre 92 et 98 %. Le processus de recyclage des matériaux de construction issus de la démolition varie en fonction de l'aspect physique des débris. Lorsque les morceaux sont gros et facilement

identifiables, un tri à la main est suffisant. Les lots formés sont ensuite cisailés et paquetés. Sinon, les matériaux sont broyés et triés par densité (Herbulot, 2009a).

1.5.5. Recyclage en aéronautique

La mise hors service d'un aéronef a lieu lorsque sa maintenance, sa réparation ou son amélioration n'est pas favorable économiquement (Aircraft Technology Engineering and Maintenance Magazine [ATE&M], 2007). Au Canada, il n'existe aucune exigence gouvernementale relative à la fin de vie d'un avion. Une alternative envisageable est le démantèlement de l'avion. Dans ce cas, le type d'avion, son âge, son état, sa localisation, le coût de la collecte des matériaux, les infrastructures disponibles et la technologie utilisée influencent grandement la rentabilité de cette solution (ATE&M, 2007). Selon le président de la compagnie Aircraft End-of-Life Solutions (AELS), qui se spécialise dans la planification et la réalisation de démontages d'avions, plus de 90 % de la masse d'un aéronef peut être recyclée ou réutilisée (Vlieland, 2008). Toutefois, la valorisation des pièces, des composants et des matériaux dépasse rarement 60 % de la masse d'un avion civil puisque les infrastructures requises sont rares et les technologies actuelles de recyclage sont peu profitables (Malavallon, 2008). Il est alors souvent plus rentable pour une compagnie aérienne d'entreposer un avion désuet ou de l'abandonner proche d'un aéroport ou dans le désert. De tels stockages non sécurisés sont préconisés, entraînant ainsi une contamination des sols par les fluides de l'appareil et les métaux toxiques de ses composants tels que le plomb, le chrome et le cadmium (Engineering and Physical Sciences Research Council [EPSRC], 2007).

D'après Boeing, près de 7200 avions atteindront leur fin de vie au cours des vingt prochaines années (Wash, 2008). En considérant une durée de vie utile moyenne de 25 ans, Airbus estime qu'un minimum de 6000 avions sera retiré du service durant cette période (Airbus, 2009). Selon ces prévisions, la quantité annuelle d'avions gros porteurs mise au rancart atteindra une valeur maximale de 200 avions durant les années 2012 et 2018. En ce qui concerne les avions à allée simple, les prévisions maximales sont respectivement de 550 et 600 aéronefs pour les années 2015 et 2025 (Airbus, 2009).

Il a aussi été observé que plus le nombre de matériaux différents utilisés dans la conception d'un avion est élevé, plus il est difficile de disposer de ses pièces ou de réutiliser ses composants, surtout pour les matériaux composites et les polymères qui sont de plus en plus présents dans le secteur du transport (EPSRC, 2007). Le métal de la structure d'un avion est un mélange d'aluminium, de zinc et d'alliages de magnésium (ATE&M, 2007). D'après l'entreprise Bartin Recycling Group, un avion contient entre 65 et 75 % de métaux, dont 85 % d'alliages d'aluminium, 10 % d'acier, 3 % de titane et 2 % de cuivre (Itzkowitch, 2008). Le reste correspond à du bois, des matériaux isolants, du plastique, du verre et du caoutchouc. Certaines pièces sont réutilisables dans l'industrie de l'aéronautique, ce qui représente environ 10 à 20 % de la masse d'un avion.

De façon générale, le procédé de démantèlement d'avions contient les étapes décrites ci-après. Une **dépollution** de l'appareil est effectuée : vidange du kérosène et des fluides, dégazage des réservoirs et dépose des batteries, des éléments pyrotechniques, des matériaux électroniques et électriques. La **récupération** de pièces telles que les sièges, les réacteurs, les moteurs et les trains d'atterrissage. La majorité de ces pièces sont inspectées et certifiées comme étant réutilisables, réparables ou irrécupérables. Les pièces réutilisables sont cataloguées et envoyées à des vendeurs de pièces détachées. Il est à noter que dans le domaine de l'aéronautique, les pièces ont une durée de vie limitée compte tenu des exigences élevée. Une traçabilité de ces dernières est donc obligatoire. La **découpe** de la structure restante est généralement réalisée à l'aide d'une pelle hydraulique à cisailles. Les morceaux obtenus sont **broyés** et **triés** dans certains cas, puis transportés vers des ramasseurs ou des fonderies. Le réseau de création de valeur impliqué dans le démantèlement d'avions est présenté à l'annexe F, à la page 116.

Le recyclage en boucle fermée de l'aluminium en provenance des avions hors d'usage n'est pas une pratique courante puisque les alliages d'aluminium utilisés en aéronautique ont une concentration en éléments d'alliage très élevée et requièrent un faible niveau d'impuretés. Or, il s'avère que les débris issus du broyage de la structure métallique

d'un avion contiennent une quantité importante d'impuretés. De plus, ces débris sont souvent triés de façon grossière, ce qui entraîne une grande variation dans les lots métalliques formés. Pour ces raisons, l'aluminium est plutôt recyclé en boucle ouverte en vue d'être réutilisé pour fabriquer des composants utiles à d'autres secteurs industriels et qui ont une tolérance plus élevée envers les impuretés : les débris sont utilisés pour fabriquer des produits par moulage. La majeure partie des alliages d'aluminium contenus dans la structure métallique d'un avion sont des alliages de corroyage des séries 2xxx (Al-Cu) et 7xxx (Al-Zn-Mg). Ce faisant, les éléments d'alliage les plus présents sont le cuivre, le zinc et le magnésium. Ces alliages peuvent être réutilisés dans le domaine du transport (moteurs, boulons, radiateurs) et dans celui de la construction (ponts, bâtisses). Cela est possible puisque les critères du secteur automobile et de la construction sont beaucoup plus faibles que ceux du secteur de l'aéronautique, lequel accorde une importance particulière à la résistance à la fatigue, à la robustesse, au fluage et à la corrosion. En fait, en aéronautique, les concentrations en fer et en silicium ne doivent pas dépasser 0,15 % et 0,25 % respectivement (Das, 2007). Dans l'industrie automobile, cette concentration s'élève à 0,40 %, ce qui permet la réutilisation des alliages en provenance d'appareils aéronautiques (Das, 2007). D'un autre côté, le fer et le silicium sont des éléments difficiles à contrôler, ce qui fait en sorte que, généralement, les alliages d'aluminium des avions ne sont pas réintroduits dans des composantes d'avion. Il faut cependant préciser que certaines pièces d'aéronef sont moins critiques que d'autres. Par conséquent, elles ne sont pas soumises aux mêmes exigences. C'est le cas des ailerons et des renforts (Das, 2007). À ce jour, Airbus est le seul producteur d'aéronefs à affirmer être en mesure de recycler l'aluminium de ses appareils dans l'aéronautique de façon rentable. Ce sujet sera traité plus en détails dans les chapitres 2 et 3.

Les filières de démantèlement d'avions sont récentes et leurs activités sont peu documentées. De façon générale, les compagnies qui se spécialisent dans le démantèlement d'avions ont un site sur lequel les étapes de dépollution, de démontage, de découpe et de broyage sont effectuées. Ces sites peuvent aussi servir pour les

opérations de maintenance. Une étude des principaux sites de démantèlement aéronautique (SDA) est présentée au chapitre 2. Dans tous les cas, les compagnies doivent avoir une bonne connaissance de l'appareil. Il est à noter que la conception des avions évolue rapidement. Ce fait rend difficile la mise en application d'un procédé de recyclage uniforme compte tenu de la différence fondamentale qu'il y a entre les vieux avions et les avions plus récents. Il faut donc développer des stratégies flexibles de démantèlement et de tri. Un modèle d'optimisation mathématique est présenté au chapitre 3 dont l'objectif est de déterminer la stratégie de découpe la plus rentable au niveau économique.

1.6. Santé et sécurité

Le processus de recyclage de l'aluminium représente des risques pour la santé et la sécurité des employés œuvrant dans l'industrie de la production d'aluminium secondaire. En effet, les travailleurs sont souvent exposés à des conditions de travail dangereuses lors du tri des matériaux, du broyage et de la fusion du métal. L'environnement de travail dans lequel ils œuvrent est caractérisé par plusieurs sources de danger, qu'il s'agisse de la chaleur, de la poussière, du bruit ou de la présence d'éléments tranchants. Pour améliorer cette situation, l'automatisation du tri, du broyage et de la fusion s'avère une option intéressante afin de réduire le contact de l'homme avec les sources potentielles de danger. Aussi, il serait pertinent d'améliorer les équipements en ajoutant des gardes, des filtres à poussières, des broyeurs anti-explosifs, etc. De plus, il faudrait une plus grande régulation des entreprises de collecte de débris métalliques et de triage pour contrôler la mise en décharge des produits dangereux, pour diminuer l'exposition de la population au bruit, pour assurer un environnement de travail sécuritaire et pour effectuer un contrôle des émissions. Il est aussi souhaitable que des pratiques standards de recyclage soient développées dans l'ensemble des filières tel que c'est le cas pour les centres de tri de déchets municipaux américains qui relèvent de la norme ANSI Z245.41 intitulée « Equipment Technology and Operations for Wastes and Recyclable Materials Facilities for the Processing of Commingled Recyclable Materials

— Safety Requirements ». Un effort doit donc être fait pour rendre le recyclage de l'aluminium plus sécuritaire.

La majorité des compagnies impliquées à toutes les étapes du processus de recyclage d'aluminium en boucle ouverte sont des PME privées qui offrent une quantité importante d'emplois directs et indirects. Le recyclage en boucle fermée est plutôt réalisé par de grandes entreprises telles qu'Alcoa et Rio Tinto Alcan. En 2004, les industries européennes de recyclage d'aluminium ont employé plus de 10 000 personnes (EAA, 2004). Malgré le fait que ces emplois soient bien rémunérés, il est difficile pour l'industrie de la fonderie de recruter du personnel qualifié (Fouret, 2009). Pour contrer cette difficulté, quatre axes d'amélioration sont proposés dans l'article de Jean-Louis Fouret : l'amélioration de la qualité des produits finis, de la productivité des installations, des conditions de travail et de la valeur ajoutée des produits. En ce qui concerne l'environnement de travail, des mesures doivent être prises pour assainir l'air et permettre sa circulation, pour maintenir la température ambiante de manière uniforme et adéquate, pour fournir un éclairage suffisant aux postes de travail en fonction des tâches qui y sont accomplies, pour réduire la propagation du bruit et pour concevoir des postes de travail ergonomiques. L'automatisation de certaines opérations peut également réduire l'exposition des travailleurs au bruit, à la vibration et à la poussière puisque le rôle de ceux-ci devient plutôt un rôle de surveillant. L'enrichissement des tâches obtenu par la rotation des postes entre les opérateurs et l'augmentation du pouvoir décisionnel de ceux-ci (plus grande autonomie) peuvent également améliorer la satisfaction des employés et faciliter le recrutement de personnels qualifiés.

D'après un document produit par la Commission européenne sur les meilleures pratiques dans l'industrie des métaux non-ferreux, la prévention des accidents se fait selon trois principes : le principe de prévention selon lequel il faut des installations munies des meilleures techniques en matière de sécurité, le principe de prise en considération des systèmes complexes de production par une approche d'analyse systématique de la sécurité et le principe de nivellement des exigences de sécurité en fonction du type de

risque rencontré et du potentiel de nuisance. Au Québec, les alumineries possèdent le meilleur bilan du secteur de l'industrie lourde en matière de santé et sécurité puisqu'elles ont un des plus faibles taux de cotisation à la Commission de la santé et de la sécurité du travail (AAC, 2009a). Les alumineries québécoises, dont Alcoa, Aluminerie Alouette et Rio Tinto Alcan, sont certifiées ISO 14001. Elles sont donc sujettes aux plus hauts standards environnementaux sur leurs émissions atmosphériques, leurs rejets liquides et la gestion de leurs émissions. Elles mettent en œuvre des actions permettant une utilisation optimale des ressources, une réduction à la source, le réemploi et le recyclage des matériaux ainsi qu'une valorisation des résidus de production. Le Programme des Nations Unies pour l'environnement a mis sur pied des indicateurs environnementaux auxquels l'IAI et l'AAC ont adhéré.

Les outils permettant de minimiser l'impact environnemental des fonderies et d'accroître la santé et la sécurité des gens sont donc disponibles. Il s'agit alors d'étendre leur utilisation aux multiples PME qui opèrent dans l'industrie secondaire de l'aluminium et qui ne sont pas membres de l'AAC de façon à atteindre un équilibre entre la viabilité économique, l'atténuation des impacts environnementaux et l'amélioration des conditions sociales de la collectivité.

1.7. Législation, régularisation et standardisation

L'IAI a mis au point un outil informatique qui modélise les activités de recyclage des métaux. Cet outil permet de réaliser des simulations et d'anticiper l'évolution mondiale de l'industrie du recyclage. D'après ce modèle, l'approvisionnement mondial en produits métalliques pour l'industrie du métal recyclé en provenance des déchets post-consommation atteindra près de 13 millions de tonnes d'ici 2020 (AAC, 2007). En considérant l'apport additionnel en provenance des chutes neuves et des tournures ainsi que la capacité limitée d'extraction de certains métaux, il est permis de croire que les entreprises de recyclage auront un rôle de plus en plus important à assumer dans l'avenir. L'aluminium est le matériau recyclable le plus rentable au niveau économique, ce qui justifie les pratiques actuelles des filières de recyclage de l'aluminium. Il faut

cependant s'assurer que le recyclage soit supporté également par les autorités gouvernementales et la société par l'entremise de programmes d'incitation à la récupération et au recyclage. Non seulement faut-il encourager le recyclage, mais aussi sa réglementation ou sa régulation afin de minimiser ses impacts négatifs sociaux et environnementaux.

1.7.1. Principe pollueur-payeur et responsabilité élargie des producteurs

Pigou a proposé en 1920 la prise en compte des effets externes liés à l'activité humaine par l'entremise d'un système de taxation. Cette proposition a mené à l'élaboration du principe pollueur-payeur (PPP), un des principes du développement durable, établi par l'Organisation de Coopération et de Développement Économiques (OCDE). Selon ce principe, le prix des biens et services mis sur le marché doit refléter les coûts de production et des ressources utilisées. Il stipule que le pollueur doit prendre en compte les coûts de l'utilisation ou de la détérioration des ressources environnementales. C'est aux législateurs des pays membres de l'OCDE, dont le Canada, que revient le devoir d'établir la portée de l'internalisation des coûts et de déterminer qui sont les pollueurs (Barde, 1991). Le principe de la Responsabilité Élargie des Producteurs (REP) vise, quant à lui, à responsabiliser les manufacturiers face à la fin de vie de leurs produits. Il favorise le transfert de la responsabilité économique et matérielle en amont du cycle de vie, en totalité ou partiellement. Il mène donc à une prise en compte des impacts environnementaux à la source de la part des producteurs qui pourraient se voir imposer les coûts associés au traitement en fin de vie de leurs produits (déchets, pollution). L'objectif principal de ce second principe du développement durable est d'encourager l'éco-conception et la récupération des matériaux (Forslind, 2005). Dans ce cas, les législateurs doivent déterminer les produits et les producteurs ciblés, leurs obligations et les objectifs poursuivis (Gendron, Dussault, Juneau & Savoie, 2008). Le PPP et la REP ne définissent pas en eux-mêmes des politiques environnementales. Ce sont plutôt des

instruments environnementaux à la portée des gouvernements qui souhaitent mettre en œuvre de telles politiques.

1.7.2. Politiques environnementales et standardisation

Au Canada, les politiques environnementales en vigueur ne concernent pas le traitement en fin de vie des produits de consommation, sauf s'il s'agit de produits qui contiennent des matières dangereuses ou s'il s'agit de l'immersion de déchets en mer. Seules les matières dangereuses constituant les produits font l'objet d'une attention particulière, comme c'est le cas pour la récupération des fluides des véhicules hors d'usage au Québec. Cependant, la Politique québécoise de gestion des matières résiduelles 1998-2008 mentionne que les manufacturiers de produits composés de matières dangereuses pourraient éventuellement être contraints de prendre en charge la fin vie de leur production. Cet avertissement s'est d'ailleurs concrétisé pour certains producteurs par le « Règlement sur la récupération et la valorisation des contenants de peinture et des peintures mis au rebut (2001) » et par le « Règlement sur la récupération et la valorisation des huiles usagées, des contenants d'huile ou de fluides et des filtres usagés (2004) » (Gendron, Dussault, Juneau & Savoie, 2008). Certes, il existe une loi canadienne sur la protection de l'environnement et une loi canadienne sur l'évaluation environnementale des projets, mais ces lois ne s'appliquent pas au traitement en fin de vie des avions. De plus, il n'existe aucun règlement qui oblige ou favorise le recyclage, et ce pour l'ensemble des matériaux recyclables. D'autres pays ont cependant mis en place des outils efficaces qui promeuvent des traitements en fin de vie respectueux de l'environnement. En effet, en Europe, la Directive 2000/53/CE imposera le recyclage et la récupération de 95 % de la masse d'un véhicule à l'ensemble des pays membres de l'Union européenne d'ici 2015. Actuellement, la directive européenne sur les véhicules hors d'usage requiert la prise en charge des véhicules par les manufacturiers, considérés comme étant les pollueurs, ainsi que le recyclage et la récupération de 85 % des matériaux des voitures. L'annonce du nouveau seuil de la directive encourage les manufacturiers de véhicules à développer des méthodes et des technologies qui

permettront éventuellement de répondre à la nouvelle exigence établie. La « Directive sur les déchets d'équipements électroniques et électriques » (Directive WEEE) est un autre exemple. La législation peut donc avoir une influence importante sur les pratiques de l'industrie du recyclage. La taxation peut également jouer ce rôle. En Russie, une taxe sur l'exportation des produits obsolètes en aluminium a été imposée afin de favoriser le recyclage de ce matériau dans ce pays, tandis que l'Inde a plutôt opté pour une taxe sur l'importation de ces produits afin de protéger l'industrie indienne d'aluminium primaire (Schlesinger, 2007). En Europe, une taxe a été instaurée sur l'importation de l'aluminium primaire de façon à favoriser le recyclage de l'aluminium, malgré le fait que cette taxe puisse avoir un impact au niveau de l'affinage des alliages d'aluminium.

Même s'il n'y a pas de loi relative au traitement en fin de vie des produits non dangereux au Canada, il y a des normes et des règlements en matière d'émissions de polluants dans l'air et dans l'eau ainsi qu'au sujet des rejets industriels solides et liquides. Les équipements utilisés dans le tri, le broyage et la fusion du métal doivent également satisfaire certaines exigences au niveau de la sécurité et au niveau technique.

En 2000, l'agence de protection environnementale américaine a révisé les exigences environnementales des technologies utilisées dans les fonderies en territoire américain. Malheureusement, suite à cette révision, plusieurs petites fonderies ont été contraintes de fermer puisque leurs équipements étaient désuets et peu performants au niveau environnemental. Un second impact négatif de cette législation a été le déplacement des activités polluantes dans d'autres régions du monde où les lois environnementales sont moins sévères comme c'est le cas au Mexique et en Chine. Bref, l'État peut se doter d'outils économiques tels que des taxes, des redevances ou des permis d'émissions. Il peut également réglementer les pratiques de l'industrie du recyclage de l'aluminium de façon à améliorer le traitement en fin de vie des biens de consommation et minimiser l'impact environnemental global relié aux activités de recyclage. Toutefois, dans une logique de développement soutenable et par souci de cohérence, il est souhaitable de veiller à ce que la pollution ne soit pas déplacée dans d'autres régions et d'aider

financièrement les PME touchées par la réglementation. Ce dernier point est d'ailleurs traité dans la loi canadienne sur la fondation du Canada pour l'appui technologique au développement durable.

Quelques standards peuvent être appliqués dans l'industrie du recyclage de l'aluminium. En effet, il est possible pour les industries concernées d'obtenir une certification ISO 9001 et/ou ISO 14001, qui sont respectivement des normes qui ont trait à la qualité totale et aux systèmes de gestion de l'environnement (SGE). Il existe également des classifications nationales et internationales des lots de débris d'aluminium formés suite au broyage et au tri (EAA, 2004). Il est à noter qu'une plus grande standardisation des pratiques du recyclage de l'aluminium permettrait d'établir une industrie plus uniforme et plus intégrée.

1.8. Conclusion

Cette revue détaillée des aspects techniques, sociaux, environnementaux et économiques associés au recyclage de l'aluminium permet donc de situer le recyclage de l'aluminium en provenance de l'aéronautique dans son contexte. Dans tous les cas, nous pouvons conclure que le recyclage de la carcasse d'un avion est souhaitable au plan environnemental puisque nous savons que l'aluminium recyclé requiert moins d'énergie, moins de matières premières et moins d'eau lors de sa production, qu'il émet moins d'émissions polluantes et qu'il réduit la quantité de déchets mise en décharge. Nous connaissons désormais le processus de recyclage de l'aluminium, les équipements et les technologies existantes ainsi que les pratiques actuelles en recyclage dans plusieurs industries. Puisque le recyclage de l'aluminium aéronautique est une pratique très récente et peu documentée, une recherche plus approfondie sur les modèles d'affaires et les activités des compagnies de démantèlement d'avions est requise pour se familiariser avec le processus de démantèlement, les acteurs et les flux de matières impliqués dans ce secteur industriel en essor. Les résultats de cette recherche sont présentés au chapitre suivant.

CHAPITRE 2 : ÉTUDE DES SITES DE DÉMANTÈLEMENT AÉRONAUTIQUE ET MODÈLES D’AFFAIRES

Dans le chapitre précédent, il a été mentionné que le nombre élevé de mises hors service d’avions prévu au cours des prochaines années représente un défi environnemental et économique important. Actuellement, près de 150 avions commerciaux sont retirés du service annuellement (Airbus, 2009). Des études effectuées par Airbus ont montré que le tiers de ces appareils sont démantelés. Les autres avions sont entreposés, abandonnés à proximité des aéroports, laissés pour compte dans les déserts ou vendus à des pays du tiers monde (Mackenzie, 2008). La durée de vie des avions étant évaluée entre 25 et 30 ans (Watson, 2008; De Brito, Van der Laan & Irion Brijan, 2007), ce sont aujourd’hui les appareils qui ont été mis en service il y a une trentaine d’années qui atteignent leur fin de vie. La production annuelle mondiale d’avions commerciaux de cette époque était de beaucoup inférieure à celle de notre temps : 200 avions à comparer à 1 000 avions de nos jours (Constant, 2007). Une hausse importante de la demande en démantèlement aéronautique est donc à prévoir dans les années à venir.

Un besoin en gestion intégrée et respectueuse de l’environnement de la fin de vie des aéronefs s’est concrétisé par l’apparition de quelques compagnies de démantèlement aéronautique au cours des cinq dernières années, par l’implication des deux plus grands producteurs mondiaux d’aéronefs, Boeing et Airbus, et par des efforts en recherche et développement dans le domaine du recyclage, notamment de la part des entreprises Rio Tinto Alcan et Rolls-Royce, et de consortiums de recherche tels que WINGNet. D’après Olivier Malavallon, directeur des projets environnementaux pour la compagnie Airbus, le processus de démantèlement aéronautique le plus fréquemment employé permet de recycler une quantité de métaux non-ferreux équivalente à 30 % de la masse d’un aéronef vidangé de ses fluides. Selon lui, cette pratique permet de récupérer en moyenne 60 % de la masse d’un avion vidangé de ses fluides en considérant les autres matériaux valorisables et la re-certification des pièces détachées et des équipements ainsi que leur recyclage (Kingsley-Jones, 2008). Un tel processus requiert environ deux jours

d'ouvrage pour un gros porteur (Kingsley-Jones, 2008). Ces pourcentages permettent de supposer que les pratiques actuelles de démantèlement peuvent être améliorées. C'est dans l'optique de rendre ce processus plus efficient que le projet d'envergure Pamela a été mené à terme par Airbus et plusieurs partenaires. D'un autre côté, une organisation nommée Aircraft Fleet Recycling Association (AFRA) a été fondée en 2006 par onze compagnies, dont Boeing, dans le but de déterminer et promouvoir les meilleures pratiques et technologies de gestion de flottes d'avions en fin de vie. Cette association offre d'ailleurs un programme de certification pour les entreprises qui désirent répondre à leurs standards de bonnes pratiques.

Il est à noter que le processus de démantèlement d'avions fait intervenir des opérations de désassemblage, de maintenance et de re-certification de pièces et d'équipements réavionnables à durée de vie limitée. Ce faisant, les compagnies qui se spécialisent dans le démantèlement aéronautique, qu'elles soient accréditées par l'AFRA ou non, doivent être conformes aux standards de la réglementation 571 du Règlement de l'Aviation Canadien (RAC), PART-145 de l'administration fédérale de l'aviation des États-Unis (FAA) ou EASA Part 145 de l'Agence Européenne de la Sécurité Aérienne (EASA). Ces certifications équivalentes confèrent le droit d'opérer un centre de maintenance et de réparation d'avions incluant la réparation et/ou la remise en service de pièces et d'équipements réavionnables ou leur altération dans le cas contraire. Les lois et les standards sur l'environnement, la santé et la sécurité, applicables selon la juridiction dans laquelle se trouve le site de démantèlement aéronautique (SDA), doivent également être respectés.

Il est évident que les quantités de matériaux et de composantes contenues dans un aéronef varient en fonction du modèle considéré et que leur valeur marchande est grandement influencée par les méthodes et les technologies employées pour leur récupération, leur recyclage ou leur valorisation ainsi que le coût des matières premières. D'après Gary Kippur, président de la compagnie Tucson Iron & Metal, il est possible de récupérer l'équivalent de 20 000 USD d'aluminium à partir d'un Boeing 747, suivant le

processus de démantèlement utilisé par Evergreen Trade Inc., compagnie qui œuvre dans le démantèlement aéronautique (Tegtmeir, 2007). Il faut cependant préciser que le processus utilisé ne permet pas de réintroduire l'aluminium collecté dans le domaine de l'industrie aéronautique. Si tel était le cas, la valeur marchande des lots d'alliages d'aluminium serait supérieure. Selon Charles Kofyan, responsable du site de Bartin Aero Recycling, les 75 tonnes d'aluminium issues du démantèlement d'un Airbus 320 peuvent rapporter 30 000 euros pour une valeur de revente fixée à 400 euros la tonne (Poirot, 2009). À titre comparatif, en considérant que le poids moyen d'une canette de breuvage en aluminium de 350 ml est de 13 g (AAC, 2009b), cette quantité d'aluminium récupérée correspond à près de 5 769 231 canettes. Néanmoins, la vente des pièces détachées est actuellement plus lucrative. En effet, un A 320 vieux de 15 ans vaut près de 3 millions d'euros en pièces détachées, ce qui est supérieur à sa valeur résiduelle (Poirot, 2009). Jean-Luc Taupiac, représentant d'Airbus France, prétend entre autres que « les sièges, les systèmes embarqués, le train d'atterrissage, les moteurs ou la nacelle peuvent représenter à eux seuls 5 millions d'euros » (Lemoine, 2009). Les initiatives en matière de traitement en fin de vie des aéronefs sont donc également encouragées par les retombées économiques potentielles que représentent la récupération des constituants de l'avion, le recyclage des matériaux à leur plus haut niveau de pureté et la vente des pièces détachées. Par ailleurs, il est permis de croire que le démantèlement d'avions, qui favorise le contrôle de la traçabilité des pièces et des équipements aéronautiques, contribue à l'amélioration de la fiabilité et de la sécurité des appareils aériens puisque selon Jean-Luc Taupiac et plusieurs autres, il existe un marché noir de revente de pièces détachées non contrôlées (Mackensie, 2008).

Le présent chapitre a comme objectif d'étudier les différents modes de fonctionnement des entreprises de l'industrie du démantèlement aéronautique, de modéliser, d'analyser et de comparer leur approche respective. Quelques définitions ainsi que la méthodologie de collecte de données utilisée sont d'abord présentées, suivies de l'historique de l'organisation AFRA et de son implication dans l'industrie du démantèlement aéronautique.

2.1. Définitions et collecte de données

Dans un premier temps, il est important de définir et de distinguer deux des principales opérations du processus de démantèlement d'avion. Le *désassemblage* (démontage ou dépose) est l'étape qui regroupe les activités nécessaires à la récupération de l'ensemble des pièces et des équipements pouvant être réutilisés dans un autre avion incluant la recertification et la réparation lorsque requis. Le désassemblage doit être effectué avant l'étape de *démantèlement* (déconstruction). Le démantèlement consiste en un ensemble d'activités qui mène à une mise en forme des matériaux valorisables en vue de les recycler et des déchets en vue de les éliminer (AELS, 2009). Le tableau 2.1 de la page suivante contient une liste non exhaustive des matières dangereuses contenues dans un avion et des déchets généralement issus du processus de démantèlement. Les éléments pouvant intégrer une chaîne logistique inverse tels que les pièces et les équipements réavionnables ainsi que les matériaux recyclables ou valorisables y sont également identifiés. L'annexe G de la page 117 situe ces composants sur un avion. Il faut préciser que certaines parties principales d'un aéronef telles que les ailes, l'empennage et les sections de fuselage peuvent être entièrement récupérées et réutilisées dans un avion du même modèle que l'original (De Brito, Van der Laan & Irion Brijan, 2007).

Une collecte de données auprès des principales compagnies de démantèlement aéronautique a été effectuée. La contribution de ces compagnies s'est faite sur une base volontaire. Ce faisant, l'information recueillie varie selon la politique de confidentialité de chaque entreprise. Les cinq compagnies qui ont participé à ce projet sont les suivantes : Tarmac Aerosave, Bartin Aero Recycling, Evergreen Trade Inc., Aircraft End-Of-Life Solutions et Air Salvage International. La figure 2.1 de la page suivante situe chacune de ces entreprises dans le monde. La majorité des informations présentées dans les sections suivantes est donc issue de contacts en entreprise via un questionnaire, par téléphone, par courriel ou suite à des visites industrielles et à partir des sites web des organisations ou de publications parues dans des journaux (Annexe H, p.118).

Tableau 2.1 : Liste des composantes et des matériaux d'un aéronef à considérer dans la gestion en fin de vie

Matières dangereuses et déchets	Batteries et blocs de batteries, chlorofluorocarbones, liquides hydrauliques, bouteilles extincteurs et cartouches, bouteilles de dioxygène portables, générateur de dioxygène, masques à oxygène chimique, néons, détecteurs de fumées, engins pyrotechniques, kérosène, accumulateurs hydrauliques, ampoules fluorescentes, uranium appauvri, planchers, toilettes, lavabos, signes de sortie d'urgence, matériaux composites, revêtements de la cabine, revêtements de la cale à marchandise, matériaux d'isolation, tapis, amiante, plastiques.
Pièces et équipements réavionnables et/ou recyclables	Instruments d'avionique, réacteurs, moteurs, générateur auxiliaire de bord, trains d'atterrissage, équipements et pièces sérialisés ¹ , parties mobiles de voilure, sièges, équipements hydrauliques, système électronique de commandes de vol, équipements de sécurité.
Matériaux recyclables ou valorisables	Caoutchouc (pneus), alliages d'aluminium (fuselage, ailes, empennage), plastique, cuivre (systèmes électroniques, câbles), fibres de carbone (panneaux structuraux), titane, essence, huiles, fluides hydrauliques, acier, matériaux composites (<i>rarement recyclés du à l'inefficacité des technologies existantes</i>).

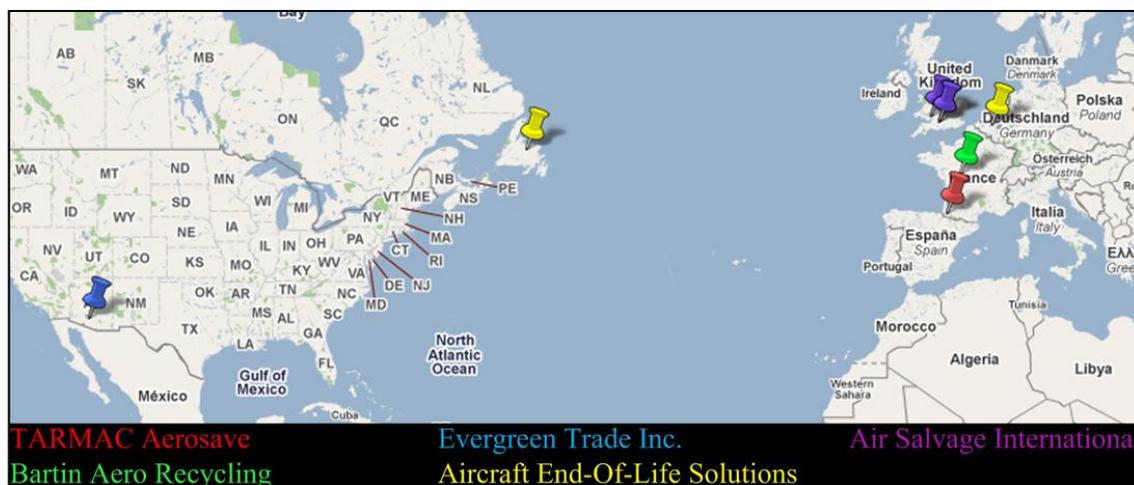


Figure 2.1 : Emplacement des sites de démantèlement aéronautique à l'étude

¹ Un modèle d'avion Airbus contient environ 2000 équipements/pièces sérialisés (Challier, 2008).

2.2. Aircraft Fleet Recycling Association (AFRA)

L'AFRA est un consortium international qui regroupe trente-neuf membres en provenance de l'industrie ou non, dont l'université Oxford, laquelle est impliquée dans le regroupement WINGNet. Parmi les industriels se trouvent des manufacturiers tels que Boeing, Pratt & Whitney et Rolls-Royce, des spécialistes du démantèlement aéronautique tels que Barting Recycling Group, Air Salvage International et Evergreen Tarde Inc., des courtiers en pièces détachées ainsi que des commerçants de matériaux recyclables et valorisables tels que Robert Gibbs Company (aluminium) et Milled Carbon Ltd. (matériaux composites). L'AFRA est une organisation à but non lucratif (OBNL) qui a été fondée par onze membres en 2006: Adherent Technologies, Air Salvage International, Barting Recycling Group, Boeing, Châteauroux Air Center, Evergreen Air Center, Europe Aviation, Huron Valley Fritz West, Rolls-Royce et WINGNet. La mission de cette OBNL, qui est aussi une organisation non gouvernementale (ONG) de par son caractère international, est de pouvoir offrir aux propriétaires d'avions une gestion intégrale de leur flotte d'avions responsable de l'environnement et sécuritaire incluant le traitement des avions désuets. Ses principaux objectifs sont les suivants: (1) permettre le retour sécuritaire et rentable d'aéronefs sur le marché, (2) encourager la réutilisation sécuritaire des pièces et des équipements aéronautiques et (3) favoriser le recyclage et la valorisation sécuritaires des matériaux. Pour ce faire, l'ONG a rédigé un guide des bonnes pratiques intitulé « Best Management Practice (BMP) for Management of Used Aircraft Parts and Assemblies »² en collaboration avec de l'Aviation Suppliers Association (ASA). Paru en 2008, ce guide recense les standards minimaux à privilégier au niveau des installations de démantèlement, des qualifications, de la documentation, des outils, des équipements, de la gestion des pièces et des équipements aéronautiques, du recyclage et de l'environnement. Ce document sert de référence pour le programme de certification

² Ce document est accessible sur le site web suivant :
http://www.afraassociation.org/AFRAPartsBMPv1_1.pdf

offert par l'AFRA. À ce jour, huit compagnies ont été accréditées suite à des audits. Cette certification n'a cependant aucune valeur légale.

2.3. Le centre Tarmac

2.3.1. Historique du site Tarmac

Le projet Pamela, qui s'est échelonné du 1^{er} mars 2005 au 30 novembre 2007, a servi de projet pilote à l'élaboration de l'une des premières plates-formes européennes de stockage, de maintenance et de démantèlement d'aéronefs dans une optique de gestion intégrée de la fin de vie de ces appareils et dont les objectifs sont détaillés dans le tableau 2.2 de la page suivante.

Plusieurs partenaires ont été impliqués dans ce projet de 3.3 millions d'euros : la Préfecture des Hautes Pyrénées, la DRIRE (Direction Régionale de l'Industrie de la Recherche et de l'Environnement), Suez-Sita, EADS Innovation Works, EADS-Sogerma Services et Airbus. Le tiers du budget a été financé par la Commission Européenne par l'entremise du programme européen LIFE qui a comme rôle de supporter financièrement les projets européens environnementaux et de conservation de la nature.

Suite à l'analyse du démantèlement d'un avion prototype d'Airbus (Annexe I, p. 120), les bonnes pratiques de déconstruction aéronautique ont été répertoriées dans un document conçu par Airbus intitulé « Training Kit »³. Voici la principale conclusion du projet:

« [...] la valorisation optimale des éléments d'un avion dans des conditions de sécurité et dans le strict respect de l'environnement est réalisable dans des conditions économiquement viables permettant ainsi d'assurer un débouché industriel » (Tarmac Aerosave, 2009).

³ Ce document est accessible sur le site web suivant :
<http://www.pamelalife.com/resultats/Pamela-TrainingKit-English.pdf>

Pamela a également permis de démontrer qu'entre 70 et 80 % massiques des pièces et des équipements d'un aéronef peuvent être réutilisés dans l'aviation ou recyclés en boucle fermée (Watson, 2008). Au niveau du recyclage de l'aluminium, la filiale de Rio Tinto Alcan nommée Alcan Global Aerospace, Transportation and Industry (ATI) a été largement impliquée dans les tests et dans le développement de technologies de recyclage permettant d'obtenir des alliages d'aluminium de haute pureté (Aircraft Engineering and Aerospace Technology [AEAT], 2009).

Tableau 2.2 : Objectifs détaillés du projet Pamela

Objectifs	Détails
Règlementaire	Servir de référence pour la réglementation européenne et la normalisation dans le domaine du stockage, du démontage, de la déconstruction et du recyclage ou de l'élimination des matériaux issus des avions en prévision d'une extension de la directive européenne sur les véhicules hors d'usage. Le projet visait à démontrer que 85 à 95 % de la masse des composantes et des matériaux d'un avion drainé de ses fluides pourrait être recyclé, récupéré ou réutilisé de manière sécuritaire et respectueuse de l'environnement d'ici 2015.
Environnemental	Adopter une attitude proactive en prévision de l'augmentation de la quantité annuelle d'avions atteignant leur fin de vie de façon à minimiser l'impact environnemental de ces mises hors service et à récupérer des matériaux non renouvelables et rares. Maximiser la récupération des matériaux.
Économique	Participer à l'essor d'un marché en pleine expansion au niveau de la vente des pièces détachées, des équipements et des matériaux valorisables.
Sécuritaire	Améliorer la traçabilité des pièces et des équipements réavionnables pour contrer leur revente sur le marché noir. Développer un processus de déconstruction respectueux de la santé et de la sécurité des travailleurs.
Image	Opter pour une approche globale du cycle de vie et prendre en compte la responsabilité environnementale des manufacturiers à toutes les étapes de ce cycle à partir de la conception jusqu'à l'élimination.
Financier	Soutenir une activité industrielle génératrice d'emplois et de gains financiers.
Technologique	Permettre l'établissement d'un procédé industriel respectueux de l'environnement tout en testant les technologies existantes et en évaluant de nouvelles possibilités par l'intermédiaire de la recherche, du développement et du savoir-faire des partenaires impliqués. Déterminer les bonnes pratiques en matière de déconstruction sélective et exporter la connaissance acquise et les technologies développées dans d'autres pays.

(Sources : Pamela-Life, 2009; De Brito, Van der Laan & Irion Brijan, 2007; Airbus, 2009)

L'industrialisation du projet Pamela a mené à la création d'un centre de référence de déconstruction aéronautique nommé TARMAC (Tarbes Advanced Recycling and Maintenance Aircraft Company) qui est géré par la compagnie TARMAC Aerosave. Un service de stockage d'avions en vue d'une remise en état ou de la vente d'occasion, des services de démontage, de gestion et de certification d'équipements réavionnables ainsi qu'un service de démantèlement d'avions sont désormais offerts sur le site qui a débuté ses activités en février 2009 (Bousquet, 2009). Le PDG de la plate-forme, Philippe Fournadet, prévoit que 70 % des appareils stockés seront remis en service et que les autres aéronefs seront déconstruits (JWF, 2009). La plate-forme est conforme à la réglementation AESA Part 145 pour les modèles d'avions commerciaux suivants : A300, A310, A318, A319, A320, A330 et A340. Les équipes de travail et les procédures sont également conformes à cette réglementation. À long terme, l'entreprise prévoit démanteler les avions en provenance de tous les manufacturiers existants (Mackenzie, 2008) et même des hélicoptères (Constant, 2007). TARMAC est aussi classé ICPE, c'est-à-dire Installation Classée pour la Protection de l'Environnement. Par ailleurs, Tarmac Aerosave possède plusieurs partenaires industriels qui lui permettent d'utiliser des technologies récentes : Airbus, TASC Aviation (filiale d'Airbus), SITA France (gestion globale des déchets, société du groupe Suez Environnement), Snecma Service (maintenance et service pour les moteurs Snecma, société du groupe Safran), Equip'Aero (conception, construction, maintenance d'équipements aéronautiques) et Aeroconseil (ingénierie et services aéronautiques).

2.3.2. Description du site de démantèlement aéronautique

La plate-forme de démantèlement située à l'aéroport de Tarbes-Lourdes-Pyrénées en France est un site entièrement dédié à la déconstruction aéronautique (Fig. 2.2, p. 50). L'aéroport est muni d'une piste de 3000 m et sa superficie totale est de 0,3 km². Tarmac Aerosave possède un hangar d'une superficie de 8000 m² pouvant accueillir tous les modèles d'avion. Le hangar a une capacité de démantèlement d'un A380 ou de quatre A320 (Constant, 2007). Le site contient six aires de stockage d'avions, chacune pouvant

accueillir deux A340 (Challier, 2008). En considérant la possibilité de stationner des aéronefs sur les bretelles, la capacité totale de stockage du site est d'une vingtaine d'appareils. Il faut cependant préciser que tous les modèles d'aéronefs peuvent y être stationnés et que, par conséquent, cette capacité varie grandement tant à la hausse qu'à la baisse en fonction de la taille des aéronefs présents. Une aire de dépollution étanche dédiée (2000 m²), une aire de démantèlement étanche (5000 m²), une aire de tri (4000 m²), une aire de stockage de matières sensibles (500 m²) et un système de traitement des écoulements par séparateur hydrocarbure sont aussi présents sur le site. Des bassins sont également utilisés afin de recueillir les polluants (Challier, 2008).

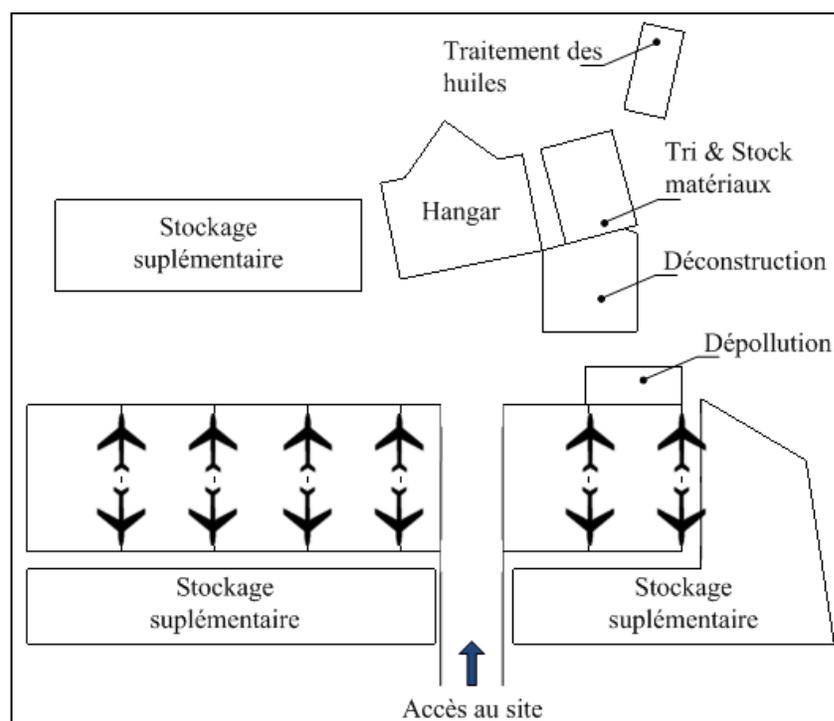


Figure 2.2 : Site de démantèlement – Tarmac

Le processus de démantèlement se fait en trois étapes principales: le stockage de l'avion, le désassemblage des équipements et des pièces qui requiert en moyenne 6 semaines et le démantèlement intelligent de l'avion qui requiert entre 3 et 4 semaines de travail. La réglementation sur la protection de l'environnement et la santé et sécurité des

travailleurs s'applique à chaque phase de ce processus, tandis que la réglementation AESA Part 145 n'est obligatoire que pour les deux premières étapes. Les équipements utilisés durant ces étapes sont exactement les mêmes que ceux employés pour les opérations de maintenance traditionnelles. Pour la déconstruction, une scie à câble diamantée⁴ est employée pour couper la carcasse en morceaux (Poirot, 2009; Bousquet, 2009). Les morceaux obtenus subissent un tri sélectif selon leur composition. Ils sont alors stockés dans des containers destinés à des filières de traitement de déchets identifiées (EADS, 2006).

La séparation des matériaux est facilitée par des opérations de diagnostic matières et de cartographie des matériaux qui permettent d'identifier, de localiser et de quantifier les matières telles que l'aluminium, l'acier, le titane, les composites, etc. (Kingsley-Jones, 2008). Ces opérations d'ingénierie inverse sont effectuées par un ingénieur d'expérience au début de la deuxième étape du processus de démantèlement aéronautique à l'aide du manuel du manufacturier de l'appareil et d'un spectromètre (Airbus, 2009). La durée requise pour la cartographie est environ une semaine. L'avion est initialement désigné par quatre sections principales : la structure, la cabine et la cale, les systèmes et le groupe motopropulseur (Kingsley-Jones, 2008). Ces catégories sont analysées séparément afin d'identifier les zones homogènes. Selon Philippe Fournadet, la structure d'un avion peut contenir plus de cinq types d'alliages d'aluminium différents (Challier, 2008). Le responsable a également la responsabilité d'établir la liste des pièces et des équipements devant être récupérés sur l'appareil. C'est à partir de cette cartographie que la déconstruction est exécutée. Lors des deux dernières étapes, les pièces et les équipements à destination des filières de valorisation sont d'abord altérés pour empêcher leur réutilisation dans l'aviation, puis ils intègrent les différents lots de matériaux. La spectrométrie permet finalement d'effectuer un tri plus précis à l'intérieur des lots métalliques formés (Airbus, 2009). Cette technologie est d'ailleurs utilisée pour séparer

⁴ Il s'agit d'un câble mis en mouvement autour de deux poulies par un moteur (Poirot, 2009). C'est la technologie de découpe la plus respectueuse de l'environnement selon les résultats du projet Pamela. Cette méthode a été préférée au chalumeau et au jet d'eau (Challier, 2008).

les alliages d'aluminium de la série 2xxx de ceux de la série 7xxx. Les déchets subissent également un tri sélectif. Ils sont d'abord entreposés selon la nature du risque qu'ils représentent, puis ils sont dirigés vers les filières de traitement spécialisées ou les sites d'enfouissement (Airbus, 2009). La figure 2.3 de la page 53 détaille davantage chacune des étapes du processus de démantèlement aéronautique utilisé par Tarmac. Ce processus requiert environ deux mois et demi pour un A310 (Poirot, 2009). Fait important à noter, un avion qui n'a pas entamé l'étape de déconstruction peut être remis en état de fonctionnement en tout temps (Kingsley-Jones, 2008).

2.3.3. Modèle d'affaires du site

Les propriétaires d'avions peuvent acheter le service de démantèlement d'avion incluant le désassemblage des équipements et des pièces réavionnables et faire appel au service de vente des pièces détachées offert par Tarmac Aerosave ou non. Dans tous les cas, la carcasse de l'avion est vendue à Tarmac Aerosave qui s'occupe de la mettre en morceaux et de la vendre à des commerçants ou à des entreprises de transformation. Selon Tarmac Aerosave, « les éléments constitutifs de l'aéronef [peuvent être] revalorisés jusqu'à 90 % de la masse d'un avion » (Tarmac Aerosave, 2009). Les éléments restants sont essentiellement des déchets industriels et des équipements classifiés dangereux (JWF, 2009) tels que les revêtements de la cabine, les revêtements de la cale à marchandise et les matériaux d'isolation (Dubois, 2008). D'un autre côté, le propriétaire peut aussi acheter uniquement le service de stockage d'avions ou de maintenance. Étant donné que la demande en démantèlement d'avion en fin de vie n'est pas très élevée pour l'instant, ces services représentent des activités importantes pour assurer la santé économique de Tarmac Aerosave. La figure 2.3 de la page suivante illustre le modèle d'affaires de cette compagnie qui prévoit démanteler 30 à 50 avions par année dès 2010.

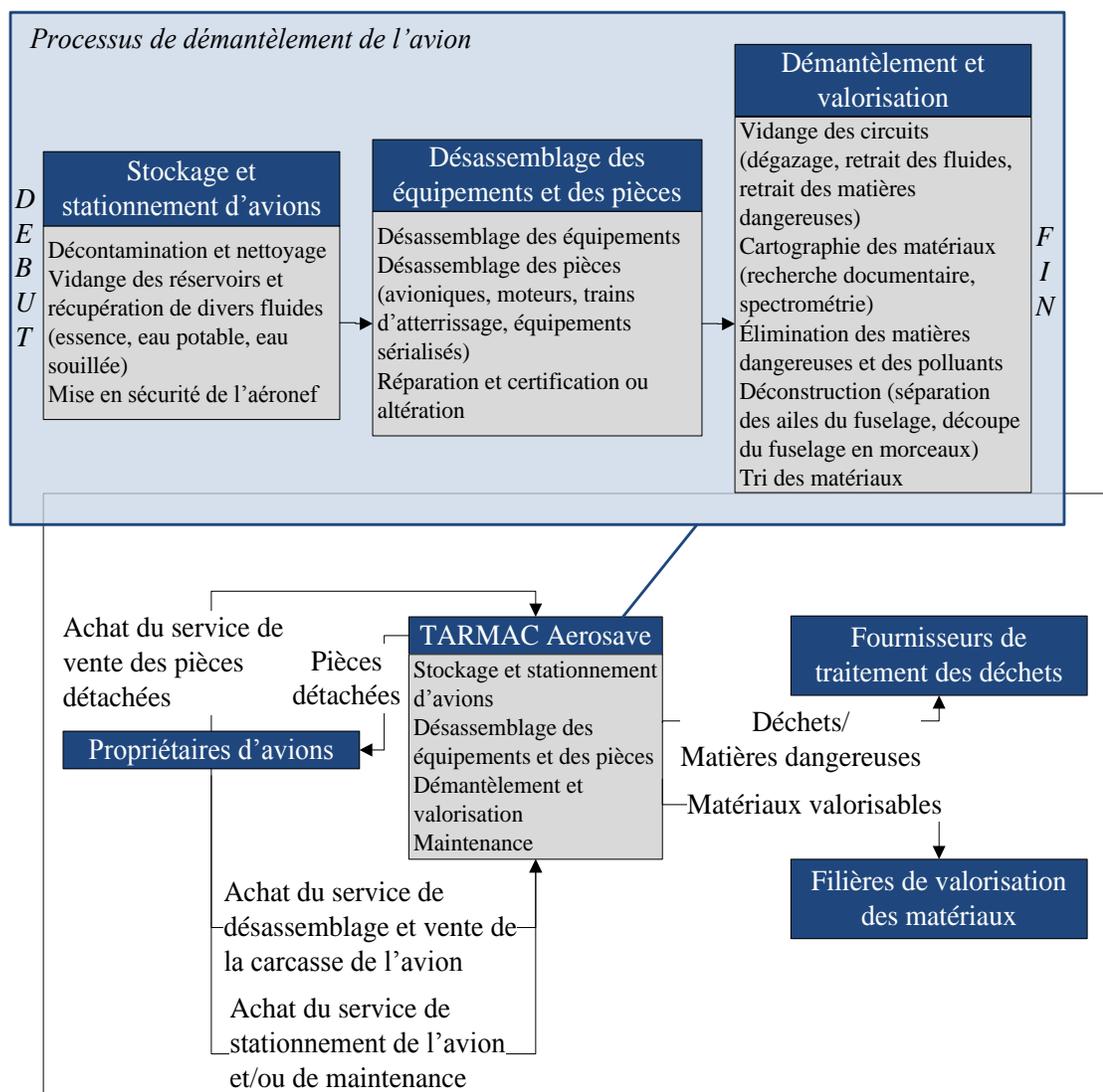


Figure 2.3 : Modèle d'affaires – Tarmac

2.4. La compagnie Bartin Aero Recycling

2.4.1. Historique de la compagnie Bartin Aero Recycling

Bartin Recycling Group est une compagnie spécialisée dans le recyclage industriel (collecte et valorisation des déchets). Elle est aussi une filiale de l'entreprise Veolia Propreté et membre de l'AFRA. En 2005, Bartin Recycling Group a mis sur pied une filiale nommée Bartin Aero Recycling, après avoir constaté une demande croissante

dans le domaine du recyclage des avions en fin de vie. Cette première plate-forme européenne de démantèlement aéronautique a été créée en partenariat avec Euro Aviation, une société de maintenance aéronautique accréditée par l'AFRA depuis le 27 juillet 2008, afin de faire face à l'arrivée en fin de vie des avions qui ont été mis en service dans les années 70 et 80. Bartin Recycling Group détient une certification ISO9001 et ISO14001, qui sont respectivement des normes de qualité et environnementale. La plate-forme de démantèlement est située à l'aéroport de Châteauroux-Déols (Châteauroux Air Center) où elle a été conçue pour être conforme aux ICPE.

2.4.2. Description du site de démantèlement aéronautique

La plate-forme de Châteauroux a une superficie de 15 000 m² et est de forme rectangulaire (100 m par 150 m), ce qui lui confère une capacité de démantèlement de deux avions en simultané (Fig. 2.4, p.55). Cela correspond à environ deux avions par mois. La plate-forme est constituée d'une dalle de béton posée sur une géo membrane étanche. Un système d'écoulement des fluides, lequel est muni de séparateurs hydrocarbures, permet de procéder à la vidange des appareils qui contiennent généralement près du trois quart de leur plein en kérosène (Itzkowitch, 2008). La piste d'atterrissage de l'aéroport a les dimensions suivantes : 3 500 m par 45 m. Cela permet à tous les modèles d'avion d'accéder au site. Un parking pour avions d'une superficie de 280 000 m² ainsi qu'un hangar aéronautique d'une superficie de 16 000 m² font également partie de l'aéroport de Châteauroux. Près de 50 espaces de stationnement pour avions en attente de traitement sont disponibles sur le site (De Brito, Van der Laan & Irion Brijan, 2007).

Lorsque l'avion est pris en charge, les pièces réavionnables sont d'abord récupérées telles que les moteurs, les trains d'atterrissage, les parties mobiles de voilure, les sièges et les pièces d'avionique. Deuxièmement, une dépollution de l'appareil est effectuée : vidange du kérosène, dégazage, vidange des circuits hydrauliques et des circuits de freinage, démontage des engins pyrotechniques et des batteries, et vidange des réservoirs

sous pression. L'étape suivante est la préparation au recyclage. Durant cette étape, les déchets non métalliques pouvant être retirés facilement sont évacués tels que les planchers. Par la suite, la structure restante est découpée en morceaux transportables et broyables en fonction des équipements de manutention et de broyage prévus dans le processus de démantèlement. À cette étape, certaines pièces massives subissent un tri sélectif basé sur la reconnaissance visuelle et la forme. Ensuite, les éléments sont broyés, puis triés automatiquement par aspiration des débris légers (classification à jet d'air). La sixième étape, soit la flottation, consiste en un tri fin réalisé à l'aide de bassins densimétriques (tri par densité). Finalement, une valorisation des métaux est effectuée et les déchets restants sont enfouis dans un centre appartenant à Bartin Recycling Group. D'après l'expertise de cette compagnie, environ 80 % des métaux obtenus par ce processus sont valorisables. À titre indicatif, le temps requis à trois ouvriers pour démanteler un jumbo jet est estimé à six semaines (Veolia, 2009).

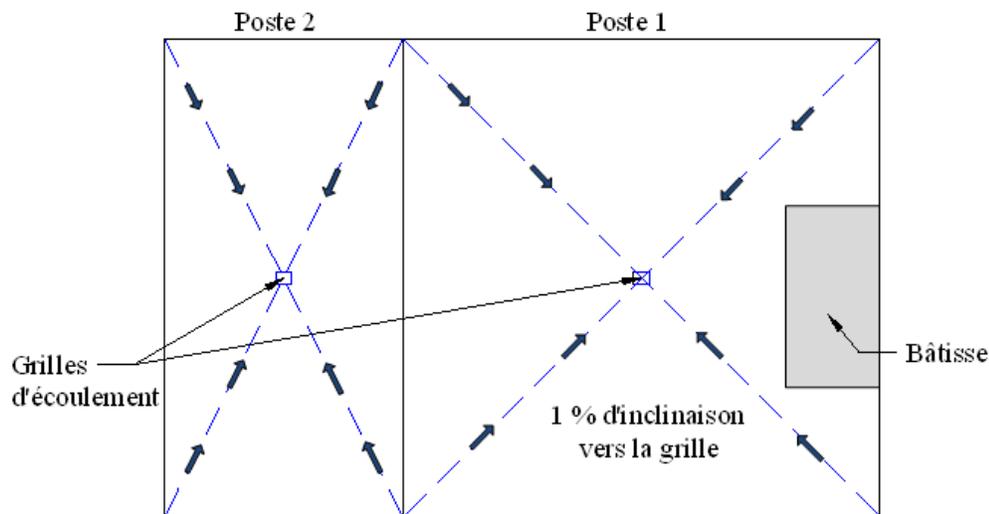


Figure 2.4 : Plate-forme de démantèlement – Bartin Aero Recycling

2.4.3. Modèle d'affaires du site

Les clients de Bartin Aero Recycling sont des propriétaires d'avions qui souhaitent se départir de leurs appareils. Lorsque ceux-ci font affaire directement avec la compagnie de démantèlement, ils lui cèdent leur droit de propriété ainsi que l'avion en échange

d'une certaine somme d'argent. D'un autre côté, les propriétaires d'avions peuvent également vendre leurs appareils à des courtiers en pièces détachées. Ces courtiers achètent alors les services de démontage de pièces et de recyclage de la carcasse de l'avion à Bartin Aero Recycling (Fig. 2.5). Cette entreprise de démantèlement offre également des services de démantèlement pour les avions militaires (TransportZoom, 2009).

Euro Aviation et RIC Environnement sont deux actionnaires de la compagnie Bartin Aero Recycling. Ce sont ces deux entreprises qui procèdent au démantèlement de l'avion. Euro Aviation se charge d'abord de la dépollution de l'appareil et du démontage des pièces réutilisables. Cette entreprise est approuvée JAR partie 145, une ancienne version du standard EASA Part 145. Par la suite, RIC Environnement procède à la découpe de l'avion, au broyage des morceaux obtenus, au tri des débris, au recyclage des matériaux et à l'enfouissement des déchets. JMV Aviation achète les pièces détachées obtenues par Euro Aviation et les revend sur le marché.

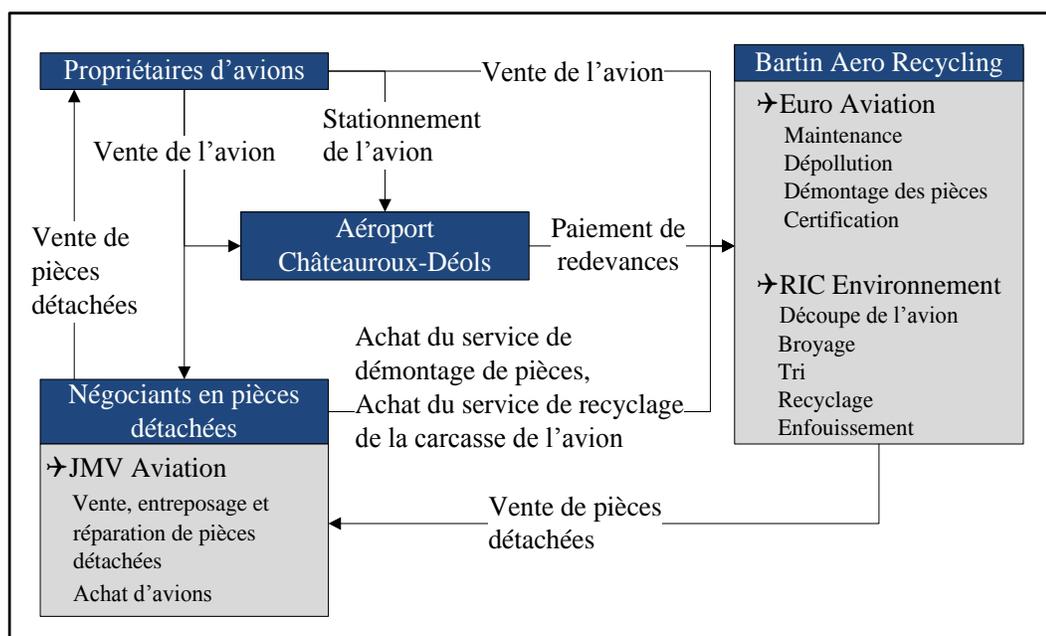


Figure 2.5 : Modèle d'affaires – Bartin Aero Recycling

2.5. La compagnie Evergreen Trade Inc.

2.5.1. Historique de la compagnie Evergreen Trade Inc.

Evergreen Maintenance Center (EMC) est une des plus grandes compagnies œuvrant dans le domaine des services de maintenance, de réparation et d'inspection d'avions. Cette entreprise, située à Marana en Arizona, est une filiale de la compagnie Evergreen International Aviation en plus d'être une Administration Fédérale de l'Aviation (FAA). Sa certification FAR Part-145 repair station lui confère le droit d'opérer légalement son centre de réparation d'avions. Evergreen Trade Inc. est également une filiale de la compagnie Evergreen International Aviation. Elle est située sur le même plan d'exploitation qu'EMC, au Pinal Air Park, depuis 1962. Evergreen a débuté ses opérations de démantèlement d'avions en 2002. Initialement, ce service était offert par EMC, mais il a été transféré à Evergreen Trade Inc. en 2007. Cette compagnie qui a été accréditée par l'AFRA le 12 juillet 2009 offre de multiples services dont la vente, l'achat, la location et le courtage d'avions, d'hélicoptères et de pièces détachées, l'entreposage et la maintenance d'appareils ainsi que le démontage d'avions et d'hélicoptères. Elle a d'ailleurs hérité de la certification FAR Part-145 et possède une certification ISO 9002.

2.5.2. Description du site de démantèlement aéronautique

Pinal Air Park possède trois hangars, une vaste aire de maintenance, une piste d'atterrissage de 2,1 km pouvant accueillir tous les modèles d'avion par voie aérienne et une superficie de stationnement et d'entreposage de 2 km² pouvant accueillir jusqu'à 300 avions, ce qui en fait un des sites d'entreposage d'avions le plus grand au monde (Fig. 2.6, p.58). Par ailleurs, le fait que ce site soit dans une zone désertique lui confère un climat idéal pour le stockage d'avions puisque le taux d'humidité y est très bas : les appareils subissent moins de corrosion. Pinal Air Park a la capacité de démanteler 4 avions en même temps, et ce à longueur d'année. Le temps requis pour démanteler un avion varie grandement en fonction de sa taille. Un petit avion tel qu'un Boeing DC-9

requiert environ 2 semaines, tandis qu'un B747 peut requérir jusqu'à 3 mois de travail. Aussi, plus la liste des pièces et de sous-assemblages devant être récupérés est longue, plus le temps de démantèlement sera long.

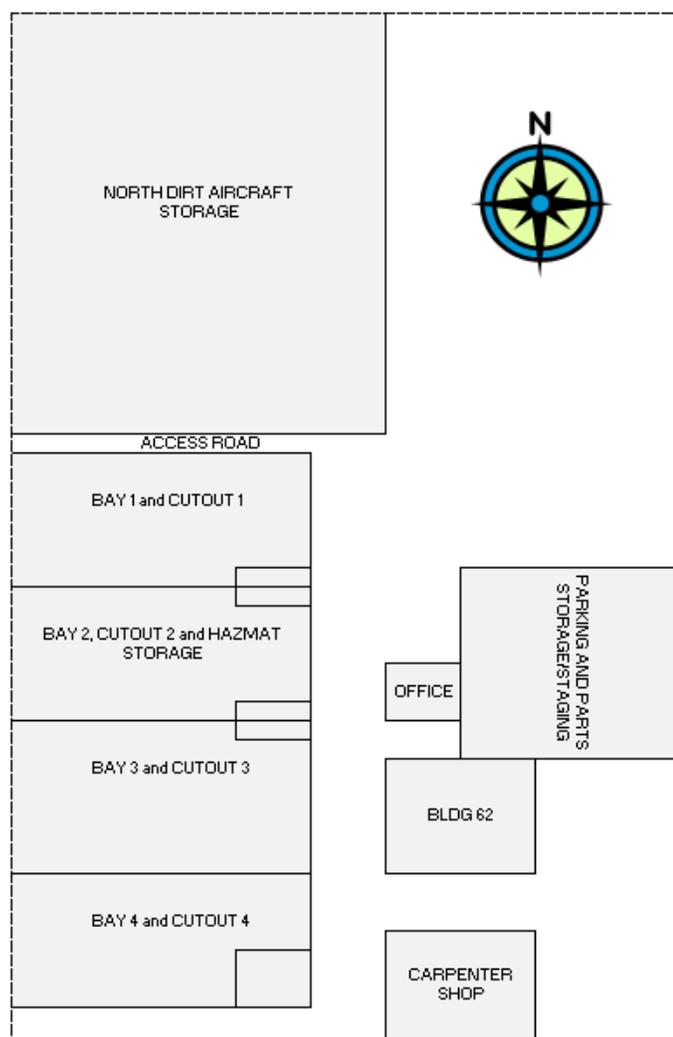


Figure 2.6 : Site de démantèlement – Evergreen Trade Inc. (Source : Evergreen Trade Inc.)

Le processus de démantèlement est initié par des échanges entre le client et Evergreen Trade Inc. Lorsqu'un client montre son intérêt à Evergreen Trade Inc. envers son service de démantèlement d'avions, Evergreen Trade Inc. lui envoie une feuille de désassemblage. Le client remplit la feuille en y inscrivant la liste des pièces à démonter

et envoie le document à Evergreen Trade Inc. L'entreprise évalue la demande et établit un prix pour le service demandé. Cette opération requiert entre 4 et 6 heures. Lorsque le client accepte l'offre, un contrat est signé et un paiement partiel est effectué de la part du client lors d'une rencontre d'une durée de 30 à 45 minutes. Par la suite, l'étape de pré-désassemblage commence. Les matières dangereuses, le carburant et les huiles sont retirés de l'avion ainsi que quelques éléments ciblés à l'aide de deux plateformes élévatoires: bouteilles extincteur, bouteilles de dioxygène, générateur de dioxygène, accumulateurs hydrauliques, batteries et blocs de batteries, ampoules fluorescentes, détecteurs de fumée, uranium appauvri, toilettes et lavabos. Les mécaniciens procèdent aussi à un abaissement des volets qui se trouvent sur la partie interne des ailes de l'avion, à une vidange des réservoirs hydrauliques, à l'élimination des signes de sortie d'urgence et à l'ouverture des portes de la cabine et de la soute à bagages ou de la soute à cargaison. Cette étape requiert entre 32 et 48 heures homme et entre 4 et 6 mécaniciens. Lors de l'étape de désassemblage, entre 10 et 12 mécaniciens sont requis pour un total de 1000 à 2000 heures homme de travail selon le modèle d'avion et la liste des pièces à désassembler. Trois plateformes élévatoires, deux montes personnes et dix échelles sont utilisées par le personnel. Lorsque le désassemblage et la découpe nécessaire au désassemblage sont complétés, le client se rend sur place et constate le désassemblage qui a été effectué en utilisant une plateforme élévatoire en compagnie de 1 ou 2 employés de la compagnie de démantèlement d'avions. Cette étape requiert généralement entre 4 et 6 heures, puis le paiement final est effectué par le client. Enfin, une demande d'offre d'achat pour la carcasse de l'avion est envoyée à un ramasseur de métal ainsi qu'une lettre qui atteste que l'avion a été vidé de toutes ses matières dangereuses.

2.5.3. Modèle d'affaires du site

Evergreen Trade Inc. offre plusieurs services à ses clients (Fig. 2.7, p.60). Dans un premier temps, les propriétaires d'avions peuvent acheter le service de démontage de pièces aéronautiques et vendre le reste de leur avion à Evergreen Trade Inc. Une seconde

option s'offre à eux : ils peuvent vendre leur avion ainsi que toutes les composantes de l'appareil à Evergreen Trade Inc. Dans le premier cas, la compagnie de démantèlement aéronautique dispose les pièces démontées dans des boîtes et envoie ces boîtes à l'entrepôt de son client. Dans le second cas, la compagnie de démantèlement emboîte les pièces réavionnables et les entrepose sur son propre site. Evergreen Aircraft Sales & Leasing Co. se charge ensuite de vendre ou de louer les pièces détachées. Il faut aussi préciser que certains propriétaires d'avions ne font qu'entreposer leur appareil à court ou à moyen termes sur le parking du site sans avoir recours à d'autres services.

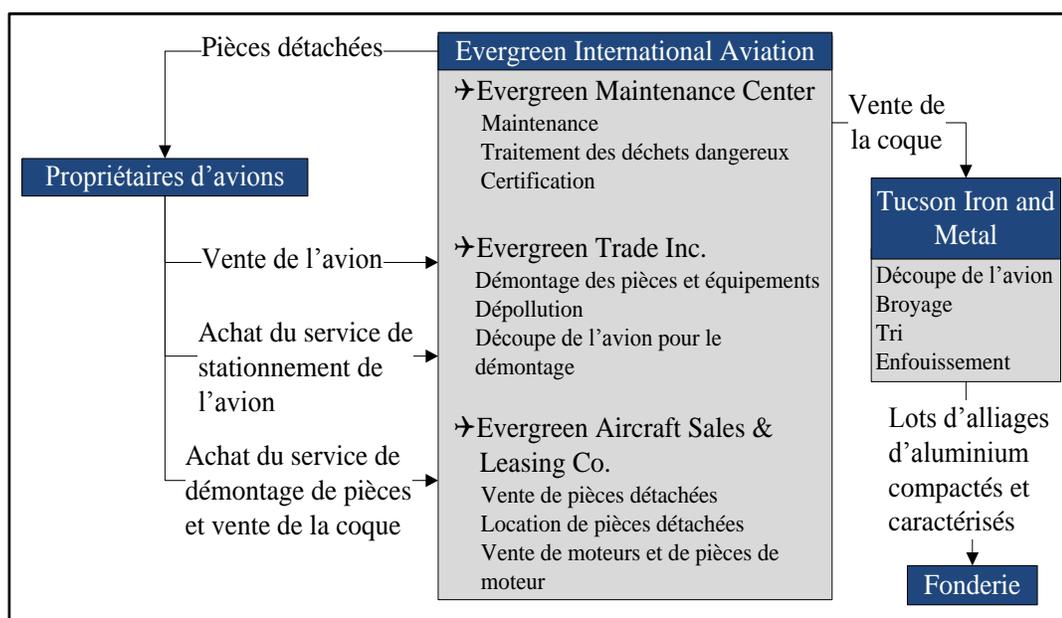


Figure 2.7 : Modèle d'affaires – Evergreen Trade Inc.

Lors de la réception d'un avion devant être démantelé, celui-ci est stationné durant une certaine période de temps. Une fois le processus de démantèlement enclenché, Evergreen Trade Inc. procède d'abord aux étapes de démontage des pièces, de dépollution et de découpe de l'avion. Les déchets en provenance de la dépollution sont stockés et traités par Evergreen Maintenance Center qui possède l'expertise requise pour en disposer adéquatement. Dans tous les cas, la coque de l'avion, c'est-à-dire la carcasse

du corps de l'avion, est vendue à la compagnie Tucson Iron and Metal, en Arizona. Cette compagnie découpe et broie la coque de l'avion sur le site de démantèlement et transporte les débris obtenus par containers et par camions jusqu'aux installations d'un refondeur, la compagnie TIMCO à Fontana, en Californie (Teigtmeir, 2007). TIMCO refond alors les débris métalliques en provenance de l'aéronautique en effectuant des opérations de tri à l'état liquide et en traitant le métal en fusion de façon à obtenir des lingots de différentes compositions chimiques qui seront utilisés dans des domaines où la pureté requise des alliages d'aluminium est moindre que celle du domaine de l'aéronautique tels que dans l'industrie automobile.

2.6. La compagnie Aircraft End-Of-Life Solutions (AELS)

2.6.1. Historique de la compagnie AELS

Aircraft End-of-Life Solutions (AELS) est une compagnie des Pays-Bas qui offre un service de désassemblage et de démantèlement d'aéronefs dans toutes les régions du monde depuis 2006. Elle se spécialise dans le développement de stratégies de fin de vie des avions et dans l'exécution de la stratégie la plus rentable économiquement pour un avion en particulier tout en minimisant l'impact environnemental. AELS possède deux SDA et offre également ses services à « domicile » pour les clients dont l'avion ne peut pas être déplacé (accident, technologie désuète, faillite). Le premier site est situé à l'aéroport Maastricht Aachen (Pays-Bas), tandis que le second est à l'aéroport Gander International (Terre-Neuve, Canada). Par ailleurs, AELS utilise un outil informatique d'aide à la décision qui détermine la valeur estimée du revenu engendré par le désassemblage d'un avion en fin de vie, par la re-certification de ses pièces détachées et par leur vente, ce qui permet d'évaluer la rentabilité du démantèlement par rapport au stockage de l'avion ou sa vente. AELS n'a pas de certifications ISO, ni d'accréditation AFRA. Toutefois, elle répond au standard EASA Part 145 (Pays-Bas) et au standard 571 du RAC (Canada).

2.6.2. Description des sites de démantèlement aéronautique

Les sites sont chacun munis d'un seul espace de démantèlement d'avion pouvant accueillir des appareils ayant une taille maximale correspondant à celle d'un Boeing 737 ou d'un Airbus 320. Le temps requis pour démanteler un avion peut être de 3 à 5 jours pour les petits aéronefs ou de 3 semaines pour les gros avions requérant beaucoup d'opérations manuelles (tri, découpe précise). AELS démantèle environ 12 avions par année aux sites ou hors site, ce qui porte à conclure que leurs installations ne sont pas utilisées à leur pleine capacité de démantèlement.

Durant le processus de démantèlement, l'avion n'est pas à un poste fixe. Les premières étapes, soit la vidange du carburant, le désassemblage des pièces, l'élimination des matières dangereuses et la séparation manuelle de certains éléments recyclables (plastique, cuivre, etc.) se font dans un hangar par des ingénieurs certifiés selon le standard EASA Part 145. Par la suite, l'avion est transféré sur la plate-forme extérieure où 3 à 4 mécaniciens, sans qualification particulière, procèdent à la découpe de l'avion en morceaux (1 m x 1 m) à l'aide d'une pelle hydraulique à cisailles. Un premier tri entre ces morceaux est effectué par les mécaniciens qui les déposent dans différents containers selon leur composition. Ces containers seront ensuite transportés vers un ramasseur de métal, une entreprise de transformation ou un ramasseur de plastique en fonction du matériau. Il est à noter que le sol de la plate-forme et du hangar sont étanches pour empêcher la contamination du sol par des agents polluants.

2.6.3. Modèle d'affaires de la compagnie

AELS offre un service de démantèlement d'avions aux propriétaires d'avions. Toutes les pièces récupérées lors du désassemblage sont la propriété du client, tandis que la carcasse restante est achetée par AELS en vue de faire recycler ses composants par d'autres compagnies. Puisque AELS opère dans le monde entier ainsi que sur deux sites, les compagnies de traitement de déchets et de collecte de matériaux recyclables et valorisables avec lesquels elle fait affaire sont nombreuses. Les deux critères qui

influencent ses choix sont le respect de l'environnement de la part du fournisseur et la proximité par rapport au lieu de démantèlement en vue de diminuer les coûts de transport. La figure 2.8 ci-dessous représente le modèle d'affaires des activités d'AELS. Il est à noter que les propriétaires d'avions peuvent également acheter le service de vente de pièces détachées qu'offre AELS.

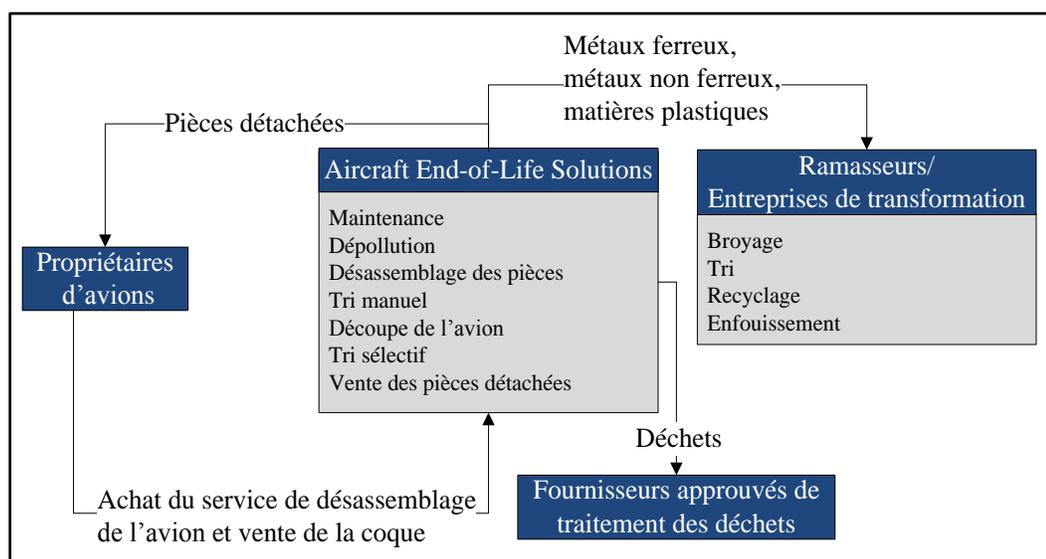


Figure 2.8 : Modèle d'affaires – Aircraft End-Of-Life Solutions

2.7. La compagnie Air Salvage International (ASI)

2.7.1. Historique de la compagnie ASI

Depuis 1994, Air Salvage International offre une variété de services dans le domaine de l'aviation. Cette compagnie possède une certification ISO9001 et ISO14001. Elle est également accréditée AFRA depuis le 27 juillet 2008 et elle fait partie de plusieurs organisations dont l'International Society of Transport Aircraft Trading (ISTAT) et l'Aviation Suppliers Association (ASA). Elle possède aussi les licences requises pour disposer de toutes les catégories de déchets impliquées dans le démantèlement d'avions et une licence lui permettant de traiter les matières radioactives (licence

BW2749/BZ1854). ASI opère trois SDA munis des équipements, du personnel et des installations nécessaires: (1) Lasham Airfield, situé à proximité du village Lasham dans le Hampshire, comté de l'Angleterre (Royaume-Uni), (2) Kemble Airfield, situé dans la ville britannique Cirencester, dans le comté de Gloucestershire, en Angleterre, (3) Alton Facility, situé dans la ville d'Alton dans le Hampshire. Il est à noter que tous ces sites sont conformes au standard EASA Part 145.

2.7.2. Description des sites de démantèlement aéronautique

Lasham Airfield est implanté sur le site de l'aéroport privé Lasham qui possède une piste d'atterrissage de 1,8 km. L'aéroport Lasham et Lasham Airfield se partagent 20 espaces de stationnement pour avions et un seul avion peut être démantelé à la fois. Kemble Airfield est, quant à lui, situé sur le site de l'aéroport privé Kemble. Cet aéroport est caractérisé par une piste d'atterrissage de 2 km, ce qui permet à tous les types d'avions d'y atterrir. Kemble Airfield peut démanteler toutes les catégories d'avions, contrairement à Lasham Airfield qui ne peut démanteler que les avions à allée simple et dont la taille maximale est comparable à celle d'un Boeing 767 dû aux installations. La capacité de démantèlement de Kemble Airfield est de 5 avions à l'extérieur et d'un seul avion dans un hangar. Il y a également 30 espaces de stationnement pour avions. Le troisième site à Alton est le plus petit des trois sites exploités par ASI. Il ne possède pas de piste d'atterrissage. Les avions doivent donc y être acheminés par la route et les modèles qui y sont démantelés sont uniquement de petits avions. Le plus gros avion pouvant y être démantelé est un British Aerospace BAe 146. Alton Facility peut démanteler 2 ou 3 avions en même temps et stocker 8 avions sur son terrain. En tout, entre 25 et 30 avions sont démantelés annuellement par ASI.

Le démantèlement d'un avion requiert entre 4 et 12 semaines selon le modèle d'avion et sa taille. Le processus de démantèlement utilisé par ASI inclut le démontage des pièces réavionnables, la dépollution, la découpe de la carcasse, l'élimination des déchets et des matériaux (3 jours) et le nettoyage de l'espace de démantèlement (2 jours). Tous les sites sont munis d'un dispositif leur permettant de drainer les fluides et les matières

résiduelles des appareils. Cependant, Kemble Airfield est le seul site à posséder des séparateurs hydrocarbures sur place. Les outils utilisés durant le processus de démantèlement sont standards à l'industrie de l'aviation. Des supports pour avion au sol et des nacelles télescopiques sont utilisés pour les ailes et l'empennage. La découpe de la coque de l'avion se fait à l'aide d'une pelle hydraulique à cisailles et à grappin pour préparer les matériaux au broyage.

2.7.3. Modèle d'affaires de la compagnie

Durant tout le processus de démantèlement, les propriétaires d'avion demeurent propriétaires de leur appareil et achètent le service offert par ASI. La compagnie de démantèlement offre également des services de maintenance et de stationnement. Une fois le démantèlement de l'avion effectué, ASI vend les débris métalliques à un marchand de métaux ferreux et non ferreux, soit Robert Gibbs (Contracting) Company Ltd. Celle-ci collecte les débris par camion au site de démantèlement. Les déchets restants sont traités par un fournisseur de traitement de déchets approuvé. La figure 2.9 ci-dessous montre le modèle d'affaires propre à ASI.

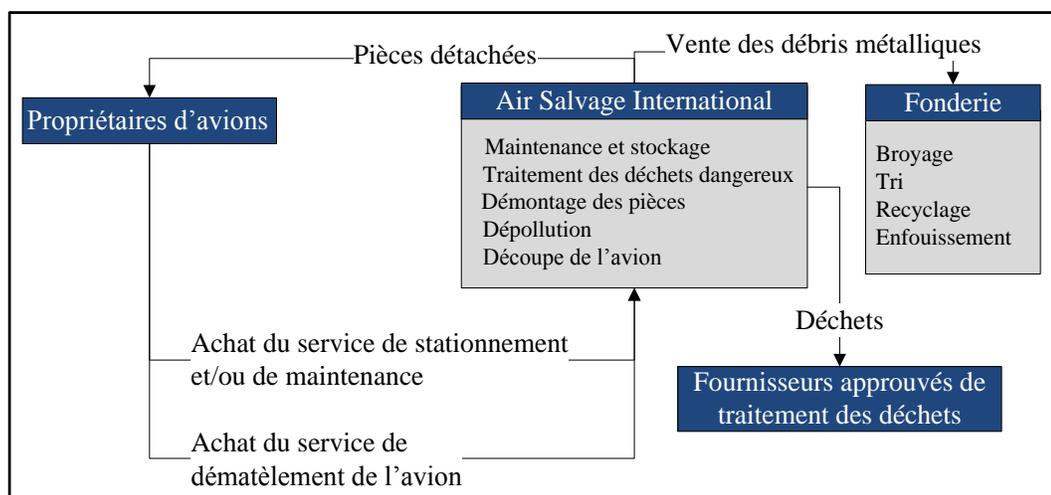


Figure 2.9 : Modèle d'affaires – Air Salvage International

2.8. Comparaison du profil des entreprises impliquées dans le démantèlement aéronautique

L'ensemble des informations recensées dans le présent chapitre permettent de comparer les diverses approches de démantèlement aéronautique préconisées par les plus grands manufacturiers d'aéronefs au monde et par les SDA. Depuis quelques années, les deux chefs de file mondiaux en fabrication d'aéronefs, Airbus et Boeing, ont pris conscience de leur responsabilité envers chacune des étapes du cycle de vie de leurs produits à partir de leur conception jusqu'à leur fin de vie inclusivement. Pour contrer les impacts environnementaux négatifs et la perte de matériaux valorisables occasionnés par la mise en décharge des composantes de leurs avions, ces deux multinationales ont mis sur pied deux projets distincts.

Boeing a préféré une approche selon laquelle la compagnie n'est pas directement impliquée dans le démantèlement aéronautique. Son projet a été de fonder l'organisation AFRA en collaboration avec d'autres institutions. L'AFRA regroupe des professionnels du domaine de la récupération et de la vente de pièces détachées, du désassemblage et du démantèlement aéronautique ainsi que du secteur manufacturier. Un guide des bonnes pratiques en matière de désassemblage de pièces et d'équipements aéronautiques a été élaboré et rendu accessible à chacun d'entre nous via le site web de l'ONG. Les bonnes pratiques en matière de déconstruction de la carcasse d'un aéronef et du tri des débris n'ont cependant pas été précisées à ce jour. Au niveau environnemental, le guide ne fait que rappeler qu'il faut respecter les lois environnementales applicables dans la juridiction du SDA. Ces bonnes pratiques ont été traduites en standards à partir desquels un programme d'accréditation AFRA a été créé. Celui-ci est offert exclusivement aux membres de l'organisation. Boeing s'assure ainsi de disposer d'un réseau de partenaires industriels détenant les qualifications souhaitées dans le domaine du démantèlement aéronautique. Il semble que l'intérêt principal de l'AFRA, et par conséquent de Boeing, soit d'établir un marché contrôlé de revente des pièces détachées et des équipements,

lequel représente un revenu supérieur à celui engendré par la valorisation des matériaux de la coque de l'avion.

La compagnie Airbus a plutôt opté pour le projet Pamela dans lequel elle est directement impliquée au niveau du processus de démantèlement avec quelques partenaires industriels. Ce projet a mené à l'élaboration d'un site de démantèlement sur lequel un processus flexible de démantèlement aéronautique est mis en application. Une attention particulière est portée à la traçabilité des pièces et des équipements aéronautiques, aux outils de découpe de la structure de l'avion lors de la déconstruction et au choix des filières de traitement des déchets. Une optimisation de la quantité de matériaux récupérables et valorisables est réalisée tout en minimisant les rejets dans l'environnement par l'entremise d'une cartographie des matériaux, d'un tri sélectif et d'un tri par spectroscopie. Aucun programme de certification n'a encore été développé, mais cela fait partie des projets d'Airbus et de Tarmac Aerosave.

Les approches adoptées par Airbus et Boeing ont été envisagées pour traiter les avions commerciaux. Cependant, Airbus entend agrandir son marché en adaptant ses pratiques au démantèlement d'avions militaires et d'hélicoptères. Bartin Aero Recycling, membre certifié de l'AFRA, a déjà démantelé des avions militaires, tandis qu'Evergreen Trade Inc., également membre accrédité de l'AFRA, offre ses services aux propriétaires d'hélicoptères. Bref, dans la majorité des cas, les sites de démantèlement répondent actuellement à la demande des propriétaires d'avions commerciaux, mais ils auront éventuellement à répondre à celle des propriétaires d'appareils aériens de toutes sortes. Il faut aussi insister sur le fait que les efforts déployés par les manufacturiers en matière de gestion intégrée de la fin de vie des avions ont également un impact au niveau de la conception de leurs appareils, car l'élimination à la source des éléments polluants identifiés demeure le meilleur moyen de minimiser la quantité de déchets produite.

Les modèles d'affaires des SDA présentés précédemment sont uniques. Leurs principales caractéristiques sont résumées dans le tableau 2.3 des pages suivantes.

Tableau 2.3 : Comparaison du profil global des sites de démantèlement aéronautique

Compagnies	Certifications/ Accréditations	Services offerts	Propriété de l'avion durant le processus		Tri des matériaux	Capacité annuelle de démantèlement (avions)	Capacité de stockage (avions)
			Client	SDA			
Tarmac Aerosave	- AESA Part 145 - ICPE	- Stockage - Stockage et maintenance - Stockage, désassemblage et déconstruction - Vente des pièces d'occasion	Stockage et désassemblage	Déconstruction	- Sélectif visuel - Spectroscopie	50	20
Bartin Aero Recycling	- ISO9001 - ISO14001 - AFRA - ICPE - JAR partie 145	Stockage, désassemblage et déconstruction	N/A	Stockage, désassemblage et déconstruction	- Sélectif visuel -Classification jet d'air - Par densité	24* (2 par mois)	50
Evergreen Trade Inc.	- ISO9002 - AFRA - FAR Part 145	- Stockage - Stockage, désassemblage et déconstruction - Vente des pièces d'occasion	Stockage et désassemblage	Déconstruction	N/A	32* (7 semaines par avion, 4 avions simultanément, 52 semaines)	300
			N/A	OU Stockage, désassemblage et déconstruction			

Tableau 2.3 : Comparaison du profil global des sites de démantèlement aéronautique (suite et fin)

Compagnies	Certifications/ Accréditations	Services offerts	Propriété de l'avion durant le processus		Tri des matériaux	Capacité annuelle de démantèlement (avions)	Capacité de stockage (avions)
			Client	SDA			
AELS	-EASA Part 145 - 571 du RAC	Stockage, désassemblage et déconstruction	N/A	Stockage, désassemblage et déconstruction	Sélectif visuel	12	N/A
ASI	- ISO9001 - ISO14001 - AFRA - EASA Part 145	- Stockage et maintenance - Stockage, désassemblage et déconstruction	Stockage, désassemblage et déconstruction	N/A	N/A	30	58
Total :						148	428

** Estimations faites à partir du temps moyen de démantèlement par avion et de la capacité de démantèlement en simultané du SDA. Cependant, il faut préciser que le temps de démantèlement varie en fonction de plusieurs facteurs : taille de l'avion, nombre d'ouvriers, capacité des équipements, établissement d'une cartographie ou non, triage des matériaux ou non, méthodes de triage utilisées et quantité de pièces et d'équipements récupérée.*

Nous constatons que même les membres accrédités par l'AFRA ont des caractéristiques différentes. En combinant la capacité annuelle de démantèlement et de stockage d'avions de ces cinq entreprises, nous obtenons une capacité de démantèlement totale de 148 aéronefs et une capacité totale de stockage de 428 avions. Certes, ces cinq SDA ne représentent pas la totalité des SDA existants, mais ce sont les plus grands, les plus connus et/ou les plus certifiés. Ce faisant, il est justifié de croire que l'objectif de démanteler près de 300 avions commerciaux annuellement à l'aide d'une approche intégrée respectueuse de l'environnement ne pourra être atteint que lorsque de nouveaux SDA auront vu le jour, d'autant plus qu'il faut prévoir la demande en provenance du secteur militaire et des hélicoptères. Finalement, nous avons vu que les méthodes de tri des matériaux ne sont pas très élaborées et que seules Tarmac Aerosave et Bartin Aero Recycling utilisent des technologies de tri permettant d'obtenir des lots d'alliages d'aluminium plus homogènes.

2.9. Conclusion

Pour encourager financièrement l'utilisation de technologies de tri permettant d'obtenir des lots d'alliages d'aluminium homogènes, il est souhaitable d'améliorer l'efficacité des méthodes employées. Il est aussi possible de compenser les coûts engendrés par les activités de tri des matériaux en améliorant la séquence des opérations de démantèlement. À ce sujet, l'optimisation de la stratégie de démantèlement d'un avion basée sur la maximisation des revenus engendrés par la valorisation des matériaux est une option intéressante. Le prochain chapitre exploite cette idée.

CHAPITRE 3 : OPTIMISATION DE LA STRATÉGIE DE DÉMANTÈLEMENT D'AVIONS POUR LA VALORISATION DE L'ALUMINIUM

La connaissance de l'emplacement des pièces, des équipements et des matériaux sur un avion en fin de vie est primordiale à l'optimisation de sa valorisation et, par conséquent, à la réduction de la quantité de déchets qu'il occasionne. Parmi les SDA ayant fait l'objet d'une étude plus approfondie dans le chapitre précédent, Tarmac Aerosave est le site qui obtient le plus haut taux de valorisation. Le processus de démantèlement de cette compagnie implique d'abord la réalisation d'une cartographie des matériaux à partir de laquelle un ingénieur d'expérience détermine la séquence des opérations de désassemblage et de démantèlement. Les manuels du fabricant de l'avion permettent d'établir une partie de la cartographie et d'identifier la séquence des opérations de désassemblage des pièces et des équipements récupérables. La chronologie des opérations de déconstruction de la carcasse de l'appareil est plutôt entièrement définie par l'ingénieur en service selon la cartographie des matériaux qu'il aura préalablement complétée en utilisant la spectrométrie et en se basant sur ses connaissances. Ce faisant, la compagnie de démantèlement est dépendante du savoir tacite de l'ingénieur pour la planification de la découpe de la carcasse de l'aéronef. Cette observation s'applique également à tous les SDA présentés dans ce mémoire.

Pour minimiser cette dépendance et diminuer le temps requis à l'élaboration de la séquence d'opérations de démantèlement, nous présentons dans ce dernier chapitre un modèle mathématique linéaire permettant de déterminer la séquence des opérations de déconstruction de la carcasse d'un avion une fois que la cartographie des matériaux est connue. La détermination de la séquence des opérations de désassemblage étant en grande partie dictée par les manuels des fabricants, son intégration dans le modèle développé a été jugée inutile. Dans le chapitre I, nous avons vu qu'un avion est constitué de 65 à 75 % massiques de métaux dont 85 % d'aluminium, 10 % d'acier, 3 % de titane et 2 % de cuivre. En considérant que le poids approximatif de la carcasse d'un A300-B4-

200 est de 66 tonnes⁵ ainsi que les informations contenues dans le tableau 3.1, nous constatons que l'aluminium représente près de 68 % des revenus bruts de la valorisation des métaux issus de la carcasse d'un avion désuet. Il est donc justifié de vouloir optimiser la séquence des opérations de démantèlement d'un avion en fonction de la récupération des alliages d'aluminium. Par ailleurs, malgré le fait que les prix utilisés ne soit pas récents (2007), nous considérons que les pourcentages d'écart entre la valeur marchande des matériaux varient peu dans le temps et que nous pouvons nous fier aux parts des revenus obtenues.

Tableau 3.1 : Parts des revenus bruts de la valorisation de la coque d'un avion par types de matériaux

Matériaux	Prix (US\$/t)*	Proportions massiques de la carcasse (%)	Revenus bruts (US\$)	Parts des revenus (%)
Aluminium	1 830	85	102 663	68
Acier	3 642	10	24 037	16
Titane	8 488	3	16 806	11
Cuivre	5 735	2	7 570	5
Total :			151 076	100

* Prix tirés de *www.metalprice.com*, 2007

Dans ce troisième et dernier chapitre, un bref retour sur le recyclage de l'aluminium en provenance de l'aéronautique est d'abord réalisé. Puis, une revue des méthodes de planification des opérations de désassemblage et de démantèlement proposées dans la littérature est présentée. Un modèle mathématique est ensuite développé de façon à optimiser la valorisation de l'aluminium des avions en fin de vie. Finalement, le modèle proposé est utilisé dans une étude de cas ayant pour objet l'empennage d'un avion et une analyse du comportement du programme mathématique est effectuée.

3.1. Recyclage de l'aluminium en provenance de l'aéronautique

Nous savons que les alliages d'aluminium présents dans la carcasse d'un avion sont majoritairement des alliages de corroyage de la série 2xxx et 7xxx. Selon le manuel de référence intitulé « Aerospace Structural Metals Handbook », plusieurs types d'alliages

⁵ Annexe I, p.120

d'aluminium de corroyage sont utilisés dans la structure d'un avion et dans ses composantes. La liste de ces alliages, leurs limites de composition chimique en pourcentage massique, leur masse volumique, le pourcentage massique maximal toléré pour un élément étranger (colonne « Autres ch. ») ainsi que le pourcentage massique maximal toléré pour tous les éléments étrangers (colonne « Autres total ») sont présentés à l'annexe J de la page 122. Le tableau 3.2 ci-dessous contient les prix par kilogramme de certains alliages aéronautiques (gras et fond gris) et ceux de quelques alliages plus communs.

Tableau 3.2 : Comparaison des prix des alliages d'aluminium corroyés de première fusion (2009)

Format	Alliage	Volume (m ³)	Prix (US\$)*	Prix (US\$/kg)**
Barre, feuille, cubes, bandes	1145	9,8 x 10 ⁻⁵	36,24	136,51
Barre, feuille, cubes, bandes	2024	0,01	654,73	24,95
Barre, feuille, cubes, bandes	3003	0,028	77,91	1,01
Profilé	4032	0,023	439,82	7,08
Barre, feuille, cubes, bandes	5052	0,001	148,05	46,82
Barre, feuille, cubes, bandes	5083	0,007	316,67	16,82
Barre, feuille, cubes, bandes	6013	0,005	326,66	25,54
Barre, feuille, cubes, bandes	6061	0,01	361,93	14,20
Barre, feuille, cubes, bandes	6063	0,002	43,74	10,30
Barre, feuille, cubes, bandes	7050	0,002	187,52	37,44
Barre, feuille, cubes, bandes	7075	0,002	148,77	35,12

* Prix tirés de McMaster-Carr, 2009 (www.mcmaster.com)

** Masses volumiques tirées de The Aluminum Association, 2004

D'après ces informations, nous constatons que le prix au kilogramme des alliages des séries 2xxx et 7xxx est supérieur à celui des séries 3xxx et 4xxx. De plus, pour la série 5xxx, l'alliage utilisé en aéronautique a une valeur près de trois fois supérieure à celle de l'alliage 5083. La valeur marchande des alliages aéronautiques de la série 6xxx est aussi plus élevée que celle de l'alliage 6063. Il faut également préciser qu'il est tout à fait normal que le prix de l'alliage de la série 1xxx soit supérieur à celui des autres séries puisque les alliages de cette famille sont très purs en aluminium. Les alliages d'aluminium utilisés dans la fabrication d'avion sont donc dispendieux comparativement aux autres alliages d'aluminium corroyés. Par conséquent, nous pouvons supposer que la

valeur marchande des alliages d'aluminium de l'industrie de l'aviation de première fusion encourage les manufacturiers du domaine de l'aéronautique à récupérer ces matériaux à partir de leurs produits en fin de vie. De plus, le fait que le recyclage de cet aluminium requiert l'équivalent de 5 % de l'énergie nécessaire à la production primaire d'aluminium est très intéressant au point de vue économique et environnemental.

Il est cependant important de s'assurer que les coûts de récupération des matériaux, de tri et de fabrication d'alliages de deuxième fusion ne soient pas supérieurs au prix d'achat des alliages de première fusion. Le projet Pamela dans lequel s'est impliqué Airbus avait comme objectif d'évaluer cet aspect. Comme il a été cité au chapitre 2, ce projet pilote a démontré qu'il était économiquement rentable de recycler les alliages d'aluminium en provenance d'aéronefs hors d'usage dans la constitution des pièces et des équipements d'un avion. Pour arriver à cette conclusion, Alcan Global ATI a participé activement à des expériences de refonte et à des activités de recherche et développement dans la sphère des technologies de recyclage. Aux termes de ces efforts, Alcan a démontré que près de 90 % des alliages d'aluminium issus de la composition d'un avion peuvent être réutilisés dans l'aviation (AEAT, 2009).

Deux exemples de recyclage d'alliages d'aluminium en provenance d'un A380 ont été présentés lors de l'édition 2008 du spectacle aérien de Farnborough au Royaume-Uni (Airbus, 2008). Le premier exemple consistait en des granules d'aluminium en provenance de panneaux structuraux du A380 obtenus suite à un broyage et un tri par densité, tandis que le second exemple était un lingot d'aluminium de haute pureté obtenu par la refonte d'un panneau structural de l'aéronef et pouvant être réutilisé dans la fabrication d'un nouvel avion. En plus de ces éléments, Airbus a également présenté les résultats du recyclage d'autres catégories de matériaux telles que le caoutchouc, le cuivre et les fibres de carbone. Par ailleurs, le projet Pamela a montré que l'obtention de matériaux réutilisables dans l'aéronautique est possible en utilisant des méthodes d'identification et de tri efficaces. Rappelons-nous que dans le cas de Tarmac Aerosave,

les matériaux sont identifiés par spectrométrie, triés, puis entreposés en fonction de leur nature et des risques qu'ils représentent (Pamela-Life, 2009).

Jusqu'à maintenant, rien ne prouve que les alliages d'aluminium recyclés par Airbus et ses partenaires puissent réintégrer l'industrie aéronautique dans la fabrication de pièces critiques sujettes aux fissures. Par contre, il a été démontré que ces alliages peuvent être réintroduits dans des pièces ou des équipements aéronautiques non critiques. Dans la majorité des cas, ces alliages sont simplement réutilisés dans la fabrication d'alliages de moulage pour lesquels les spécifications sont moins restrictives et la tolérance aux impuretés est supérieure. Le schéma 3.1 ci-dessous illustre la pratique actuelle en matière de réutilisation des alliages d'aluminium en provenance de l'aéronautique. Pour l'instant, aucune information ne permet d'affirmer que la production d'aluminium secondaire puisse mener à la fabrication de pièces d'avion critiques.

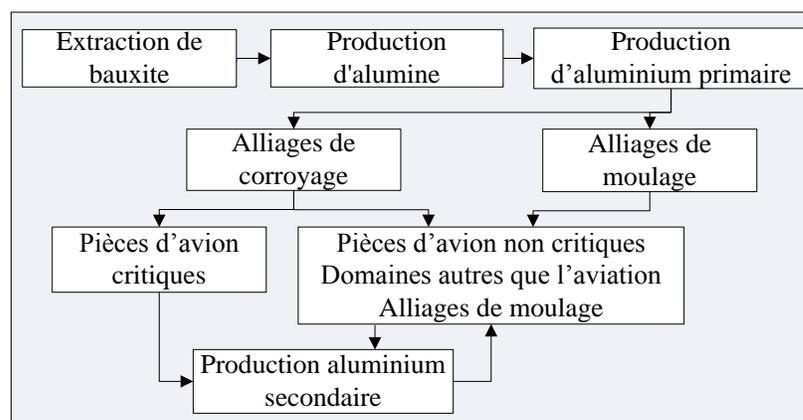


Figure 3.1 : Pratiques actuelles de valorisation de l'aluminium collecté à partir d'avions déseués

3.2. Revue des méthodes de planification des opérations de désassemblage et de démantèlement

De nos jours, la réglementation environnementale, la responsabilité sociale, les revendications des consommateurs, l'image verte des entreprises, l'amplification du souci de préservation de l'environnement (Mutha & Pokharel, 2009), l'augmentation des frais de mise en décharge (Fleischmann, Beullens, Bloemhof-Ruwaard & Van

Wassenhove, 2001), la diminution des coûts de production (Toffel, 2002) et la promotion de la conservation de l'énergie et des ressources naturelles (Tang, Zhou, Zussman & Caudill, 2000) sont tous des facteurs qui influencent les manufacturiers à opter pour un traitement de leurs produits en fin de vie favorable à l'environnement suivant le principe de la REP. Ce contexte explique l'intérêt grandissant accordé au domaine du démantèlement et du désassemblage dans la littérature scientifique. Nous avons constaté que dans certains ouvrages, le mot « démantèlement » est utilisé à tort en tant que synonyme du mot « désassemblage » (section 2.1, p. 45). Dans le résumé qui suit, les corrections nécessaires ont été apportées.

Dans la littérature, trois niveaux distincts ont été identifiés pour caractériser la planification du désassemblage et du démantèlement (Schultmann & Sunke, 2008; Lambert, 2003). Le niveau *stratégique* (à long terme) met l'accent sur la logistique inverse : identification du réseau d'entreprises et localisation des installations. Le niveau *tactique* (à moyen terme) concerne la planification du désassemblage ou du démantèlement selon les quantités de produits à traiter : réalisation du plan directeur et d'études de capacité. Finalement, le niveau *opérationnel* (à court terme) est plutôt associé à l'ordonnancement des opérations de désassemblage et de démantèlement : gestion des opérations et planification des activités. Il faut préciser que la génération des séquences de désassemblage et/ou de démantèlement ainsi que le choix de la séquence optimale doivent être faits avant le niveau opérationnel, soit au niveau tactique.

Les séquences de désassemblage et/ou de démantèlement représentent, sous la forme de réseaux, l'ensemble des opérations subséquentes de désassemblage et/ou de démantèlement admissibles. Les séquences admissibles dépendent du type de produit, des technologies disponibles, de l'objectif du désassemblage ou du démantèlement (Schultmann & Sunke, 2008), de la connaissance des catégories de liaisons entre les pièces et de la connaissance des relations d'antécédence entre les opérations à effectuer. Dans plusieurs cas, un désassemblage incomplet peut s'avérer une option plus rentable

qu'un désassemblage complet. De plus, des contraintes technologiques peuvent également obliger le recours à un désassemblage incomplet (Lambert, 2002).

Non seulement le désassemblage peut être complet ou incomplet, mais il peut aussi être partiel ou sélectif. D'après Wang, Liu, Li & Zhong (2003), le *désassemblage sélectif* met l'emphasis sur un composant en particulier et mène au choix d'une séquence de désassemblage optimisée en fonction de ce composant unique. Au lieu de reposer sur un seul composant, le *désassemblage partiel* permet plutôt d'identifier la meilleure séquence de désassemblage en fonction des limites de faisabilité, c'est-à-dire la meilleure séquence et le meilleur nœud d'arrêt pour un produit donné. Cette approche a notamment été utilisée par Tripathi, Agrawal, Pandey, Shankar & Tiwari dans un article scientifique intitulé « Real world disassembly modeling and sequencing problem: Optimization by Algorithm of Self Guided Ants » publié en 2009. Par ailleurs, ces définitions peuvent également s'appliquer au démantèlement : démantèlement sélectif, démantèlement partiel.

En 2000, Tang, Zhou, Zussman et Caudill ont publié un article scientifique ayant pour titre « Disassembly modeling, planning and application: a review ». Cette publication propose une revue des différentes stratégies de modélisation des séquences de démantèlement ou de désassemblage. Dans l'article intitulé « Disassembly sequencing: a survey » paru en 2003, Lambert propose également une revue de ces stratégies. Takeyama, Kojima, Inoue & Honda (1983) assumaient dans leur publication que la séquence de désassemblage d'un produit était simplement l'inverse de sa séquence d'assemblage. Sachant que certains procédés d'assemblage ne sont pas complètement réversibles, cette approche ne peut s'appliquer à l'ensemble des produits. Bourjault (1984) a introduit la génération de toutes les séquences d'assemblage et de désassemblage d'un produit en utilisant un diagramme de liaisons basé sur une classification des types de liaisons. À partir de ce diagramme de liaisons, un arbre de désassemblage orienté peut être obtenu, lequel contient toutes les séquences de désassemblage admissibles. En considérant les relations d'antécédence entre les

opérations de désassemblage, il est alors possible de générer un diagramme des différents choix de désassemblage. Cette stratégie a d'ailleurs été utilisée par Zhang & Kuo (1997) pour générer graphiquement une séquence de désassemblage pour le traitement de produits destinés au recyclage. Ces chercheurs ont été les premiers à utiliser des matrices d'antécédence dans le domaine du désassemblage. Cependant, dans le cas d'assemblages complexes, l'approche de Bourjault et celle de Zhang & Kuo génèrent des diagrammes de choix immenses et difficilement interprétables. De plus, ces stratégies ne s'appliquent pas lorsque plus d'un composant ou sous-assemblage peuvent être désassemblés simultanément à l'aide d'une technologie permettant de le faire.

Pour contrer cette faiblesse, une stratégie de génération quasi optimale de séquences de désassemblage a été proposée (Gungor & Gupta, 1998). De Fazio & Whitney (1987) ont élaboré un diagramme de désassemblage simple basé sur les états de liaisons entre les pièces et les sous-assemblages, puis un diagramme dans lequel sont reliés les sous-assemblages et les pièces correspondants aux états du diagramme précédent est réalisé. Ce dernier diagramme est appelé "diamond diagram" ou diagramme en forme de diamant. Homen de Mello & Sanderson (1990) ont plutôt introduits l'utilisation du graphe ET/OU, lequel consiste en une représentation compacte de l'ensemble des séquences d'assemblage admissibles. En 1991, ces chercheurs ont adapté cette stratégie à la génération et à la sélection de séquences de désassemblage. Encore une fois, la grande quantité de séquences admissibles peut compliquer l'utilisation de la stratégie proposée par Homen de Mello & Sanderson, particulièrement si les séquences de désassemblage incomplet sont incluses. Pour remédier à ce désavantage, Lambert (2000) a proposé un graphe de désassemblage ET/OU réduit dans sa publication intitulée « Optimum disassembly sequence generation ».

Masclé & Balasou (2001) ont développé une stratégie assistée par ordinateur et orientée sur les composants du produit qui intègre à la fois l'assemblage et le désassemblage. Cette approche prend en considération l'orientation des pièces, leurs propriétés physiques, les types de liaisons entre ces pièces ainsi que les méthodes de fixation

utilisées. D'autres approches orientées produit ont été proposées pour l'analyse automatique de la séparation des sous-assemblages à partir de dessins assistés par ordinateur. Cependant, la taille des problèmes augmente de façon exponentielle avec le nombre de sous-assemblages. L'ajout de contraintes géométriques et technologiques peut aider à minimiser ce comportement.

Lorsque l'ensemble des séquences de désassemblage ou de démantèlement sont identifiées, il s'agit ensuite de choisir la meilleure option. Bourjault, Chappe & Henrioud (1987) ont proposé l'utilisation des réseaux de Pétri. Des modèles de programmation mathématique dont la programmation linéaire en nombres entiers ou mixte, la programmation linéaire dynamique ainsi que l'algorithme du plus court chemin sont des outils qui ont été utilisés dans la littérature pour identifier une séquence optimale de désassemblage complet ou incomplet selon les coûts et les revenus ou d'autres objectifs : temps de démantèlement minimal, ratio de recyclage maximal, impacts environnementaux minimaux, etc. Krikke, Harten & Schuur (1998) ont développé un modèle de programmation linéaire dynamique pour optimiser la récupération des matériaux d'un produit et, par conséquent, sa séquence de désassemblage, en considérant des aspects techniques, commerciaux et écologiques. Willems, Dewulf & Dufloy (2004) ont présentés un modèle de programmation linéaire basé sur les coûts et les revenus associés à un réseau d'opérations de désassemblage. Des méthodes axées sur l'intelligence artificielle ont aussi été développées pour le choix d'une séquence de désassemblage telles que l'algorithme génétique, l'algorithme des colonies de fourmis, les réseaux de neurones et la logique floue. Par contre, les solutions obtenues à l'aide de ces méthodes sont souvent des sous-optimums.

De nombreux articles sur le désassemblage ont donc été publiés, mais aucun article ayant comme sujet le démantèlement tel que nous l'entendons n'a été diffusé à ce jour. Nous verrons dans la section suivante que certains éléments des stratégies élaborées pour le désassemblage sont applicables au démantèlement moyennant quelques modifications.

3.3. Description de l'algorithme de démantèlement

Il est important de bien distinguer le désassemblage du démantèlement. Le désassemblage consiste à séparer les composantes d'un assemblage ou d'un sous-assemblage en fonction de contraintes de désassemblage, tandis que le démantèlement n'est pas limité aux concepts d'assemblage et de sous-assemblage puisque les équipements ou les technologies utilisées ne le sont pas. Le démantèlement peut permettre d'obtenir plusieurs morceaux à partir d'une pièce même si celle-ci est constituée d'une seule composante. L'objectif ici n'est pas de récupérer une pièce ou un équipement, mais plutôt des matériaux. C'est pourquoi, la génération des séquences de démantèlement admissibles ne doit pas être restreinte par l'étude des catégories de liaisons entre les pièces, ni par l'étude des méthodes de fixation. L'algorithme présenté à la figure 3.2 de la page suivante repose sur la génération de séquences de démantèlement plutôt que sur la génération de séquences de désassemblage, ce qui le différencie des modèles mentionnés dans la revue de littérature. De plus, il suppose que la cartographie des matériaux de l'avion a préalablement été réalisée.

L'algorithme débute par la génération d'arbres de démantèlement (Fig. 3.3, p. 83). Chaque arbre représente plusieurs séquences de démantèlement admissibles. En désassemblage, les assemblages, les sous-assemblages et les composantes d'un produit sont connus depuis l'étape de conception. Par contre, en démantèlement, les entités issues du démantèlement d'un produit ne sont pas connues a priori, puisque le processus n'est pas limité aux possibilités de désassemblage du produit en question. Pour cette raison, la génération des séquences de démantèlement ne peut se faire que sur la base des connaissances de la faisabilité des opérations de démantèlement, c'est-à-dire sur la connaissance du produit et des technologies disponibles. Par conséquent, le programme mathématique proposé dans la section qui suit ne sera pas un générateur de séquences, mais plutôt un optimisateur de séquences de *démantèlement partiel*. Chaque arbre de démantèlement proposé doit être développé de façon à atteindre un niveau de décomposition le plus élevé possible en accord avec les limites technologiques et

géométriques connues. Contrairement aux stratégies de désassemblage proposées dans les articles scientifiques, il n'est pas nécessaire de générer toutes les séquences de démantèlement admissibles compte tenu de la complexité du produit. Nous considérons que seules les séquences les plus probables d'entraîner les meilleurs résultats devraient être générées d'après le jugement de l'ingénieur chargé de cette tâche.

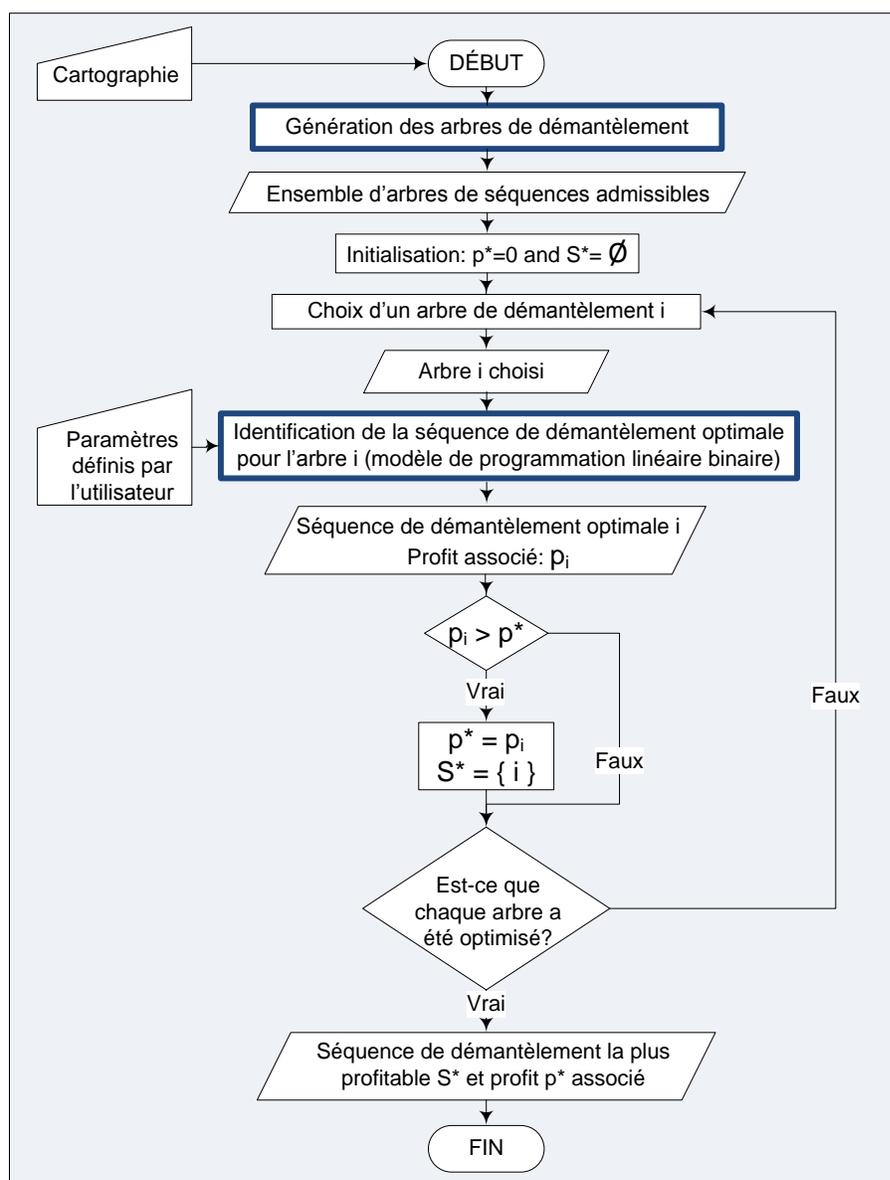


Figure 3.2 : Algorithme du modèle d'optimisation de la valorisation de l'aluminium

Lorsque les arbres de démantèlement sont générés, il s'agit alors de les saisir dans le programme mathématique linéaire et binaire présenté dans la section qui suit. Il faut préciser que le modèle ne gère qu'un arbre à la fois. Pour chaque arbre, il détermine à quel niveau de décomposition la séquence de démantèlement est optimale ainsi que le profit ou la perte associé(e). En suivant les étapes de l'algorithme, la meilleure séquence de démantèlement est obtenue. L'algorithme ainsi que le modèle mathématique permettent donc d'obtenir la meilleure solution de démantèlement partiel parmi celles qui ont été envisagées.

Le principal inconvénient de cette stratégie est qu'il peut s'avérer laborieux d'acquérir la connaissance requise pour élaborer les arbres de démantèlement. D'un autre côté, l'algorithme ne considère que les arbres qui sont le plus susceptibles de fournir une séquence de démantèlement profitable selon l'expertise et la connaissance de l'utilisateur de l'algorithme, ce qui permet de réduire la complexité du problème. De plus, il est facile d'ajuster les arbres de démantèlement en fonction de l'état du produit en fin de vie, lequel peut avoir été altéré durant sa vie utile. L'algorithme en général s'applique tant pour les problèmes de désassemblage que pour ceux de démantèlement. Par contre, le programme linéaire et binaire est valide que pour les carcasses d'avions et les produits sujets au démantèlement tels que les navires et les automobiles. Finalement, l'algorithme peut être utilisé pour un produit entier ou pour une section de produit comme c'est le cas dans l'exemple présenté à la section 3.6. Pour conclure, il faut rappeler que l'utilisation de l'algorithme et du modèle mathématique développés dans ce chapitre s'insère à l'étape de démantèlement d'un produit, soit après l'étape de stockage et de désassemblage. Ce faisant, l'ensemble des pièces et des équipements récupérables ont été retirés à priori.

3.4. Description du modèle d'optimisation mathématique

Le modèle d'optimisation mathématique présenté dans cette section offre la possibilité de recycler les pièces, les équipements et les parties structurales d'un avion pour une réutilisation en aéronautique lorsque le modèle détermine qu'il est rentable que certaines

entités soient broyées et triées. Dans l'éventualité d'une avancée technologique permettant la production de composants critiques à partir du recyclage d'aluminium en provenance de l'aéronautique, le modèle demeure valide.

Lorsqu'un arbre de démantèlement est saisi dans le programme, celui-ci détermine quelles entités doivent être coupées avant d'être broyées ou quelles entités doivent être directement broyées. Le modèle identifie également quelles entités broyées devraient être triées pour améliorer l'homogénéité des matériaux obtenus, c'est-à-dire augmenter la pureté des lots de matériaux formés. Le mot « entité » est utilisé au lieu d'assemblage ou de sous-assemblage pour des raisons évidentes. La figure 3.3 ci-dessous illustre un arbre de démantèlement et précise la notation et l'appellation des éléments utilisées par le modèle.

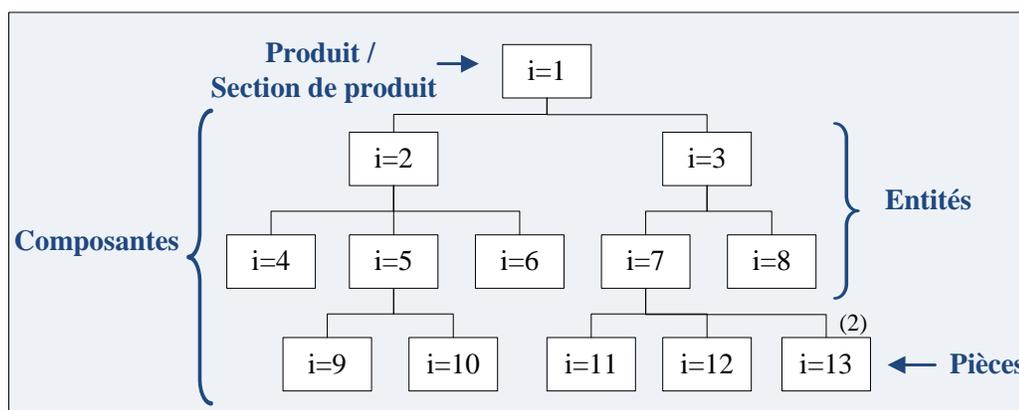


Figure 3.3 : Arbre de démantèlement

3.4.1. Hypothèses

Voici les six hypothèses sous-jacentes au modèle mathématique :

- 1) Le tri des matériaux est effectué par classification à jet d'air, suivi d'un tri magnétique et complété par spectroscopie (LIBS), ce qui permet de trier l'aluminium par catégories d'alliages.
- 2) Les coûts de tri considérés ne sont que les coûts de tri des débris.

- 3) Le temps de découpe est proportionnellement linéaire à la quantité de composantes incluses dans l'entité qui subit la découpe.
- 4) Le temps de broyage d'une entité est proportionnellement linéaire à son volume.
- 5) Le temps de tri des débris de broyage hétérogènes d'une entité est proportionnellement linéaire à son volume.
- 6) Les coûts de découpe (CD), de broyage (CB) et de tri (CT) par unité de temps sont déterminés par l'utilisateur.

3.4.2. Indices et ensembles

Voici les indices et les ensembles du modèle mathématique :

i: éléments de l'arbre de démantèlement
z: entités
y: pièces
a: types d'alliages d'aluminium
SA_i: ensemble des composantes obtenues suite à la découpe de l'entité ou produit « i »

3.4.3. Paramètres

Voici les paramètres du modèle mathématique :

n_i: nombre de composantes ou de produits « i »
V_a: valeur marchande de l'alliage « a » par unité de poids
CD: coût de découpe par unité de temps
CB: coût de broyage par unité de temps
CT: coût de tri par unité de temps

N_i: Nombre d'alliages d'aluminium différents contenu dans la composante ou le produit « i »

VM: Valeur marchande de l'aluminium non trié par unité de poids

H_i: Paramètre défini par l'utilisateur, vaut 1 si la composition en aluminium de l'élément « i » est homogène, 0 sinon

P_{ai}: Poids total de l'alliage « a » contenu dans la composante ou le produit « i »

$$P_{ai} = \begin{cases} \text{valeur définie par l'utilisateur ,} & i \in y, \forall a \\ \sum_{k \in SA_i} n_k P_{ak} , & i \in z, \forall a \end{cases} \quad (1)$$

VT_i: Valeur marchande totale de l'aluminium contenu dans la composante ou le produit « i » si les alliages sont triés entre eux

$$VT_i = \sum_a V_a P_{ai}, \quad \forall i \quad (2)$$

V_i: Volume de la composante ou du produit « i »

$$V_i = \begin{cases} \text{valeur définie par l'utilisateur ,} & i \in y \\ \sum_{k \in SA_i} n_k V_k , & i \in z \end{cases} \quad (3)$$

TD_i: Temps requis pour la découpe de la composante ou du produit « i »

$$TD_i = C1 \sum_{k \in SA_i} n_k , \quad i \in z \quad (4)$$

C1 est une constante propre à la découpe de l'aluminium qui doit être déterminée par l'utilisateur suite à des expériences de découpe. Il faut préciser que la valeur de C1 varie en fonction de l'équipement utilisé et qu'une proportionnalité linéaire est supposée par l'équation (4) d'après l'hypothèse 3.

TB_i: Temps requis pour broyer la composante ou le produit « i »

$$TB_i = C2 V_i , \quad \forall i \quad (5)$$

C2 est une constante propre au broyage de l'aluminium qui doit être déterminée par l'utilisateur suite à des expériences de broyage. Il faut préciser que la valeur de C2 varie en fonction de l'équipement utilisé et qu'une proportionnalité linéaire est supposée par l'équation (5) d'après l'hypothèse 4.

TT_i: Temps requis pour trier les débris de broyage de la composante ou du produit « i »

$$TT_i = C3 V_i, \quad \forall i \quad (6)$$

C3 est une constante propre au tri de l'aluminium qui doit être déterminée par l'utilisateur suite à des expériences de tri. Il faut préciser que la valeur de C3 varie en fonction des technologies de tri utilisées et qu'une proportionnalité linéaire est supposée par l'équation (6) d'après l'hypothèse 5.

3.4.4. Variables

Voici les variables du modèle mathématique :

$$D_i = \begin{cases} 1, & \text{la composante ou le produit "i" est découpé(e)} \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \quad (7)$$

$$B_i = \begin{cases} 1, & \text{la composante ou le produit "i" est broyé(e)} \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \quad (8)$$

$$T_i = \begin{cases} 1, & \text{la composante ou le produit "i" est trié(e)} \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \quad (9)$$

3.4.5. Fonction objectif

Voici la fonction objectif du modèle mathématique :

$$\begin{aligned}
 \text{Max Profit} = & \underbrace{\sum_i n_i [T_i VT_i]}_{\text{Revenu aluminium trié}} + \underbrace{\sum_z \sum_{k \in SA_z} H_k D_z VT_k}_{\text{Revenu aluminium non trié homogène}} \\
 & + \underbrace{VM(\sum_a P_{a1} - \sum_i \sum_a n_i T_i P_{ai} - \sum_z \sum_{k \in SA_z} \sum_a H_k D_z P_{ak})}_{\text{Revenu aluminium non trié}} \\
 & - \underbrace{\sum_i n_i (D_i TD_i CD + B_i TB_i CB + T_i TT_i CT)}_{\text{Coûts d'opération}} + \sum_z \sum_{k \in SA_z} n_k B_z TB_k CB \quad (10)
 \end{aligned}$$

L'objectif du modèle mathématique est donc de maximiser le profit engendré par le processus de démantèlement du produit, soit l'avion dans notre cas. La fonction objectif contient deux principaux éléments : les revenus associés à la valorisation des débris d'aluminium triés et/ou non triés ainsi que les coûts d'opération liés à la découpe (D_i TD_i CD), au broyage (B_i TB_i CB) et au tri (T_i TT_i CT). La dernière sommation de la fonction doit être ajoutée pour ne prendre en considération que le coût de broyage de la première entité broyée de chaque branche de l'arbre de démantèlement, lequel inclut les coûts de broyage des composantes subséquentes.

3.4.6. Contraintes

Voici les contraintes du modèle mathématique :

Un élément coupé ne peut pas être broyé, un élément broyé ne peut pas être coupé et tous les éléments doivent être coupés ou broyés :

$$D_i + B_i = 1, \quad \forall i \quad (11)$$

Les pièces de l'arbre de démantèlement ne peuvent pas être coupées :

$$D_i = 0, \quad i \in y \quad (12)$$

Si une entité est broyée, tous ses composantes le sont aussi :

$$B_i \leq B_k, \quad i \in z, \quad k \in SA_i \quad (13)$$

Une composante ou le produit peut être coupé(e) ou trié(e), mais ne peut pas être les deux à la fois :

$$D_i + T_i \leq 1, \quad \forall i \quad (14)$$

Le tri des débris n'est possible que pour les éléments constitués de plus d'une sorte d'alliages d'aluminium :

$$N_i \geq 2 T_i, \quad \forall i \quad (15)$$

Le tri est possible que pour un élément qui est broyé :

$$B_i \geq T_i, \quad \forall i \quad (16)$$

Le tri n'est possible que pour la première composante de chaque branche de l'arbre de démantèlement qui est broyée ou uniquement pour le produit lorsqu'il est directement broyé sans opération de découpe.

$$2 - (B_i + B_k) \geq T_k, \quad i \in z, \quad k \in SA_i \quad (17)$$

$$D_i, B_i, T_i \in \{0,1\} \quad \forall i \quad (18)$$

3.5. Méthodologie de résolution du modèle d'optimisation

La résolution du modèle d'optimisation mathématique présenté peut se faire à l'aide d'un logiciel de programmation linéaire. Nous suggérons l'utilisation du Solveur Cplex du logiciel AmplStudio. L'annexe K à la page 123 contient les détails du programme qui a été saisi dans un fichier de type *.mod* et pouvant être résolu par ce solveur.

3.6. Exemple d'application – Empennage d'avion

L'étude de cas exposée dans cette section-ci a pour objet une partie d'avion, soit l'empennage. Le programme linéaire binaire saisi dans le logiciel AmplStudio est utilisé pour optimiser une seule séquence de démantèlement de l'empennage afin de vérifier la justesse du modèle ainsi que la validité et la rapidité d'exécution de la programmation proposée. Il est à noter que l'ensemble des informations utilisées dans cet exemple sont fictives. La séquence de démantèlement générée et implantée dans le programme est présentée à la figure 3.4 de la page suivante sous la forme d'un arbre de démantèlement.

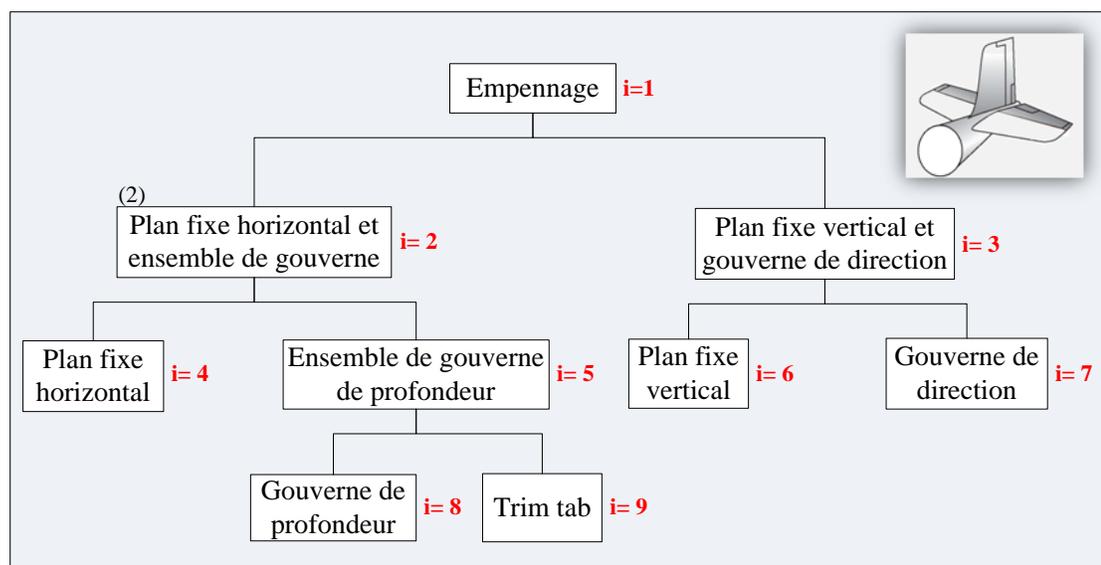


Figure 3.4 : Arbre de démantèlement – Empennage

L'utilisateur doit entrer plusieurs données dans le programme mathématique afin de pouvoir l'utiliser. La figure 3.5 à la page 90 montre les données qui ont été saisies à titre d'exemple dans un fichier de type *.dat*. Il y a neuf éléments dans l'arbre de démantèlement. Les éléments 2, 3 et 5 sont des entités et l'élément 1 est la section de produit à l'étude. Les éléments 4, 6, 7, 8 et 9 sont des pièces. Dans l'ensemble de ces pièces, il y a un total de trois types d'alliages d'aluminium : a1, a2 et a3. L'utilisateur a déterminé quatre ensembles de composantes afin de définir l'arbre de démantèlement : SA [1], SA [2], SA [3] et SA [5]. Puis, il a indiqué les alliages d'aluminium contenus dans chaque élément de l'arbre de démantèlement : AL [i]. Le nombre de fois que chacun de ces éléments se retrouve dans l'arbre est ensuite saisi (n) ainsi que la valeur marchande des alliages d'aluminium triés ou des lots homogènes (VA [a]). Le poids respectif de chaque type d'alliage contenu dans les pièces 4, 6, 7, 8 et 9 est également inscrit ainsi que leur volume. Finalement, les taux horaires de découpe, de tri et de broyage sont notés.

Le résultat obtenu suite à l'optimisation de la séquence de démantèlement insérée dans le modèle est présenté en détails à l'annexe L, à la page 126. La meilleure gamme de

démantèlement suggérée consiste à broyer directement l'empennage et à trier ses alliages d'aluminium pour un profit de 42 700 \$. Au total, 27 variables ont été traitées ainsi que 57 contraintes en 10,10 CPU secondes.

```

set Elements:= 1 2 3 4 5 6 7 8 9 ;
set Entity_Prod:= 1 2 3 5 ;
set Pieces:= 4 6 7 8 9 ;
set Alliages:= a1 a2 a3 ;

set SA[1]:= 2 3 ;
set SA[2]:= 4 5 ;
set SA[3]:= 6 7 ;
set SA[5]:= 8 9 ;

set AL[1]:= a1 a2 a3 ;
set AL[2]:= a1 a2 a3 ;
set AL[3]:= a2 a3 ;
set AL[4]:= a3 ;
set AL[5]:= a1 a2 a3 ;
set AL[6]:= a2 ;
set AL[7]:= a3 ;
set AL[8]:= a2 ;
set AL[9]:= a1 a3 ;

param n default 1:= 2 2;
param VA:= a1 3000, a2 3500, a3 2500;
param VM:= 1000;
param H default 0:= 4 1, 6 1, 7 1, 8 1;

param Poids_y:
      4   6   7   8   9:=
a1  0   0   0   0   1
a2  0   2   0   2   0
a3  2   0   1   0   1;

param Volume_y:= 4 1, 6 1, 7 1, 8 0.5, 9 0.5;

param CD:= 100;
param CT:= 100;
param CB:= 100;

```

Figure 3.5 : Données du fichier .dat – Empennage

3.7. Analyse du comportement du programme

VM, C1, C2 et C3 sont quatre constantes du modèle mathématique proposé. Leur valeur respective n'est pas fixe car elle varie selon plusieurs facteurs et dans le temps. Les valeurs utilisées dans l'exemple de l'empennage sont les suivantes : VM=1000 \$, C1=1 h/composante, C2=2 h/m³ et C3= 1 h/m³. Il s'avère important d'analyser l'impact de la variation de ces valeurs sur le profit réalisé ainsi que sur la séquence de démantèlement proposée par le programme. L'annexe M de la page 129 présente les séquences de démantèlement « optimales » fournies par le programme suite à la modification de la valeur de ces constantes.

Dans le cas de la valeur marchande de l'aluminium non trié (VM), nous remarquons que toutes les valeurs inférieures à 3000 \$ entraînent le choix de la même séquence de démantèlement que celle de la solution initiale ainsi qu'un profit équivalent. Ce résultat est logique puisque la solution initiale suggère le tri de tous les alliages présents. Ce faisant, lorsque la valeur de VM diminue, il est encore plus rentable de trier les débris métalliques. Le choix d'une valeur quelconque inférieure à 3000 \$ n'a donc aucune influence sur le profit généré. Par contre, pour des valeurs supérieures ou égales à 3000 \$, il devient plus rentable de ne pas trier les débris issus du broyage, car VM est désormais supérieur à la valeur marchande de l'aluminium trié. La séquence en est modifiée et le profit obtenu est plus élevé. Par ailleurs, lorsque VM est supérieure ou égale à 3500 \$, la solution ne propose aucun tri, ni aucune découpe, laquelle pourrait permettre d'obtenir une entité de composition en aluminium homogène. Bref, la seule opération suggérée est de broyer l'empennage et le profit augmente plus les valeurs de VM sont élevées. Il faut cependant préciser qu'il serait surprenant que l'aluminium postconsommation non trié atteigne une valeur marchande supérieure à celle de l'aluminium de première fusion.

Nous constatons aussi que la variation de la valeur de la constante associée au temps de découpe (C1) a un impact marqué sur la séquence de démantèlement proposée par le programme mathématique. En effet, lorsque la valeur de C1 est inférieure à 0,4, soit

24 min/composantes, la découpe des entités 1 et 3 est favorable et le profit généré est supérieur à celui de la solution initiale. Cependant, pour des valeurs de C1 plus grandes que 0,4, la séquence obtenue est la même que l'originale. Puisqu'aucune opération de découpe ne s'y retrouve, toutes les valeurs de C1 supérieures à 0,4 occasionnent le même profit.

Pour ce qui est de C2, la constante qui influence le temps de broyage, il est évident que des valeurs inférieures à celle du scénario initial entraînent des profits plus importants sans pour autant modifier la solution proposée étant donné que celle-ci propose déjà le broyage de tous les éléments. Le profit engendré chute dès que C2 est supérieure à sa valeur initiale, mais la séquence demeure inchangée jusqu'à ce que C2 soit égale à 60 h/m^3 . À partir de cette valeur, il est préférable de couper les entités 1, 2 et 3 avant de procéder au broyage, ce qui n'empêche pas le profit de chuter pour finalement correspondre à des pertes lorsque C2 est supérieure à 80 h/m^3 .

En considérant que le scénario d'origine propose le tri de l'empennage (entité 1), il est normal que des valeurs de C3 inférieures à sa valeur initiale engendrent un profit supérieur sans modifier la solution. Au même titre que C2, des valeurs plus élevées de C3 entraînent une diminution du gain, et ce même lorsque la séquence suggérée est différente de l'originale. En effet, dès que la valeur de C3 est égale à $2,5 \text{ h/m}^3$, la découpe de l'entité 1 et de l'entité 3 ainsi que le tri des débris de l'entité 2 représentent une alternative plus avantageuse. Il en est de même jusqu'à ce que C3 atteignent 34 h/m^3 , valeur à partir de laquelle il est préférable de couper toutes les entités et de trier uniquement la pièce 9. Finalement, lorsque la variable associée au temps de tri atteint 70 h/m^3 et plus, le tri n'est plus une opération génératrice de gain et les séquences de démantèlement proposées sont toutes les mêmes, c'est-à-dire la découpe de toutes les entités et le broyage de toutes les pièces.

Les taux horaire des opérations de découpe (CD), de broyage (CB) et de tri (CT) sont aussi déterminés par l'utilisateur. Dans le cas du problème de l'empennage, les coûts

d'opération sont les suivants : $CD=100$ \$/h, $CB=100$ \$/h, $CT=100$ \$/h. Il est donc pertinent d'évaluer l'impact de la variation de ces paramètres sur la solution optimale du programme. L'annexe N à la page 144 présente les séquences de démantèlement de même que les profits obtenus suite à ces modifications.

Un taux horaire de découpe inférieur ou égal à 40 \$/h rend la découpe des entités 1 et 3 favorable, laquelle permet de réaliser un profit supérieur à celui de la situation initiale. Toutefois, pour des valeurs plus élevées, aucune découpe n'est proposée et la variation de CD n'a pas d'impact sur le profit réalisé. En ce qui concerne le taux horaire de broyage, nous constatons également qu'une diminution de CB entraîne une augmentation du profit, sans pour autant changer la séquence optimale puisque la solution initiale propose déjà de broyer tous les éléments. Pour des valeurs de CB supérieures à 2975 \$, les opérations de découpe deviennent économiquement favorables, ce qui n'empêche pas de faire des pertes lorsque CB dépasse 4000 \$. Finalement, des valeurs inférieures du taux horaire de tri par rapport à la valeur initiale génèrent les mêmes séquences de démantèlement et de plus grands profits, tandis que des valeurs supérieures entraînent une modification de la séquence proposée et des profits inférieurs, jusqu'à ce que le tri ne soit plus une opération rentable, c'est-à-dire lorsque CT vaut 7000 \$ et plus. Par conséquent, tous les taux horaires de tri plus élevés que 7000 \$ engendrent la même séquence « optimale » et le même profit, soit 27 600 \$.

Nous remarquons que le programme réagit de manière semblable aux variations de C1 et de CD, ce qui est prévisible puisque ces deux constantes influencent le coût de la découpe. Une augmentation de C1 ou de CD correspond à une augmentation du coût de découpe. Il en est de même pour C2 par rapport à CB et pour C3 par rapport à CT. Nous pouvons donc conclure que le comportement du programme mathématique est cohérent et que ce programme représente adéquatement le modèle mathématique développé dans ce chapitre.

3.8. Conclusion

Il faut préciser que l'utilisation de l'algorithme proposé dans ce chapitre suppose que le choix des équipements de découpe, de broyage et de tri a été réalisé à priori, ce qui est réaliste puisque les SDA étudiés ne possèdent qu'un seul type d'équipement de découpe et n'utilisent qu'une seule méthode de broyage et de tri, peu importe le type d'avion. Cependant, il serait pertinent d'inclure le choix de ces équipements et de ces technologies dans le modèle mathématique pour savoir s'il serait plus économique d'utiliser une autre stratégie. De plus, il serait souhaitable que l'optimisation de la séquence de démantèlement soit réalisée en fonction de la valorisation de tous les matériaux constituant la carcasse de l'avion. Cela est possible en ajoutant différents types d'alliages dans l'ensemble « a », lesquels représenteraient le cuivre, les alliages de titane et l'acier, ainsi que leur poids et leur valeur marchande dans le fichier de données *.dat*. Toutefois, le paramètre VM serait difficile à déterminer, car il s'agirait de la valeur marchande du mélange de tous les matériaux. L'ajout de la consommation énergétique ou de la quantité d'émissions de CO₂ équivalent (Co₂eq) au modèle mathématique permettrait de prendre en considération l'impact environnemental des choix dans l'optimisation de la séquence de démantèlement.

Finalement, il est important de mentionner que les sections 3.2 à 3.7 ont servi à l'élaboration d'un article scientifique ayant pour titre « Airframe Dismantling Optimization for Aerospace Aluminum Valorization » qui a été accepté pour présentation lors de la conférence « 2009 IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing ». Une copie de cet article se trouve à l'annexe O à la page 154.

CONCLUSION

Les humains exercent une pression importante sur les ressources naturelles de notre planète, et ce fait est observable lorsque nous considérons l'augmentation de la production mondiale d'aluminium qui a plus que doublée depuis 1980. Une importance grandissante du recyclage de l'aluminium a été constatée dans la production d'alliages de corroyage et de moulage. Le recyclage génère désormais plus du tiers de la production mondiale d'aluminium. Un besoin se fait toutefois ressentir quant à l'optimisation du processus de recyclage pour faire face à la dépréciation de l'aluminium et encourager le recyclage dont l'empreinte écologique est moindre que celle de l'industrie primaire. Pour rivaliser avec cette industrie, le traitement des impuretés par le biais de divers procédés est une étape cruciale. Il a été vu que la décentralisation des matériaux peut nuire à l'efficacité de la collecte et qu'il faut assurer un approvisionnement constant pour favoriser la rentabilité des opérations. Aussi, la préparation des matières premières secondaires est une étape déterminante du processus de recyclage, car le broyage et le tri permettent d'obtenir des lots commerciaux ayant un meilleur rendement. C'est pourquoi, des efforts doivent être faits en vue d'augmenter l'efficacité des méthodes employées. Malgré la complexité du recyclage de l'aluminium dû au vaste choix d'équipements et de méthodes, l'Amérique du Nord détient plusieurs filières spécialisées qui ont leur propre réseau de création de valeur, qui font intervenir plusieurs acteurs et qui utilisent des stratégies de démantèlement, de tri et de recyclage variées. Dans tous les cas, il faut s'assurer que des mesures en matière de santé et de sécurité sont appliquées de manière à réduire les sources de danger auxquelles les ouvriers sont exposés. En ce sens, les PME canadiennes devraient s'approprier les outils qu'utilisent les grandes alumineries du Canada et même devenir membres de l'Association de l'Aluminium du Canada. Il serait souhaitable de légiférer la fin de vie des produits au Canada, d'uniformiser les pratiques actuelles de recyclage et d'encourager un échange de connaissances entre les pays.

La principale contribution de ce mémoire réside dans la modélisation de l'industrie du démantèlement aéronautique et des processus d'affaires associés. Compte tenu du potentiel de rentabilité du recyclage de l'aluminium des avions désuets, de la hausse de la quantité d'avions en fin de vie prévue dans un avenir rapproché et des efforts grandissants fournis par les industriels, les chercheurs et les organisations, il est justifié de conclure que le démantèlement aéronautique représente un secteur industriel prometteur. Non seulement ces efforts ont une influence sur le traitement en fin de vie des avions, mais aussi sur l'ensemble du cycle de vie des produits, car ils mènent à une meilleure connaissance des possibilités de traitement des matériaux. Par conséquent, ces efforts encouragent une conception à la source qui favorise le recours à des matériaux dont le taux de recyclage est élevé au détriment de ceux qui sont difficilement valorisables tels que les matériaux composites, ce qui a pour effet de minimiser la quantité de déchets produite. Nous assistons donc à l'arrivée de l'éco-conception dans la fabrication du corps des avions. De plus, la facilité et la rapidité de désassemblage et de démantèlement d'un produit sont davantage prises en considération à l'étape de la conception puisqu'elles ont un impact direct sur les coûts encourus lors du processus de démantèlement.

Le modèle d'affaires des entreprises de démantèlement aéronautique varie d'une compagnie à une autre ainsi que le taux de récupération et de valorisation des matériaux. L'algorithme et le modèle mathématique élaborés dans ce travail visent à faciliter l'identification de la séquence de démantèlement d'un avion qui maximise la valorisation de l'aluminium ainsi que les profits monétaires engendrés. Il s'agit d'un outil qui nécessite tout de même une bonne connaissance de l'aéronef et de la faisabilité des opérations de démantèlement de la part du personnel ainsi que des aptitudes en informatique. Il peut s'avérer fastidieux de collecter les données requises pour exécuter le programme mathématique, mais une fois cette étape franchie, la solution obtenue correspond à la meilleure solution au point de vue économique parmi celles qui ont été envisagées. De plus, dès que les données du programme ont été insérées pour un modèle

d'avion en particulier, celles-ci demeurent valides pour tous les aéronefs de ce modèle qui n'ont pas subits d'altération majeure durant leur usage.

Il faut cependant préciser les limites d'application de l'algorithme exposé dans ce projet de recherche et insister sur quelques particularités. D'abord, nous ne prétendons pas obtenir la séquence optimale de démantèlement de la carcasse d'un avion par le biais de l'algorithme et du modèle mathématique, mais plutôt la meilleure séquence de démantèlement parmi celles qui auront été proposées par les employés des SDA. Nous supposons que ceux-ci possèdent les connaissances requises à l'élaboration des arbres de démantèlement. L'optimisation de chaque arbre de démantèlement saisi dans le programme linéaire et binaire mène, quant à elle, à une séquence de démantèlement optimale pour chacun de ces arbres. Aussi, l'optimisation de la séquence des opérations de démantèlement de chaque arbre de démantèlement est effectuée en fonction du fait que 68 % de la valorisation des matériaux de la coque d'un avion correspond à la part des revenus associée à la récupération des alliages d'aluminium. Il s'agit de l'unique raison justifiant le fait que le modèle d'optimisation mathématique ne considère que la valorisation de l'aluminium et non celle des autres matériaux. Or, il faut s'assurer que la conception de l'aéronef considéré rempli cette condition avant de mettre en pratique l'algorithme proposé. Deux améliorations futures sont envisageables : la prise en charge par le modèle mathématique de la valorisation d'autres matériaux ainsi que des coûts de manutention impliqués lors de l'étape du démantèlement.

Pour conclure, le modèle proposé offre la possibilité de combiner l'objectif premier des entreprises à but lucratif, soit la génération de profits, et la prise en charge de la réduction des impacts environnementaux négatifs qui sont omniprésents dans notre société. Il est fortement souhaitable que les manufacturiers transforment les ressources de notre planète en produits réutilisables ou valorisables plutôt qu'en déchets. Pour ce faire, il faut poursuivre le développement d'outils permettant d'optimiser les activités qui supportent cette avenue, car ces activités sont souvent perçues comme étant

coûteuses alors qu'elles ont un potentiel de rentabilité comme il a été démontré par l'étude du démantèlement aéronautique.

RÉFÉRENCES

- AAC. (1998). Guide sur l'efficacité énergétique dans les alumineries. *Association de l'Aluminium du Canada*. Consulté le 03 mars 2009, tiré de <http://oee.rncan.gc.ca/infosource/pdfs/M27-01-1115f.pdf>
- AAC. (2007). L'industrie canadienne de l'aluminium et l'environnement. *Association de l'Aluminium du Canada*. Consulté le 29 mars 2009, tiré de http://www.aia.aluminium.qc.ca/documents/AAC_Brochure_environnement_2007.pdf
- AAC. (2009a). L'aluminium, dépliant d'informations générales. *Association de l'Aluminium du Canada*. Consulté le 29 mars 2009, tiré de http://www.aia.aluminium.qc.ca/documents/depli_alumi_f.pdf
- AAC. (2009b). Canette. *Association de l'Aluminium du Canada*. Consulté le 23 août 2009, tiré de <http://www.aia.aluminium.qc.ca/f303c.html>
- Airbus. (2008). Aircraft recyclability moves to the next level with Pamela A380 tests. *Airbus Eco-News*. Consulté le 3 octobre 2009, tiré de http://www.airbus.com/en/corporate/ethics/environment/eco-news/articles/?tx_ttnews%5Btt_news%5D=263&tx_ttnews%5BbackPid%5D=807&cHash=9dffd4c504
- Airbus. (2009). Process for Advanced Management of End-of-Life Aircraft – Training kit. *Pamela Life*. Consulté le 15 septembre 2009, tiré de <http://www.pamelalife.com>

- Aircraft Engineering and Aerospace Technology. (2009). Industrial aluminium recycling cycle becomes key to the aircraft end-of-life management challenge. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal*, Vol. 81, no. 2. Consulté le 22 septembre 2009, tiré de <http://www.emeraldinsight.com/Insight/ViewContentServlet?contentType=NonArticle&Filename=Published/NonArticle/Articles/12781baf.003.html>
- AFRA. (2009). Member Capabilities. *Aircraft Fleet Recycling Association*. Consulté le 14 août 2009, tiré de <http://www.afraassociation.org/index.cfm>
- ATE&M. (2007). The end of the line — aircraft recycling initiatives. *Aircraft Technology Engineering and Maintenance Magazine*, April/May, 28-33.
- Barde, J.P. (1991). Un principe de base : le Principe Pollueur-Payeur. *Économie et politique de l'environnement*, PUF, pp.209-225.
- Bourjault, A., Chappe, D., & Henrioud, J. M. (1987). Élaboration automatique des gammes d'assemblage à l'aide de réseaux de Pétri. *RAIRO APII*, vol. 21, pp. 323-342.
- Bousquet, G. (2009). Tarbes. Le cimetière où l'on achève bien les avions. *LADEPECHE.fr*. Consulté le 22 septembre 2009, tiré de <http://www.ladepeche.fr/article/2009/06/23/628424-Tarbes-Le-cimetiere-ou-l-on-acheve-bien-les-avions.html>
- Brown, W.F., Mindlin H., & Ho, C. Y. (1996). West Lafayette, IN : CINDAS/USAF CRDA Handbooks Operations (éds), *Aerospace structural metals handbook* (Vol. 3, pp. aiwt-3200- mgc-3400). Purdue University.
- Carberry, B. (2007). Aircraft scrapping and recycling. *WINGNet*. Consulté le 28 mars 2009, tiré de <http://users.ox.ac.uk/~pgrant/Airplane%20scrapping%20and%20recycling.pdf>

- Chabanet, O. (2007). L'Aluminium Aujourd'hui. *Alcan*. Consulté le 23 août 2009, tiré de <http://www.tousenboite.org/documentation/Publications/AluminiumChabanet.pdf>
- Challier, P. (2008). Tarbes. Recyclage de vieux avions : un centre unique en Europe. *LADPECHE.fr*. Consulté le 22 septembre 2009, tiré de <http://www.ladepêche.fr/articl/2008/10/16/482057-Tarbes-Recyclage-de-vieux-avions-unique-en-Europe.html>
- Constant, O. (2007). Anticiper pour préserver l'environnement. *Site de la direction générale de l'aviation civile française (DGAC)*. Consulté le 17 septembre 2009, tiré de http://www.aviation-civile.gouv.fr/html/publicat/av_civil/344/344-8-9.pdf
- Das, S.K. (2007). Recycling Aluminum Aerospace Alloys. *Light Metals*, 1161-1165.
- De Brito, M.P., Van der Laan, E.A., & Irion Brijan, D. (2007). Extended producer responsibility in the aviation sector. *ERIM Report Series Reference No ERS-2007-025-LIS*. Consulté le 17 septembre 2009, tiré de <http://ssrn.com/abstract=988723>
- De Gaspari, J. (1999). Making the most of aluminum scrap. *Mechanical Engineering*. Consulté le 03 mars 2009, tiré de <http://www.memagazine.org/backissues/membersonly/nov99/features/aluminum/aluminum.html>
- De Marco I., Caballero, B.M., Cabrero, M.A., Laresgoiti, M.F., Torres, A., & Chomo, M.J. (2007). Recycling of automobile shredder residues by means of pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 79, 403 à 408.
- Dubois, T. (2008). Airbus studies green solution for aircraft dismantling work. *AINonline*. Consulté le 8 septembre 2009, tiré de <http://www.ainonline.com/news/single-news-page/article/airbus-studies-green-solution-for-aircraft-dismantling-work/>

- EAA. (2004). Aluminium Recycling in Europe – The Road to High Quality Products. *European Aluminium Association*. Consulté le 26 janvier 2009, tire de <http://www.world-aluminium.org/cache/fl0000217.pdf>
- EADS. (2006). EADS annual review 2006. *EADS*. Consulté le 22 septembre 2009, tiré de http://www.reports.eads.com/2006/en/s/downloads/files/inside_eads_eads_ar06.pdf
- EC. (2001). *Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC) – Reference Document on Best Available Techniques in the Non Ferrous Metals Industries*. European Commission, 755 p.
- EPSRC. (2007). *The Aircraft at End of Life Sector: a Preliminary Study*. Oxford, Royaume-Uni: Engineering and Physical Sciences Research Council.
- Fleischmann, M., Beullens, P., Bloemhof-Ruwaard, J. M., & Van Wassenhove, L. N. (2001). The impact of product recovery on logistics network design. *Production and operations management*, vol. 10, no. 2, pp. 156-173.
- Forslind, K.H. (2005). Implementing extended producer responsibility: the case of Sweden's car scrapping scheme. *Journal of Cleaner Production*, 13, 619 à 629.
- Fouret, J.L. (2009). Ingénierie des fonderies. *Techniques de l'ingénieur, ingénierie et environnement en fonderie*, M 854-1 à M 854-42.
- Gaustad, G., Olivetti, E., & Kirchain, R. (2008). Economic and Environmental Evaluation of Various Aluminum Scrap Upgrading Options using Chance Constrained Optimization Modeling. *Proceedings of 2008 Global Symposium on Recycling, Waste Treatment and Clean Technology*, p.311-316.

- Gendron, A., Dussault, M., Juneau, N., & Savoie, P. (2008). La responsabilité élargie des producteurs (REP) – État de la situation, enjeux et perspectives. *Gouvernement du Québec*. Consulté le 15 septembre 2009, tiré de <http://www.mddep.gouv.qc.ca/matieres/valorisation/0803-REP.pdf>
- Green, J.A.S. (2007). *Aluminum Recycling and Processing for Energy Conservation and sustainability*. ASM International (éd.), Ohio: Material Park, 267 p.
- Gungor, A., & Gupta, S. M. (1998). Disassembly Sequence Planning for Complete Disassembly in Product Recovery. *Proc. of the Northeast Decision Sciences Institute Conf.*, Boston.
- Herbulot, F. (2009a). Récupération et recyclage de l'aluminium. Stratégies. *Techniques de l'Ingénieur, traité Matériaux métalliques*, M 2345-1 à M2345-15.
- Herbulot, F. (2009b). Récupération et recyclage de l'aluminium. Matières premières. *Techniques de l'Ingénieur, traité Matériaux métalliques*, M 2346-1 à M2346-17.
- Herbulot, F. (2009c). Récupération et recyclage de l'aluminium. Fusion et mise en forme. *Techniques de l'Ingénieur, traité Matériaux métalliques*, M 2347-1 à M2347-20.
- IAI. (2009). Statistics. *International Aluminium Institut*. Consulté le 27 janvier 2009, tiré de <http://www.world-aluminium.org/>
- Iitzkowitch, Z. (2008). 1ère Plateforme européenne de démantèlement aéronautique. *Dossier de presse Bartin Aero Recycling*. Consulté le 27 mars 2009, tiré de http://www.veolia-proprete.com/documents/DP%20Bartinaero%20Recycling_2008_HD.pdf
- Jacobowicz, I. (2009). Fours Industriels. *Techniques de l'Ingénieur, traité Génie énergétique*, BE 8 842 – 1 à BE 8 842 – 18.

- JWF. (2009). Tarmac Aerosave : début de l'activité de déconstruction d'avions à Tarbes. *Objectif News*. Consulté le 23 août 2009, tiré de <http://www.objectifnews.com/node/524>
- Kingsley-Jones, Max. (2008). Airbus's recycling master plan – Pamela. *Flight International*. Consulté le 17 septembre 2009, tiré de <http://www.flightglobal.com/articles/2008/05/26/224015/airbuss-recycling-master-plan-pamela.html>
- Lambert, A.D.J. (2003). Disassembly sequencing: a survey. *International Journal of production Research*, vol. 41, no. 16, pp. 3721-3759.
- Le Cloirec, P. (2009). Procédés de dépollution des émissions gazeuses industrielles. *Techniques de l'Ingénieur, traité Génie énergétique*, J 3 921 – 1 à J 3 921 – 10.
- Lemoine, P. (2009). Le développement durable gagne l'aéronautique. *La-Croix*, 7 juin. Consulté le 20 sept 2009, tiré de <http://www.la-croix.com>
- Lourdes-Infos. Le projet Pamela de déconstruction des avions en fin de vie. *Site de Lourdes-Infos*. Consulté le 22 septembre 2009, tiré de <http://www.lourdes-infos.com/PAMELA.pdf>
- Mackenzie, C. (2008). Destroying old airliners and protecting the environment. *New York Times*, Sunday, July 13. Consulté le 17 septembre 2009, tiré de <http://www.nytimes.com/2008/07/13/business/worldbusiness/13iht-RAIRBREAK.1.1.4447699.html>
- Malavallon, O. PAMELA – Life. *Pamela-Life-NFDD-PR0704380-v15-April08, Paris, France*. Gifas : Groupement des Industries Françaises Aéronautiques et Spatiales. Consulté le 18 septembre 2008, tiré de http://www.gifas.asso.fr/reaxia/files/hvurslmgksci/2008avril2_airbusPamelaLife-Olivier_Malavallon_-02_04_108-fr.pdf

- Ménard, C. (1999). L'incinération des déchets. *Site Éco-collégiens*. Consulté le 26 mars 2009, tiré de http://colleges.acrouen.fr/povremoyne/exposition/expo/lincineration_des_dechets.htm
- Ministère de la justice du Canada. (1992). Loi canadienne sur l'évaluation environnementale. *Ministère de la justice*. Consulté le 30 mars 2009, tiré de <http://lois.justice.gc.ca/fr/ShowFullDoc/cs/C-15.2///fr>
- Ministère de la justice du Canada. (1999). Loi canadienne sur la protection de l'environnement. *Ministère de la justice*. Consulté le 30 mars 2009, tiré de <http://lois.justice.gc.ca/fr/C-15.31/texte.html>
- Mutha, A., & Pokharel, S. (2009). Strategic network design for reverse logistics and remanufacturing using new and old product modules. *Computers & Industrial Engineering*, vol. 56, pp. 334-346.
- Natural resources Canada. (2006). Aluminum. *Canadian Minerals yearbook*. Consulté le 26 janvier 2009, tiré de www.nrcan.gc.ca
- NPP. (2009). Alliages aluminium. *Novelis Painted Products*. Consulté le 1er mars 2009, tiré de http://www.novelis-painted.com/de_laluminium/alliages/index_fra.html
- OCDE. (1975). *Le Principe Pollueur-Payeur : définition analyse mise en œuvre*. OCDE, Paris, 123 p.
- Pamela-Life. (2009). Main results of the project. *Pamela-Life*. Consulté le 28 septembre 2009, tiré de <http://www.pamelalife.com/resultats>.
- Poirot, S. (2009). Les avions aussi ont droit à une seconde vie. *Ouest France, mercredi 15 juillet*. Consulté le 20 septembre 2009, tiré de http://www.ouest-france.fr/actu/actuDet_-Les-avions-aussi-ont-droit-a-une-seconde-vie-_3636-1005387_actu.Htm

- Pothen, J.P. (2009). Emballage et Environnement. *Techniques de l'Ingénieur, traité Génie industriel*, A 9730-1 à A 9730-13.
- Reh, L. (2006). Challenges for process industries in recycling. *China Particuology*, 4(2), 47-59.
- Schlesinger, M. E. (2007). *Aluminum Recycling*. CRC Press (éd.), Florida: Boca Raton, 225 p.
- Schultmann, F., & Sunke, N. (2008). Planning Models for the Dismantling of Electrical and Electronic Equipment Under Consideration of Uncertainties. *Progress in Industrial Ecology – An International Journal*, vol.5, nos 1/2, pp. 82-101.
- Srogi, K. (2008). An overview of current processes for the thermochemical treatment of automobile shredder residue. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 10, 235 à 244.
- SubTech. (2009). Cast Aluminum Alloys. *SubTech*. Consulté le 1er mars 2009, tiré de http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=cast_aluminum_alloys
- Tang, Y., Zhou, M., Zussman, E., & Caudill, R. (2000). Disassembly modeling, planning and application: a review. *Proceedings of the 2000 IEE International Conference on Robotics & Automation*, San Francisco, CA, pp. 2197-2202.
- Tarmac Aerosave. (2009). 1^{ère} Filière Industrielle de Stockage et de Déconstruction d'Aéronefs Totalement Respectueuse de l'Environnement. *Tarmac Aerosave*. Consulté le 12 août 2009, tiré de <http://www.tarmacerosave.aero/default.html>
- Tegtmeir, L.A. (2007). We Recycle - Used airplane parts can appear in the strangest places. *Air & Space Magazine, March 01*. Consulté le 17 septembre 2009, tiré de http://www.airspacemag.com/flight-today/we_recycle.html?c=y&page=1

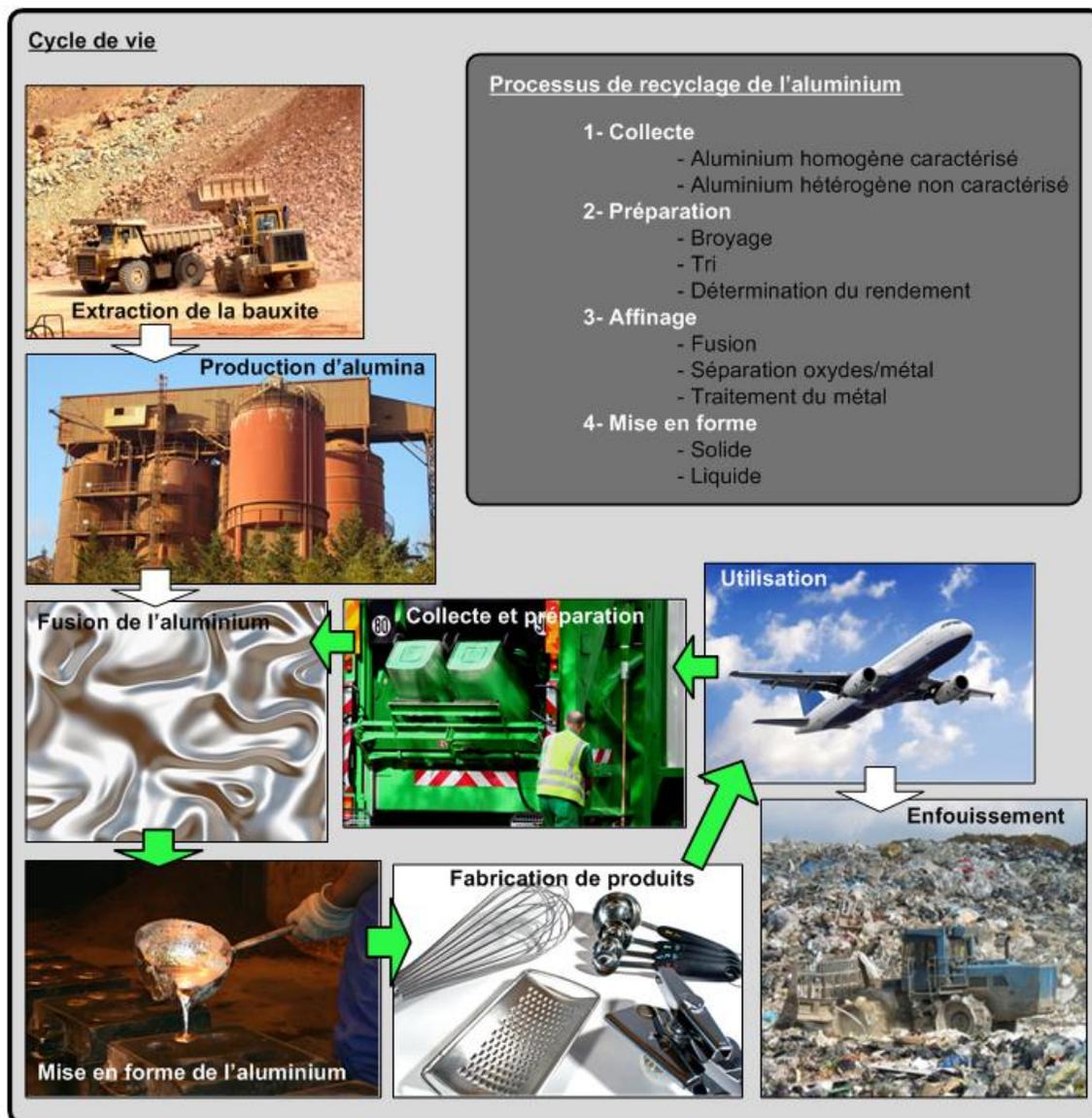
- The Aluminum Association. (2004). *International Alloy Designations and Chemical Composition Limits for Wrought Aluminum and Wrought Aluminum alloys*. Unified North American and International Registration Records, Teal Sheets.
- Toffel, M.W. (2002). Strategic management of product recovery. *California management review*, vol. 46, no. 2, pp. 120-141.
- TransportZoom. (2009). Le recyclage des vieux avions. TransportZoom. Consulté le 28 septembre 2009, tiré de <http://www.transportzoom.com/Le-recyclage-des-vieux-avions-58.html>
- UNEP. (2009). Mining waste generated from aluminum production. *United Nations Environment Program*. Consulté le 1er mars 2009, tiré de <http://www.grida.no>.
- Veolia. (2009). Commercial Aircraft Dismantling. *Site corporatif de Veolia*. Consulté le 28 septembre 2009, tiré de <http://www.veolia.com/en/challenges/technologies.aspx>
- Vlieland, S. The end of an aircraft's life. *Auto Recycling Nederland*. Consulté le 18 septembre 2008, tiré de http://www.aels.nl/sites/aels/user_files/NewsArticles/ARNArticleEnglishComplete.pdf
- Wang, J.F., Liu, J. H., Li, S.Q., & Zhong, Y.F. (2003). Intelligent Selective Disassembly using the Ant Colony Algorithm. *Artificial Intelligence for Engineering Design and Manufacturing*, vol. 17, pp. 325-333, 2003.
- Wash, E (2008). *Background, Aircraft recycling*. Seattle, Washington: Boeing.
- Watson, M. (2008). SBAC Aviation and Environment Briefing Papers – 11: End of Aircraft Life Initiatives. *Society of British Aerospace Companies (SBAC)*. Consulté le 17 septembre 2009, tiré de http://www.sbac.co.uk/community/cms/content/preview/news_item_view.asp?i=18694&t=0

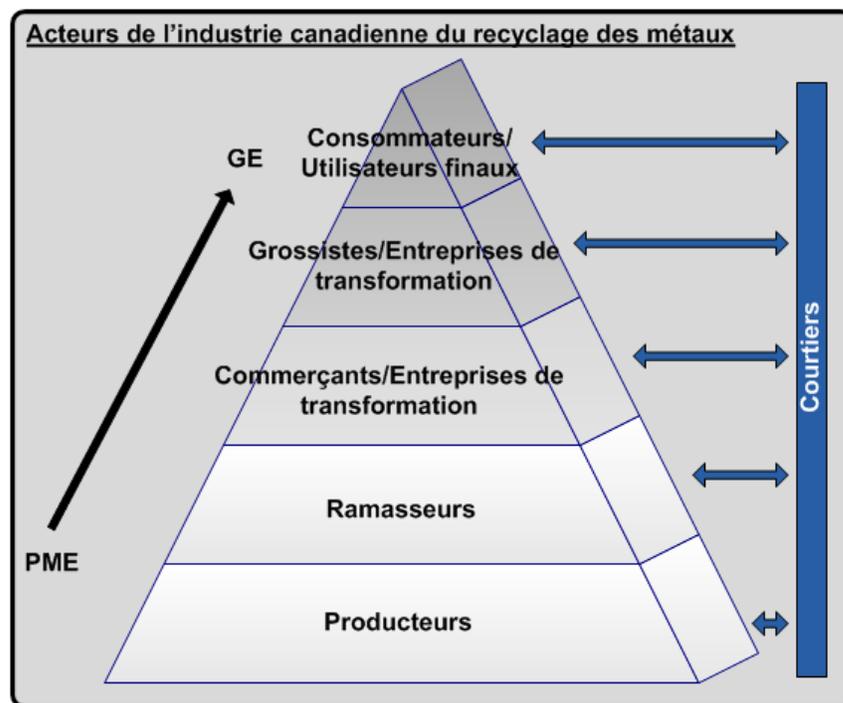
- Willems, B., Dewulf, W., & Duflou, J. (2004). End-Of-Life strategy selection: a linear programming approach to manage innovations in product design. *International Journal of Production Engineering and Computers*, vol. 6, no. 7, pp. 45-53, 2004.
- Williams, J .A.S., Wongweragiat, S., Qu, X., McGlinch, J.B., Bonawi-tan, W., Choi, J.K., & Schiff, J. (2007). An automotive bulk recycling planning model. *European Journal of Operational Research*, 177, 969 à 981.

ANNEXE A :
POURCENTAGE MAXIMAL DE FER DANS LES ALLIAGES DE
CORROYAGE

Alliages	% Fe								
1050	0.40	2091	0.30	3104	0.80	5356	0.40	6111	0.40
1100	0.95	2117	0.70	4032	1.00	5454	0.40	7005	0.40
1175	0.15	2124	0.30	4043	0.80	5457	0.10	7020	0.40
1350	0.40	2219	0.30	5005	0.70	5657	0.10	7075	0.50
2007	0.80	2224	0.15	5017	0.70	5754	0.40	7150	0.15
2011	0.70	2324	0.12	5042	0.35	6005	0.35	7175	0.20
2017	0.70	2618	1.30	5052	0.40	6016	0.50	7178	0.50
2024	0.50	3003	0.70	5082	0.35	6060	0.30	7475	0.12
2038	0.60	3004	0.70	5083	0.40	6061	0.70	8011	1.00
2048	0.20	3005	0.70	5182	0.35	6063	0.35	8017	0.80
2090	0.12	3103	0.70	5252	0.10	6082	0.50	8090	0.30

ANNEXE B : PROCESSUS DE RECYCLAGE, CYCLE DE VIE ET ACTEURS





Consommateurs/Utilisateurs finaux : entreprises qui utilisent le métal recyclé comme matière première dans la fabrication de produits.

Grossistes/Entreprises de transformation : entreprises qui transforment et produisent des lots commerciaux de métaux recyclables selon les normes et les spécifications internationales.

Commerçants/Entreprises de transformation : entreprises qui transforment les métaux recyclables (tri, broyage, traitement) pour les vendre à de grandes entreprises (grossistes/entreprises de transformation).

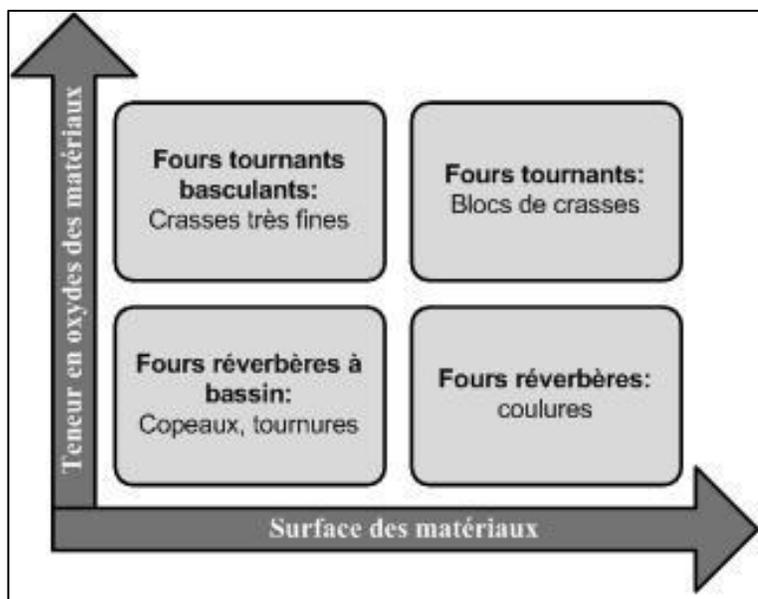
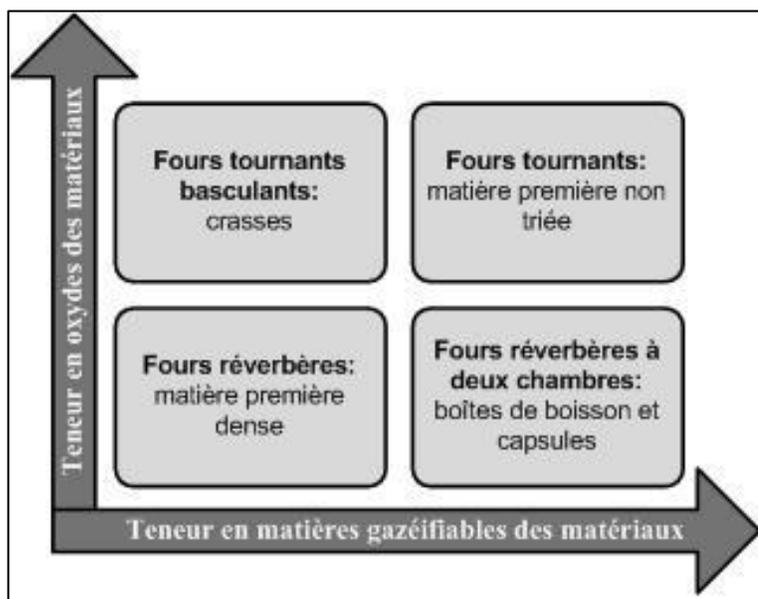
Ramasseurs : entreprises qui collectent les matières recyclables des résidences, des entreprises ou des établissements et qui les transportent à des installations de transformation ou aux consommateurs finaux.

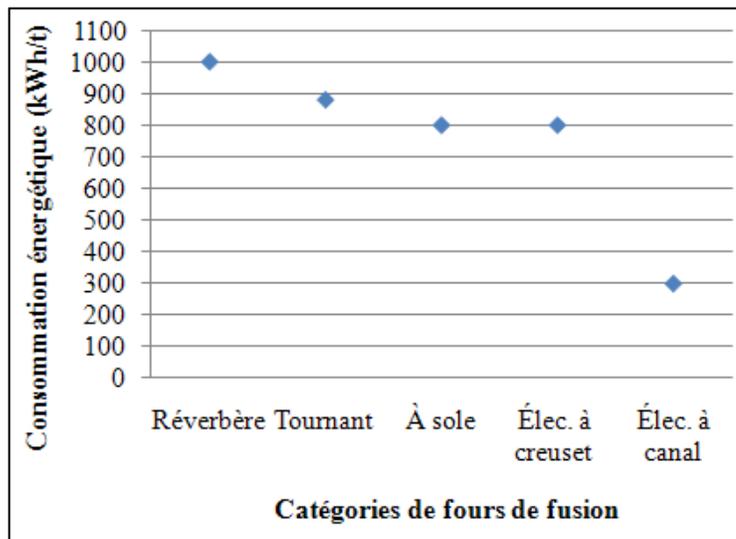
Producteurs : entité qui produit des débris métalliques, municipalité.

Courtiers : agents principaux de l'achat et de la vente des métaux recyclables.

ANNEXE C : ÉQUIPEMENTS DE FUSION

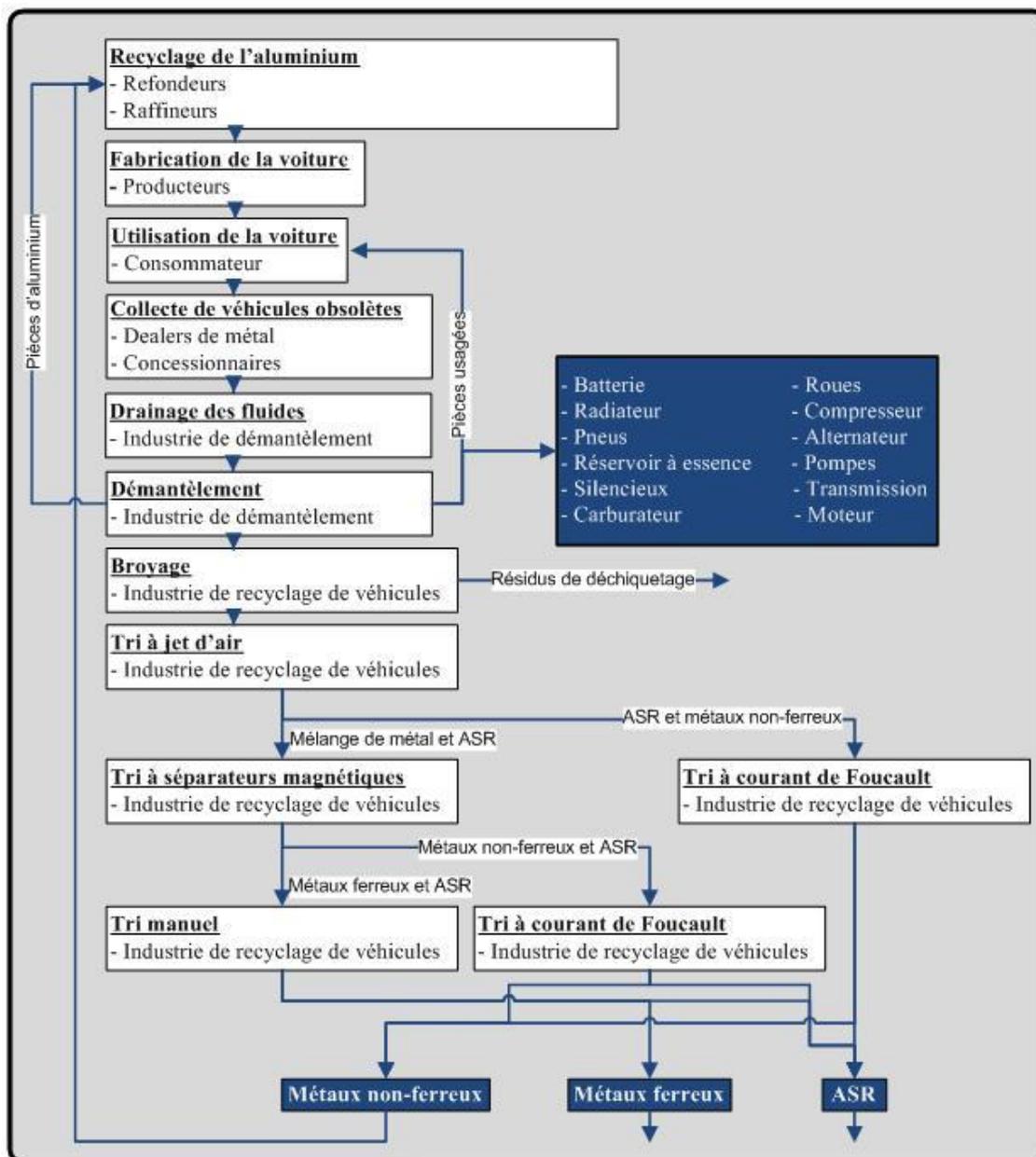
Classification des fours (Source : Herbulot, 2009c):



Consommation énergétique (Sources : *Herbulot, 2009c ; Fouret, 2009*) :

Il faut préciser que les consommations données dans ce graphique sont des consommations maximales issues de fournisseurs et que plusieurs facteurs liés à l'utilisation peuvent les faire varier.

ANNEXE D : PROCESSUS DE RECYCLAGE DES VÉHICULES



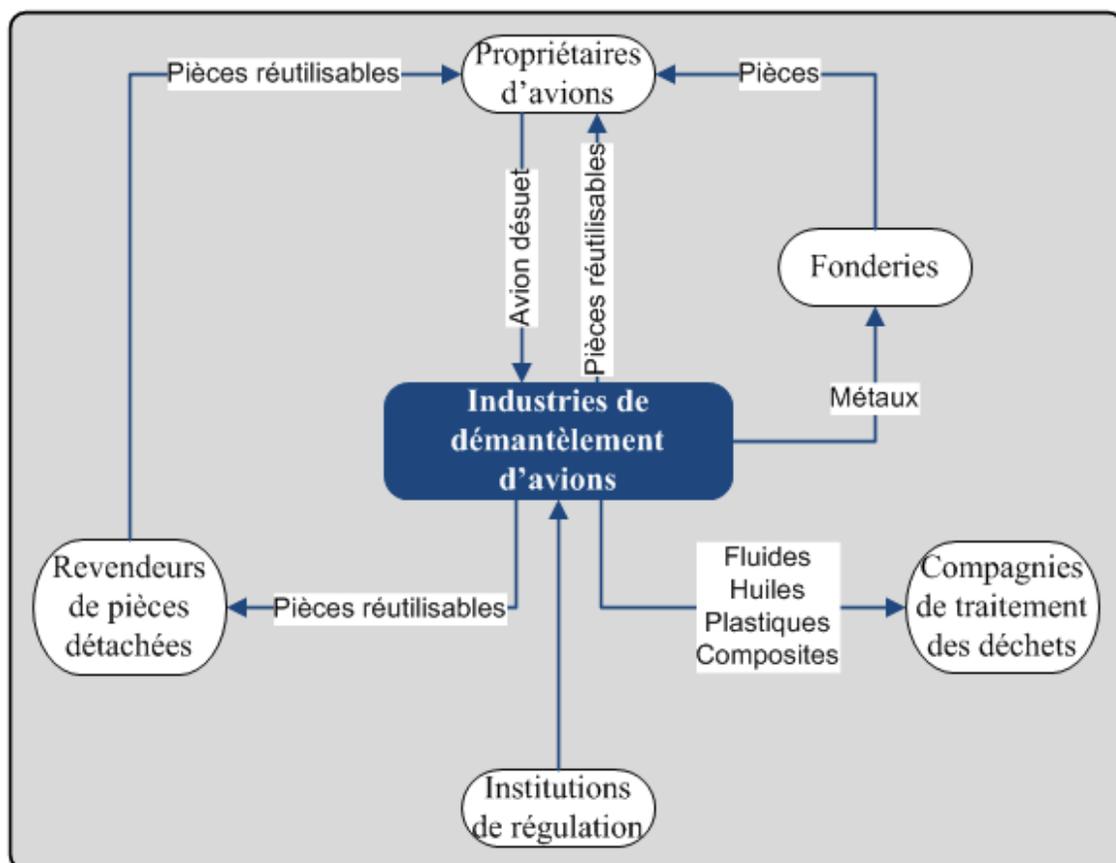
(Sources: EAA, 2004; William et al., 2007; Schlesinger, 2007)

ANNEXE E :
CARACTÉRISTIQUES DES EMBALLAGES D'ALUMINIUM

Produits	% massique d'aluminium	Autres composants
Canettes	85 à 95	- Liquide - Encre - Vernis
Aérosols	50 à 60	- Liquide - Gaz - Acier - Polymère
Tubes	50 à 70	- Encre - Vernis - Polymère - Contenu
Conserves	80 à 90	- Encre - Vernis - Matières organiques
Papier d'emballage	70 à 90	- Encre - Polymère - Papier - Vernis
Boîtes de jus	8 à 15	- Polymère - Papier - Matières organiques

Source: Herbulot, 2009a

ANNEXE F :
RÉSEAU DE CRÉATION DE VALEUR ASSOCIÉ AU
DÉMANTÈLEMENT D'AVIONS



ANNEXE G :
EMPLACEMENT DES COMPOSANTS D'UN AVION

Composants	Emplacement
Batteries/Blocs batteries	À l'avant de l'avion sous le nez
Chlorofluorocarbones (fréon)	N'est plus utilisé comme composant
Liquides hydrauliques	Parties amovibles, train d'atterrissage
Bouteilles extincteurs et cartouches	Au dessus des moteurs sur mât de liaison
Bouteilles de dioxygène portables	Au dessus des passagers dans le plafond
Générateur de dioxygène	Au dessus des passagers dans le plafond
Masques à oxygène chimique	Au dessus des passagers dans le plafond
Néons	Au dessus des passagers dans le plafond
Uranium appauvri	Ailerons, gouvernes de profondeur
Détecteurs de fumées	Intérieur de l'avion
Matériaux composites	Panneaux latéraux, nez de l'avion
Amiante	Système d'air climatisé, de refroidissement
Plastiques	Vitres, stores, revêtement intérieur
Instruments d'avioniques et système électronique de commandes de vol	Dans l'habitacle de pilotage
Parties mobiles de voilure	Ailes, empennage
Titane	Tuyaux d'échappement, poutres des ailes
Carburant et fluides	Ailes et sous l'avion
Acier	Train d'atterrissage, ressorts, arbres

ANNEXE H :
QUESTIONNAIRE FOURNI AUX ENTREPRISES DE
DÉMANTÈLEMENT AÉRONAUTIQUE

Dismantling site description

- 1- When does the site have been built or used for the first time?
- 2- What is the site's surface (m²)?
- 3- The site's floor is made of which materials?
- 4- How many aircrafts can be dismantled at the same time?
- 5- Are there available design drawings of the platform?
- 6- Does the dismantling site have a drain for fluids and does it have a slope?
- 7- Which aircraft models can be dismantled on your site?
- 8- Does your company own ISO certifications or others?

Operations

- 9- Where do dismantled aircrafts come from (part suppliers, aircraft owners)?
- 10- Does your company buy aircrafts or do aircrafts remain the owner's property?
- 11- Is there an available parking for aircrafts? If yes, what is its surface (m²)?
- 12- What are the main steps of the dismantling process, used equipments and times needed for each steps? *Fill table next page.*
- 13- What are the outputs of the dismantling process and where are they sent (name, location)?
- 14- What is the estimated quantity of each output per year or per aircraft?
- 15- Is there any other company or partners involved in the dismantling process?

Information needed

- 16- What kind of information is needed to dismantle an aircraft (documents, etc)?

Process table

Dismantling Process Steps	Equipment			Workers			Process time	
	Equipment name	Quantity Min.	Quantity Max.	Required qualifications	Quantity Min.	Quantity Max.	Min.	Max.
	-			-				
	-			-				
	-			-				

Sites web des entreprises contactées

- Tarmac Aerosave : <http://www.tarmacaerosave.aero/>
 Bartin Aero Recycling: <http://www.bartinrecycling.com/>
 Evergreen Trade Inc.: <http://www.evergreenaviation.com/>
 Aircraft End-Of-Life Solutions: <http://www.aels.nl/>
 Air Salvage International : <http://www.airsalvage.co.uk/>

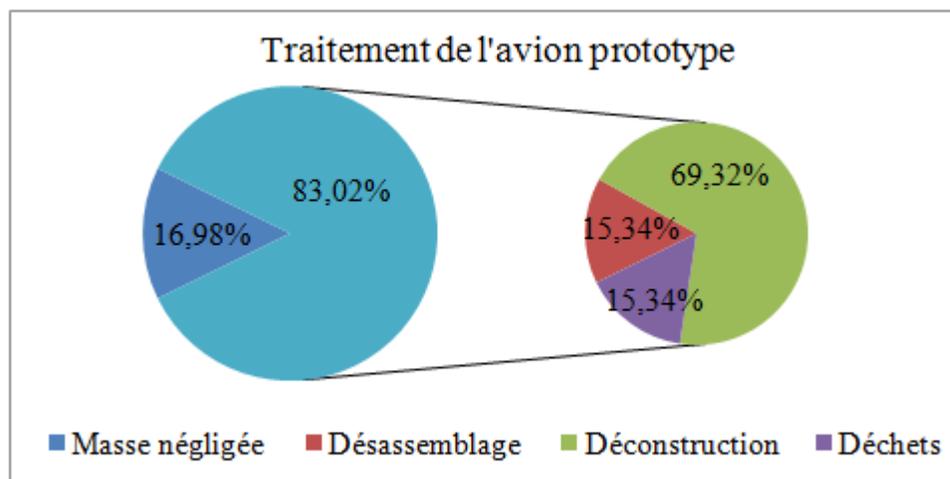
ANNEXE I : DESCRIPTION DE L'AVION PROTOTYPE DE PAMELA ET RÉSULTATS

Description de l'avion (Source : *Lourdes-Infos.com*)

Caractéristiques	Détails
Fabricant	Airbus
Modèle	A300-B4-200
Nombre de passagers	300
Moteurs	CF6-50C2R
Immatriculation	TC-FLF
Numéro de série	A0194
Année de mise en service	1982
Poids	106 t
Nombre d'heures de vol	53 489

Résultats (Source : *Pamela-Life, 2009*)

Durant l'étape de stationnement de l'avion, un total de 18 000 kg de carburant, d'eau potable et du contenu des réservoirs des toilettes est d'abord retiré de l'avion. Cette quantité n'a pas été prise en considération dans les calculs du pourcentage de valorisation ci-après.



Sur un poids total de 88 tonnes (106 t – 18 t), 13,5 tonnes ont été récupérées en pièces et en équipements lors du désassemblage (15,3 %) et 61 tonnes de matériaux ont été dirigées vers des filiales de recyclage ou de valorisation (69,3 %). Le pourcentage total de valorisation de l'avion prototype a donc été de 84,6 %. Les quinze pourcents restants ont été mis en décharge (revêtement, matériaux d'isolation et pièces diverses encrassées). Les éléments qui ont été récupérés et valorisés ont été classifiés en trois principales *catégories de valorisation* présentées dans le tableau ci-dessous. D'après le PDG de TARMAC Aerosave, Philippe Fournadet, environ 18 % de la masse totale des pièces et des équipements d'un avion peuvent être remis en circulation suite à l'étape de démontage (JWF, 2009).

Catégories	Éléments valorisables
Réutilisation sous conditions	Moteurs, générateur auxiliaire de bord, train d'atterrissage, équipements d'avionique, équipements et pièces sérialisés, parties mobiles de voilure.
Filières spécialisées de récupération basées sur la réglementation ou la technologie	Fluides (essence, huiles, liquides hydrauliques), équipements de sécurité, systèmes électroniques, pneus.
Filières spécialisées de récupération basées sur le matériau	Alliages d'aluminium, alliages de titane, acier, câbles, harnais, thermoplastiques, mousses, textiles, tapis et tissus.

Finalement, cinq *catégories de matériaux* ont été identifiées et utilisées pour le tri sélectif: (1) métalliques, (2) composites, (3) élastomères, (4) fluides/gaz et (5) divers.

Le projet Pamela a mené à l'élaboration d'une méthodologie générique de démantèlement aéronautique applicable à tous les types d'avions qui permet de réduire la quantité de matériaux mise en décharge. Une réduction entre 25 et 35 % a été réalisée à ce niveau.

ANNEXE J :
CARACTÉRISTIQUES DES ALLIAGES D'ALUMINIUM DE CORROYAGE EN
AÉRONAUTIQUE

Alliages	Limite composition chimique (%)												Masse Vol.* (kg/m ³) x10 ³
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Al	Autres (ch.)	Autres (total)	
2014	0,80		4,40	0,80	0,50					93,50	0,05	0,15	2,80
Alclad 2014	0,80		4,40	0,80	0,50					93,50	0,05	0,15	2,80
2024			4,40	0,60	1,50					93,50	0,05	0,15	2,78
Alclad 2024			4,40	0,60	1,50					93,50	0,05	0,15	2,77
2090			2,70							97,30	0,05	0,15	2,59
2124			4,40	0,60	1,50					93,50	0,05	0,15	2,78
2219			6,30	0,30					0,06	93,34	0,05	0,15	2,84
2618	0,18	1,1	2,30		1,60		1,00		0,07	93,75	0,05	0,15	2,76
5052					2,50	0,25				97,25	0,05	0,15	2,68
5456				0,80	5,10	0,12				93,98	0,05	0,15	2,66
6013	0,80		0,80	0,50	1,00					96,90	0,05	0,15	2,71
6061	0,60		0,28		1,00	0,2				97,92	0,05	0,15	2,70
7005				0,45	1,40	0,13		4,50	0,04	93,48	0,05	0,15	2,77
7049			1,60		2,40	0,16		7,70		88,14	0,05	0,15	2,84
7075			1,60		2,50	0,23		5,60		90,07	0,05	0,15	2,81
7150			2,20		2,40			6,40		89,00	0,05	0,15	2,83
7175			1,60		2,50	0,23		5,60		90,07	0,05	0,15	2,80
7178			2,00		2,80	0,23		6,80		88,17	0,05	0,15	2,83
7475			1,60		2,20	0,22		5,70		90,28	0,05	0,15	2,81
8090			1,30		0,95					97,75	0,05	0,15	2,54

* Masse volumique tirée de : *The Aluminium Association, 2004*

ANNEXE K :

PROGRAMME MATHÉMATIQUE IMPLANTÉ DANS AMPLSTUDIO

```
#SETS

set Elements; # composantes et produit de l'arbre de démantèlement
set Entity_Prod within Elements; # entités et produit
set Pieces within Elements; # pièces au derniner niveau d'une branche
set Alliages; # types d'alliage d'aluminium
set SA {z in Entity_Prod}; # ensembles des composantes d'une entité ou du produit
set AL {i in Elements}; # ensembles des types d'alliages d'une composante ou du produit

#PARAMETERS

param Q {z in Entity_Prod} = card(SA[z]); # quantité d'éléments dans une entité ou produit z
param n {i in Elements} >=1; # nombre d'éléments i dans l'arbre de démantèlement
param VA {a in Alliages} >=0; # valeur marchande de chaque type d'alliage

# poids de chaque type d'alliage dans un élément
param Poids_y {a in Alliages, y in Pieces} >=0;
param Poids_z {a in Alliages, z in Entity_Prod} = sum {k in SA[z]} (if k in Pieces then n[k]*Poids_y[a,k]) +
sum {k in SA[z]} (if k in Entity_Prod then n[k]*Poids_z[a,k]);

# volume de chaque élément
param Volume_y {y in Pieces} >=0;
param Volume_z {z in Entity_Prod} = sum {k in SA[z]} (if k in Pieces then n[k]*Volume_y[k]) +
sum {k in SA[z]} (if k in Entity_Prod then n[k]*Volume_z[k]);

# coût d'opération de découpe, tri, broyage
param CD >=0;
param CT >=0;
param CB >=0;
```

```

# valeur de l'aluminium trié
param VT {i in Elements} = sum{a in Alliages} (if i in Pieces then VA[a]*Poids_y[a,i]) +
    sum{a in Alliages} (if i in Entity_Prod then VA[a]*Poids_z[a,i]);

# valeur de l'aluminium non trié
param VM >=0;

# paramètre des éléments en aluminium homogène
param H {i in Elements} >=0, <=1 integer;

#temps d'opération découpe, tri, broyage
param TD {i in Elements} = if i in Pieces then 0 else if i in Entity_Prod then sum{k in SA[i]}1*n[k];
param TT {i in Elements} = if i in Pieces then 1*Volume_y[i] else if i in Entity_Prod then 1*Volume_z[i];
param TB {i in Elements} = if i in Pieces then 2*Volume_y[i] else if i in Entity_Prod then 2*Volume_z[i];

#VARIABLES

var D {i in Elements} binary; # découpe ou non
var T {i in Elements} binary; # tri ou non
var B {i in Elements} binary; # broyage ou non

#OBJECTIVES

maximize P: sum{i in Elements} (n[i]*T[i]*VT[i])+ sum{z in Entity_Prod, k in SA[z]}(H[k]*D[z]*VT[k])+
    VM*( sum{a in Alliages} (Poids_z[a,1]) -
        sum{i in Elements, a in Alliages} (if i in Entity_Prod then n[i]*T[i]*Poids_z[a,i])-
        sum{i in Elements, a in Alliages} (if i in Pieces then n[i]*T[i]*Poids_y[a,i])-
        sum{z in Entity_Prod, k in SA[z], a in Alliages} (if k in Entity_Prod then H[k]*D[z]*Poids_z[a,k])-
        sum{z in Entity_Prod, k in SA[z], a in Alliages} (if k in Pieces then H[k]*D[z]*Poids_y[a,k]))-
    sum{i in Elements} (n[i]*(D[i]*CD*TD[i]+B[i]*CB*TB[i]+T[i]*TT[i]*CT))+
    sum{z in Entity_Prod, k in SA[z]}(n[k]*B[z]*CB*TB[k]));

```

#CONSTRAINTS

```
subject to C1 {i in Elements}: D[i]+B[i]=1;
subject to C2 {y in Pieces}: D[y]=0;
subject to C3 {z in Entity_Prod, k in SA[z]}: B[z]<=B[k];
subject to C4 {i in Elements}: D[i]+T[i]<=1;
subject to C5 {i in Elements}: card(AL[i])>= 2*T[i];
subject to C6 {i in Elements}: B[i] >= T[i];
subject to C7 {z in Entity_Prod, k in SA[z]}: 2-(B[z]+B[k])>= T[k];
```

ANNEXE L :
RÉSULTATS DE LA RÉOLUTION DU PROGRAMME LINÉAIRE
BINAIRE – EMPENNAGE

AmplStudio Modeling System - Copyright (c) 2003-2009, Datumatic Ltd

MODEL.STATISTICS

```

Problem name           :Avion1
Pathname               :C:\Documents and Settings\Julie Viau\Mes docu
ments\BMI\Mémoire\Article démantèlement\Modèl
                       :e math\MyWorkSpace\
Model Filename         : "cout.mod"
Data Filename         : "cout.dat"
Date                  :6:14:2009
Time                  :10:10
Constraints            :57      : Nonzeros
S_Constraints         :19
Variables             :27      : Nonzeros

```

SOLUTION.RESULT

'Optimal solution found'

CPLEX 11.0.1: optimal integer solution; objective 42700
0 MIP simplex iterations
0 branch-and-bound nodes

DECISION.VARIABLES

	Variable	Activity	U bound	ReducedCost
10	'T[1]'	1	1	28900
19	'B[1]'	1	1	0
20	'B[2]'	1	1	-400
21	'B[3]'	1	1	0
22	'B[4]'	1	1	0
23	'B[5]'	1	1	0
24	'B[6]'	1	1	0
25	'B[7]'	1	1	0
26	'B[8]'	1	1	0
27	'B[9]'	1	1	0

CONSTRAINTS

	Name	Slack	Body	Dual
1	'C1[1]'	0	1	0
2	'C1[2]'	0	1	0
3	'C1[3]'	0	1	0
4	'C1[4]'	0	1	-200
5	'C1[5]'	0	1	0
6	'C1[6]'	0	1	-200
7	'C1[7]'	0	1	-200
8	'C1[8]'	0	1	-100
9	'C1[9]'	0	1	-100
10	'C2[4]'	0	0	200
11	'C2[6]'	0	0	200
12	'C2[7]'	0	0	200
13	'C2[8]'	0	0	100
14	'C2[9]'	0	0	100
15	'C3[1,2]'	0	0	0
16	'C3[1,3]'	0	0	0
17	'C3[2,4]'	0	0	0
18	'C3[2,5]'	0	0	0
19	'C3[3,6]'	0	0	0
20	'C3[3,7]'	0	0	0
21	'C3[5,8]'	0	0	0
22	'C3[5,9]'	0	0	0
23	'C4[1]'	0	1	0
24	'C4[2]'	1	0	0
25	'C4[3]'	1	0	0
26	'C4[4]'	1	0	0
27	'C4[5]'	1	0	0
28	'C4[6]'	1	0	0
29	'C4[7]'	1	0	0
30	'C4[8]'	1	0	0
31	'C4[9]'	1	0	0
32	'C5[1]'	1	-2	0
33	'C5[2]'	3	0	0
34	'C5[3]'	2	0	0
35	'C5[4]'	1	0	-1450
36	'C5[5]'	3	0	0
37	'C5[6]'	1	0	-2450
38	'C5[7]'	1	0	-700
39	'C5[8]'	1	0	-2475
40	'C5[9]'	2	0	0
41	'C6[1]'	0	0	0
42	'C6[2]'	1	1	0

```
43 'C6[3]'      1      1      0
44 'C6[4]'      1      1      0
45 'C6[5]'      1      1      0
46 'C6[6]'      1      1      0
47 'C6[7]'      1      1      0
48 'C6[8]'      1      1      0
49 'C6[9]'      1      1      0
50 'C7[1,2]'    0     -2      0
51 'C7[1,3]'    0     -2      0
52 'C7[2,4]'    0     -2      0
53 'C7[2,5]'    0     -2      0
54 'C7[3,6]'    0     -2      0
55 'C7[3,7]'    0     -2      0
56 'C7[5,8]'    0     -2      0
57 'C7[5,9]'    0     -2      0
```

END

ANNEXE M :
VARIATION DES VALEURS DES CONSTANTES
VM, C1, C2 ET C3

Variation de la valeur de VM

VM=500

Même séquence optimale et
même profit que scénario initial

'Optimal solution found'

CPLEX 11.0.1: optimal integer solution; objective 42700
 0 MIP simplex iterations
 0 branch-and-bound nodes

DECISION.VARIABLES

	Variable	Activity	U bound	ReducedCost
10	'T[1]'	1	1	36400
19	'B[1]'	1	1	0
20	'B[2]'	1	1	-400
21	'B[3]'	1	1	0
22	'B[4]'	1	1	0
23	'B[5]'	1	1	0
24	'B[6]'	1	1	0
25	'B[7]'	1	1	0
26	'B[8]'	1	1	0
27	'B[9]'	1	1	0

VM=1000

Même séquence optimale et
même profit que scénario initial

'Optimal solution found'

CPLEX 11.0.1: optimal integer solution; objective 42700
0 MIP simplex iterations
0 branch-and-bound nodes

DECISION.VARIABLES

	Variable	Activity	U bound	ReducedCost
10	'T[1]'	1	1	28900
19	'B[1]'	1	1	0
20	'B[2]'	1	1	-400
21	'B[3]'	1	1	0
22	'B[4]'	1	1	0
23	'B[5]'	1	1	0
24	'B[6]'	1	1	0
25	'B[7]'	1	1	0
26	'B[8]'	1	1	0
27	'B[9]'	1	1	0

VM=1500

Même séquence optimale et
même profit que scénario initial

'Optimal solution found'

CPLEX 11.0.1: optimal integer solution; objective 42700
0 MIP simplex iterations
0 branch-and-bound nodes

DECISION.VARIABLES

	Variable	Activity	U bound	ReducedCost
10	'T[1]'	1	1	21400
19	'B[1]'	1	1	0
20	'B[2]'	1	1	-400
21	'B[3]'	1	1	0
22	'B[4]'	1	1	0
23	'B[5]'	1	1	0
24	'B[6]'	1	1	0
25	'B[7]'	1	1	0
26	'B[8]'	1	1	0
27	'B[9]'	1	1	0

VM=2000

Même séquence optimale et
même profit que scénario initial

```
'Optimal solution found'

CPLEX 11.0.1: optimal integer solution; objective 42700
0 MIP simplex iterations
0 branch-and-bound nodes

DECISION.VARIABLES
```

	Variable	Activity	U bound	ReducedCost
10	'T[1]'	1	1	13900
19	'B[1]'	1	1	0
20	'B[2]'	1	1	-400
21	'B[3]'	1	1	0
22	'B[4]'	1	1	0
23	'B[5]'	1	1	0
24	'B[6]'	1	1	0
25	'B[7]'	1	1	0
26	'B[8]'	1	1	0
27	'B[9]'	1	1	0

VM=2500

Même séquence optimale et
même profit que scénario initial

```
'Optimal solution found'

CPLEX 11.0.1: optimal integer solution; objective 42700
0 MIP simplex iterations
0 branch-and-bound nodes

DECISION.VARIABLES
```

	Variable	Activity	U bound	ReducedCost
10	'T[1]'	1	1	6400
19	'B[1]'	1	1	0
20	'B[2]'	1	1	-400
21	'B[3]'	1	1	0
22	'B[4]'	1	1	0
23	'B[5]'	1	1	0
24	'B[6]'	1	1	0
25	'B[7]'	1	1	0
26	'B[8]'	1	1	0
27	'B[9]'	1	1	0

VM=3000

Séquence optimale différente que
scénario initial et profit supérieur

'Optimal solution found'

CPLEX 11.0.1: optimal integer solution; objective 43800
0 MIP simplex iterations
0 branch-and-bound nodes

DECISION.VARIABLES

	Variable	Activity	U bound	ReducedCost
1	'D[1]'	1	1	-300
3	'D[3]'	1	1	300
20	'B[2]'	1	1	-400
22	'B[4]'	1	1	0
23	'B[5]'	1	1	0
24	'B[6]'	1	1	0
25	'B[7]'	1	1	0
26	'B[8]'	1	1	0
27	'B[9]'	1	1	0

VM=3500

Séquence optimale différente que
VM=3000 et profit supérieur

'Optimal solution found'

CPLEX 11.0.1: optimal integer solution; objective 51300
0 MIP simplex iterations
0 branch-and-bound nodes

DECISION.VARIABLES

	Variable	Activity	U bound	ReducedCost
19	'B[1]'	1	1	0
20	'B[2]'	1	1	-400
21	'B[3]'	1	1	0
22	'B[4]'	1	1	0
23	'B[5]'	1	1	0
24	'B[6]'	1	1	0
25	'B[7]'	1	1	0
26	'B[8]'	1	1	0
27	'B[9]'	1	1	0

VM=4000

Même séquence optimale que
VM=3500 et profit supérieur

```
'Optimal solution found'

CPLEX 11.0.1: optimal integer solution; objective 58800
0 MIP simplex iterations
0 branch-and-bound nodes

DECISION.VARIABLES
```

	Variable	Activity	U bound	ReducedCost
19	'B[1]'	1	1	0
20	'B[2]'	1	1	-400
21	'B[3]'	1	1	0
22	'B[4]'	1	1	0
23	'B[5]'	1	1	0
24	'B[6]'	1	1	0
25	'B[7]'	1	1	0
26	'B[8]'	1	1	0
27	'B[9]'	1	1	0

Variation de la valeur de C1

C1=0,017 (1 min/composante)

Séquence optimale différente que
scénario initial et profit supérieur

```
'Optimal solution found'

CPLEX 11.0.1: optimal integer solution; objective 42891.5
0 MIP simplex iterations
0 branch-and-bound nodes

DECISION.VARIABLES
```

	Variable	Activity	U bound	ReducedCost
1	'D[1]'	1	1	-5.1
3	'D[3]'	1	1	6496.6
11	'T[2]'	1	1	22600
20	'B[2]'	1	1	-400
22	'B[4]'	1	1	0
23	'B[5]'	1	1	0
24	'B[6]'	1	1	0
25	'B[7]'	1	1	0
26	'B[8]'	1	1	0
27	'B[9]'	1	1	0

$C1=0,4$ (24 min/composante)

Séquence optimale différente que scénario initial et profit égal

```
'Optimal solution found'
CPLEX 11.0.1: optimal integer solution; objective 42700
0 MIP simplex iterations
0 branch-and-bound nodes
```

DECISION.VARIABLES

	Variable	Activity	U bound	ReducedCost
1	'D[1]'	1	1	-120
3	'D[3]'	1	1	6420
11	'T[2]'	1	1	22600
20	'B[2]'	1	1	-400
22	'B[4]'	1	1	0
23	'B[5]'	1	1	0
24	'B[6]'	1	1	0
25	'B[7]'	1	1	0
26	'B[8]'	1	1	0
27	'B[9]'	1	1	0

$C1=0,42$ (25 min/composante)

Même séquence optimale que scénario initial et profit égal

```
'Optimal solution found'
CPLEX 11.0.1: optimal integer solution; objective 42700
0 MIP simplex iterations
0 branch-and-bound nodes
```

DECISION.VARIABLES

	Variable	Activity	U bound	ReducedCost
10	'T[1]'	1	1	28900
19	'B[1]'	1	1	0
20	'B[2]'	1	1	-400
21	'B[3]'	1	1	0
22	'B[4]'	1	1	0
23	'B[5]'	1	1	0
24	'B[6]'	1	1	0
25	'B[7]'	1	1	0
26	'B[8]'	1	1	0
27	'B[9]'	1	1	0

$C1 = 60$ (60 h/composante)

Même séquence optimale que
scénario initial et profit égal

```
'Optimal solution found'
CPLEX 11.0.1: optimal integer solution; objective 42700
0 MIP simplex iterations
0 branch-and-bound nodes
```

DECISION.VARIABLES

	Variable	Activity	U bound	ReducedCost
10	'T[1]'	1	1	28900
19	'B[1]'	1	1	0
20	'B[2]'	1	1	-400
21	'B[3]'	1	1	0
22	'B[4]'	1	1	0
23	'B[5]'	1	1	0
24	'B[6]'	1	1	0
25	'B[7]'	1	1	0
26	'B[8]'	1	1	0
27	'B[9]'	1	1	0

Variation de la valeur de C2

$C2 = 0,017$ (1 min/m³)

Même séquence optimale que
scénario initial et profit supérieur

```
'Optimal solution found'
CPLEX 11.0.1: optimal integer solution; objective 43889.799999999996
0 MIP simplex iterations
0 branch-and-bound nodes
```

DECISION.VARIABLES

	Variable	Activity	U bound	ReducedCost
10	'T[1]'	1	1	28900
19	'B[1]'	1	1	0
20	'B[2]'	1	1	-3.4
21	'B[3]'	1	1	0
22	'B[4]'	1	1	0
23	'B[5]'	1	1	0
24	'B[6]'	1	1	0
25	'B[7]'	1	1	0
26	'B[8]'	1	1	0
27	'B[9]'	1	1	0

$C2=1$ (1 h/m^3)

Même séquence optimale que
scénario initial et profit supérieur

```
'Optimal solution found'
CPLEX 11.0.1: optimal integer solution; objective 43300
0 MIP simplex iterations
0 branch-and-bound nodes
```

DECISION.VARIABLES

	Variable	Activity	U bound	ReducedCost
10	'T[1]'	1	1	28900
19	'B[1]'	1	1	0
20	'B[2]'	1	1	-200
21	'B[3]'	1	1	0
22	'B[4]'	1	1	0
23	'B[5]'	1	1	0
24	'B[6]'	1	1	0
25	'B[7]'	1	1	0
26	'B[8]'	1	1	0
27	'B[9]'	1	1	0

$C2=59$ (59 h/m^3)

Même séquence optimale que
scénario initial et profit inférieur

```
'Optimal solution found'
CPLEX 11.0.1: optimal integer solution; objective 8500
0 MIP simplex iterations
0 branch-and-bound nodes
```

DECISION.VARIABLES

	Variable	Activity	U bound	ReducedCost
10	'T[1]'	1	1	28900
19	'B[1]'	1	1	0
20	'B[2]'	1	1	-11800
21	'B[3]'	1	1	0
22	'B[4]'	1	1	0
23	'B[5]'	1	1	0
24	'B[6]'	1	1	0
25	'B[7]'	1	1	0
26	'B[8]'	1	1	0
27	'B[9]'	1	1	0

C2=60 (60 h/m³)

Séquence optimale différente que scénario initial et profit inférieur à C2=59

```
'Optimal solution found'
```

CPLEX 11.0.1: optimal integer solution; objective 8000
 0 MIP simplex iterations
 0 branch-and-bound nodes

DECISION.VARIABLES

	Variable	Activity	U bound	ReducedCost
1	'D[1]'	1	1	-300
2	'D[2]'	1	1	2600
3	'D[3]'	1	1	6300
14	'T[5]'	1	1	8400
22	'B[4]'	1	1	0
23	'B[5]'	1	1	0
24	'B[6]'	1	1	0
25	'B[7]'	1	1	0
26	'B[8]'	1	1	0
27	'B[9]'	1	1	0

C2=80 (80 h/m³)

Même séquence optimale que C2=60 et profit nul

```
'Optimal solution found'
```

CPLEX 11.0.1: optimal integer solution; objective 0
 0 MIP simplex iterations
 0 branch-and-bound nodes

DECISION.VARIABLES

	Variable	Activity	U bound	ReducedCost
1	'D[1]'	1	1	-300
2	'D[2]'	1	1	2600
3	'D[3]'	1	1	6300
14	'T[5]'	1	1	8400
22	'B[4]'	1	1	0
23	'B[5]'	1	1	0
24	'B[6]'	1	1	0
25	'B[7]'	1	1	0
26	'B[8]'	1	1	0
27	'B[9]'	1	1	0

$C2=81$ (81 h/m^3)

Même séquence optimale que
C2=60 et profit négatif (perte)

```
'Optimal solution found'
CPLEX 11.0.1: optimal integer solution; objective -400
0 MIP simplex iterations
0 branch-and-bound nodes
```

DECISION.VARIABLES

	Variable	Activity	U bound	ReducedCost
1	'D[1]'	1	1	-300
2	'D[2]'	1	1	2600
3	'D[3]'	1	1	6300
14	'T[5]'	1	1	8400
22	'B[4]'	1	1	0
23	'B[5]'	1	1	0
24	'B[6]'	1	1	0
25	'B[7]'	1	1	0
26	'B[8]'	1	1	0
27	'B[9]'	1	1	0

$C2=1000$ (1000 h/m^3)

Même séquence optimale que
C2=60 et perte supérieure

```
'Optimal solution found'
CPLEX 11.0.1: optimal integer solution; objective -368000
0 MIP simplex iterations
0 branch-and-bound nodes
```

DECISION.VARIABLES

	Variable	Activity	U bound	ReducedCost
1	'D[1]'	1	1	-300
2	'D[2]'	1	1	2600
3	'D[3]'	1	1	6300
14	'T[5]'	1	1	8400
22	'B[4]'	1	1	0
23	'B[5]'	1	1	0
24	'B[6]'	1	1	0
25	'B[7]'	1	1	0
26	'B[8]'	1	1	0
27	'B[9]'	1	1	0

Variation de la valeur de C3

$C3=0,017$ (1 min/m^3)

Même séquence optimale que scénario initial et profit supérieur

```
'Optimal solution found'
CPLEX 11.0.1: optimal integer solution; objective 43289.8
0 MIP simplex iterations
0 branch-and-bound nodes
```

DECISION.VARIABLES

	Variable	Activity	U bound	ReducedCost
10	'T[1]'	1	1	29489.8
19	'B[1]'	1	1	0
20	'B[2]'	1	1	-400
21	'B[3]'	1	1	0
22	'B[4]'	1	1	0
23	'B[5]'	1	1	0
24	'B[6]'	1	1	0
25	'B[7]'	1	1	0
26	'B[8]'	1	1	0
27	'B[9]'	1	1	0

$C3=0,5$ ($0,5 \text{ h/m}^3$)

Même séquence optimale que scénario initial et profit supérieur

```
'Optimal solution found'
CPLEX 11.0.1: optimal integer solution; objective 43000
0 MIP simplex iterations
0 branch-and-bound nodes
```

DECISION.VARIABLES

	Variable	Activity	U bound	ReducedCost
10	'T[1]'	1	1	29200
19	'B[1]'	1	1	0
20	'B[2]'	1	1	-400
21	'B[3]'	1	1	0
22	'B[4]'	1	1	0
23	'B[5]'	1	1	0
24	'B[6]'	1	1	0
25	'B[7]'	1	1	0
26	'B[8]'	1	1	0
27	'B[9]'	1	1	0

$C3=2$ (2 h/m^3)

Même séquence optimale que
scénario initial et profit inférieur

```
'Optimal solution found'
```

CPLEX 11.0.1: optimal integer solution; objective 42100
0 MIP simplex iterations
0 branch-and-bound nodes

DECISION.VARIABLES

	Variable	Activity	U bound	ReducedCost
10	'T[1]'	1	1	28300
19	'B[1]'	1	1	0
20	'B[2]'	1	1	-400
21	'B[3]'	1	1	0
22	'B[4]'	1	1	0
23	'B[5]'	1	1	0
24	'B[6]'	1	1	0
25	'B[7]'	1	1	0
26	'B[8]'	1	1	0
27	'B[9]'	1	1	0

$C3=2,5$ ($2,5 \text{ h/m}^3$)

Séquence optimale différente que
scénario initial et profit inférieur

```
'Optimal solution found'
```

CPLEX 11.0.1: optimal integer solution; objective 41800
0 MIP simplex iterations
0 branch-and-bound nodes

DECISION.VARIABLES

	Variable	Activity	U bound	ReducedCost
1	'D[1]'	1	1	-300
3	'D[3]'	1	1	6300
11	'T[2]'	1	1	22000
20	'B[2]'	1	1	-400
22	'B[4]'	1	1	0
23	'B[5]'	1	1	0
24	'B[6]'	1	1	0
25	'B[7]'	1	1	0
26	'B[8]'	1	1	0
27	'B[9]'	1	1	0

C3=33 (33 h/m³)

Même séquence optimale que
C3=2,5 et profit inférieur

```
'Optimal solution found'
```

CPLEX 11.0.1: optimal integer solution; objective 29600
0 MIP simplex iterations
0 branch-and-bound nodes

DECISION.VARIABLES

	Variable	Activity	U bound	ReducedCost
1	'D[1]'	1	1	-300
3	'D[3]'	1	1	6300
11	'T[2]'	1	1	9800
20	'B[2]'	1	1	-400
22	'B[4]'	1	1	0
23	'B[5]'	1	1	0
24	'B[6]'	1	1	0
25	'B[7]'	1	1	0
26	'B[8]'	1	1	0
27	'B[9]'	1	1	0

C3=34 (34 h/m³)

Séquence optimale différente que
C3=33 et profit inférieur

```
'Optimal solution found'
```

CPLEX 11.0.1: optimal integer solution; objective 29400
0 MIP simplex iterations
0 branch-and-bound nodes

DECISION.VARIABLES

	Variable	Activity	U bound	ReducedCost
1	'D[1]'	1	1	-300
2	'D[2]'	1	1	2600
3	'D[3]'	1	1	6300
5	'D[5]'	1	1	4800
18	'T[9]'	1	1	1800
22	'B[4]'	1	1	0
24	'B[6]'	1	1	0
25	'B[7]'	1	1	0
26	'B[8]'	1	1	0
27	'B[9]'	1	1	0

C3=69 (69 h/m³)

Même séquence optimale que
C3=34 et profit inférieur

```
'Optimal solution found'
CPLEX 11.0.1: optimal integer solution; objective 27650
0 MIP simplex iterations
0 branch-and-bound nodes

DECISION.VARIABLES
```

	Variable	Activity	U bound	ReducedCost
1	'D[1]'	1	1	-300
2	'D[2]'	1	1	2600
3	'D[3]'	1	1	6300
5	'D[5]'	1	1	4800
18	'T[9]'	1	1	50
22	'B[4]'	1	1	0
24	'B[6]'	1	1	0
25	'B[7]'	1	1	0
26	'B[8]'	1	1	0
27	'B[9]'	1	1	0

C3=70 (70 h/m³)

Séquence optimale différente que
C3=69 et profit inférieur

```
'Optimal solution found'
CPLEX 11.0.1: optimal integer solution; objective 27600
0 MIP simplex iterations
0 branch-and-bound nodes

DECISION.VARIABLES
```

	Variable	Activity	U bound	ReducedCost
1	'D[1]'	1	1	-300
2	'D[2]'	1	1	2600
3	'D[3]'	1	1	6300
5	'D[5]'	1	1	4800
22	'B[4]'	1	1	0
24	'B[6]'	1	1	0
25	'B[7]'	1	1	0
26	'B[8]'	1	1	0
27	'B[9]'	1	1	0

C3=1000 (1000 h/m³)

Même séquence optimale et même profit que C3=70

'Optimal solution found'

CPLEX 11.0.1: optimal integer solution; objective 27600
0 MIP simplex iterations
0 branch-and-bound nodes

DECISION.VARIABLES

	Variable	Activity	U bound	ReducedCost
1	'D[1]'	1	1	-300
2	'D[2]'	1	1	2600
3	'D[3]'	1	1	6300
5	'D[5]'	1	1	4800
22	'B[4]'	1	1	0
24	'B[6]'	1	1	0
25	'B[7]'	1	1	0
26	'B[8]'	1	1	0
27	'B[9]'	1	1	0

ANNEXE N : VARIATION DES TAUX HORAIRES CD, CB ET CT

Variation de la valeur de CD

CD=1 (1 \$/h)

Séquence optimale différente que scénario initial et profit supérieur

```
'Optimal solution found'
```

CPLEX 11.0.1: optimal integer solution; objective 42895
0 MIP simplex iterations
0 branch-and-bound nodes

DECISION.VARIABLES

	Variable	Activity	U bound	ReducedCost
1	'D[1]'	1	1	-3
3	'D[3]'	1	1	6498
11	'T[2]'	1	1	22600
20	'B[2]'	1	1	-400
22	'B[4]'	1	1	0
23	'B[5]'	1	1	0
24	'B[6]'	1	1	0
25	'B[7]'	1	1	0
26	'B[8]'	1	1	0
27	'B[9]'	1	1	0

CD=40 (40 \$/h)

Même séquence optimale que CD=1 et profit égal à celui du scénario initial

```
'Optimal solution found'
```

CPLEX 11.0.1: optimal integer solution; objective 42700
 0 MIP simplex iterations
 0 branch-and-bound nodes

DECISION.VARIABLES

	Variable	Activity	U bound	ReducedCost
1	'D[1]'	1	1	-120
3	'D[3]'	1	1	6420
11	'T[2]'	1	1	22600
20	'B[2]'	1	1	-400
22	'B[4]'	1	1	0
23	'B[5]'	1	1	0
24	'B[6]'	1	1	0
25	'B[7]'	1	1	0
26	'B[8]'	1	1	0
27	'B[9]'	1	1	0

CD=41 (41 \$/h)

Même séquence optimale et même profit que scénario initial

```
'Optimal solution found'
```

CPLEX 11.0.1: optimal integer solution; objective 42700
 0 MIP simplex iterations
 0 branch-and-bound nodes

DECISION.VARIABLES

	Variable	Activity	U bound	ReducedCost
10	'T[1]'	1	1	28900
19	'B[1]'	1	1	0
20	'B[2]'	1	1	-400
21	'B[3]'	1	1	0
22	'B[4]'	1	1	0
23	'B[5]'	1	1	0
24	'B[6]'	1	1	0
25	'B[7]'	1	1	0
26	'B[8]'	1	1	0
27	'B[9]'	1	1	0

CD=1000 (1000 \$/h)

Même séquence optimale et même profit que scénario initial

```
CPLEX 11.0.1: optimal integer solution; objective 42700
0 MIP simplex iterations
0 branch-and-bound nodes
```

DECISION.VARIABLES

	Variable	Activity	U bound	ReducedCost
10	'T[1]'	1	1	28900
19	'B[1]'	1	1	0
20	'B[2]'	1	1	-400
21	'B[3]'	1	1	0
22	'B[4]'	1	1	0
23	'B[5]'	1	1	0
24	'B[6]'	1	1	0
25	'B[7]'	1	1	0
26	'B[8]'	1	1	0
27	'B[9]'	1	1	0

Variation de la valeur de CB

CB= 1 (1 \$/h)

Même séquence optimale que scénario initial et profit supérieur

```
CPLEX 11.0.1: optimal integer solution; objective 43888
0 MIP simplex iterations
0 branch-and-bound nodes
```

DECISION.VARIABLES

	Variable	Activity	U bound	ReducedCost
10	'T[1]'	1	1	28900
19	'B[1]'	1	1	0
20	'B[2]'	1	1	-4
21	'B[3]'	1	1	0
22	'B[4]'	1	1	0
23	'B[5]'	1	1	0
24	'B[6]'	1	1	0
25	'B[7]'	1	1	0
26	'B[8]'	1	1	0
27	'B[9]'	1	1	0

CB= 1000 (1000 \$/h)

Même séquence optimale que
scénario initial et profit inférieur

```
'Optimal solution found'
```

CPLEX 11.0.1: optimal integer solution; objective 31900
0 MIP simplex iterations
0 branch-and-bound nodes

DECISION.VARIABLES

	Variable	Activity	U bound	ReducedCost
10	'T[1]'	1	1	28900
19	'B[1]'	1	1	0
20	'B[2]'	1	1	-4000
21	'B[3]'	1	1	0
22	'B[4]'	1	1	0
23	'B[5]'	1	1	0
24	'B[6]'	1	1	0
25	'B[7]'	1	1	0
26	'B[8]'	1	1	0
27	'B[9]'	1	1	0

CB= 2974 (2974 \$/h)

Même séquence optimale que
scénario initial et profit inférieur

```
'Optimal solution found'
```

CPLEX 11.0.1: optimal integer solution; objective 8212
0 MIP simplex iterations
0 branch-and-bound nodes

DECISION.VARIABLES

	Variable	Activity	U bound	ReducedCost
10	'T[1]'	1	1	28900
19	'B[1]'	1	1	0
20	'B[2]'	1	1	-11896
21	'B[3]'	1	1	0
22	'B[4]'	1	1	0
23	'B[5]'	1	1	0
24	'B[6]'	1	1	0
25	'B[7]'	1	1	0
26	'B[8]'	1	1	0
27	'B[9]'	1	1	0

CB= 2975 (2975 \$/h)

Séquence optimale différente que scénario initial et profit inférieur à CB=2975

```
'Optimal solution found'
```

CPLEX 11.0.1: optimal integer solution; objective 8200
 0 MIP simplex iterations
 0 branch-and-bound nodes

DECISION.VARIABLES

	Variable	Activity	U bound	ReducedCost
1	'D[1]'	1	1	-300
2	'D[2]'	1	1	2600
3	'D[3]'	1	1	6300
14	'T[5]'	1	1	8400
22	'B[4]'	1	1	0
23	'B[5]'	1	1	0
24	'B[6]'	1	1	0
25	'B[7]'	1	1	0
26	'B[8]'	1	1	0
27	'B[9]'	1	1	0

CB= 4000 (4000 \$/h)

Même séquence optimale que CB=2975 et profit nul

```
'Optimal solution found'
```

CPLEX 11.0.1: optimal integer solution; objective 0
 0 MIP simplex iterations
 0 branch-and-bound nodes

DECISION.VARIABLES

	Variable	Activity	U bound	ReducedCost
1	'D[1]'	1	1	-300
2	'D[2]'	1	1	2600
3	'D[3]'	1	1	6300
14	'T[5]'	1	1	8400
22	'B[4]'	1	1	0
23	'B[5]'	1	1	0
24	'B[6]'	1	1	0
25	'B[7]'	1	1	0
26	'B[8]'	1	1	0
27	'B[9]'	1	1	0

CB= 6000 (6000 \$/h)

Même séquence optimale que
CB=2975 et profit négatif (perte)

```
CPLEX 11.0.1: optimal integer solution; objective -16000
0 MIP simplex iterations
0 branch-and-bound nodes
```

DECISION.VARIABLES

	Variable	Activity	U bound	ReducedCost
1	'D[1]'	1	1	-300
2	'D[2]'	1	1	2600
3	'D[3]'	1	1	6300
14	'T[5]'	1	1	8400
22	'B[4]'	1	1	0
23	'B[5]'	1	1	0
24	'B[6]'	1	1	0
25	'B[7]'	1	1	0
26	'B[8]'	1	1	0
27	'B[9]'	1	1	0

Variation de la valeur de CT

CT=1 (1 \$/h)

Même séquence optimale que
scénario initial et profit supérieur

```
CPLEX 11.0.1: optimal integer solution; objective 43294
0 MIP simplex iterations
0 branch-and-bound nodes
```

DECISION.VARIABLES

	Variable	Activity	U bound	ReducedCost
10	'T[1]'	1	1	29494
19	'B[1]'	1	1	0
20	'B[2]'	1	1	-400
21	'B[3]'	1	1	0
22	'B[4]'	1	1	0
23	'B[5]'	1	1	0
24	'B[6]'	1	1	0
25	'B[7]'	1	1	0
26	'B[8]'	1	1	0
27	'B[9]'	1	1	0

CT= 249 (249 \$/h)

Même séquence optimale que
scénario initial et profit inférieur

```
'Optimal solution found'
```

CPLEX 11.0.1: optimal integer solution; objective 41806
0 MIP simplex iterations
0 branch-and-bound nodes

DECISION.VARIABLES

	Variable	Activity	U bound	ReducedCost
10	'T[1]'	1	1	28006
19	'B[1]'	1	1	0
20	'B[2]'	1	1	-400
21	'B[3]'	1	1	0
22	'B[4]'	1	1	0
23	'B[5]'	1	1	0
24	'B[6]'	1	1	0
25	'B[7]'	1	1	0
26	'B[8]'	1	1	0
27	'B[9]'	1	1	0

CT= 250 (250 \$/h)

Séquence optimale différente que
scénario initial et profit inférieur

```
'Optimal solution found'
```

CPLEX 11.0.1: optimal integer solution; objective 41800
0 MIP simplex iterations
0 branch-and-bound nodes

DECISION.VARIABLES

	Variable	Activity	U bound	ReducedCost
1	'D[1]'	1	1	-300
3	'D[3]'	1	1	6300
11	'T[2]'	1	1	22000
20	'B[2]'	1	1	-400
22	'B[4]'	1	1	0
23	'B[5]'	1	1	0
24	'B[6]'	1	1	0
25	'B[7]'	1	1	0
26	'B[8]'	1	1	0
27	'B[9]'	1	1	0

CT=3342 (3342 \$/h)

Même séquence optimale que
CT=250 et profit inférieur

```
'Optimal solution found'
```

CPLEX 11.0.1: optimal integer solution; objective 29432
0 MIP simplex iterations
0 branch-and-bound nodes

DECISION.VARIABLES

	Variable	Activity	U bound	ReducedCost
1	'D[1]'	1	1	-300
3	'D[3]'	1	1	6300
11	'T[2]'	1	1	9632
20	'B[2]'	1	1	-400
22	'B[4]'	1	1	0
23	'B[5]'	1	1	0
24	'B[6]'	1	1	0
25	'B[7]'	1	1	0
26	'B[8]'	1	1	0
27	'B[9]'	1	1	0

CT=3343 (3343 \$/h)

Séquence optimale différente que
CT=3342 et profit inférieur

```
'Optimal solution found'
```

CPLEX 11.0.1: optimal integer solution; objective 29428.5
0 MIP simplex iterations
0 branch-and-bound nodes

DECISION.VARIABLES

	Variable	Activity	U bound	ReducedCost
1	'D[1]'	1	1	-300
2	'D[2]'	1	1	2600
3	'D[3]'	1	1	6300
5	'D[5]'	1	1	4800
18	'T[9]'	1	1	1828.5
22	'B[4]'	1	1	0
24	'B[6]'	1	1	0
25	'B[7]'	1	1	0
26	'B[8]'	1	1	0
27	'B[9]'	1	1	0

CT=6999 (6999 \$/h)

Même séquence optimale que
CT=3343 et profit inférieur

```
'Optimal solution found'
CPLEX 11.0.1: optimal integer solution; objective 27600.5
0 MIP simplex iterations
0 branch-and-bound nodes

DECISION.VARIABLES
```

	Variable	Activity	U bound	ReducedCost
1	'D[1]'	1	1	-300
2	'D[2]'	1	1	2600
3	'D[3]'	1	1	6300
5	'D[5]'	1	1	4800
18	'T[9]'	1	1	0.5
22	'B[4]'	1	1	0
24	'B[6]'	1	1	0
25	'B[7]'	1	1	0
26	'B[8]'	1	1	0
27	'B[9]'	1	1	0

CT=7000 (7000 \$/h)

Séquence optimale différente que
CT=6999 et profit inférieur

```
'Optimal solution found'
CPLEX 11.0.1: optimal integer solution; objective 27600
0 MIP simplex iterations
0 branch-and-bound nodes

DECISION.VARIABLES
```

	Variable	Activity	U bound	ReducedCost
1	'D[1]'	1	1	-300
2	'D[2]'	1	1	2600
3	'D[3]'	1	1	6300
5	'D[5]'	1	1	4800
22	'B[4]'	1	1	0
24	'B[6]'	1	1	0
25	'B[7]'	1	1	0
26	'B[8]'	1	1	0
27	'B[9]'	1	1	0

CT=10 000 (10 000 \$/h)

Même séquence optimale et même profit que CT=7000

'Optimal solution found'

CPLEX 11.0.1: optimal integer solution; objective 27600
 0 MIP simplex iterations
 0 branch-and-bound nodes

DECISION.VARIABLES

	Variable	Activity	U bound	ReducedCost
1	'D[1]'	1	1	-300
2	'D[2]'	1	1	2600
3	'D[3]'	1	1	6300
5	'D[5]'	1	1	4800
22	'B[4]'	1	1	0
24	'B[6]'	1	1	0
25	'B[7]'	1	1	0
26	'B[8]'	1	1	0
27	'B[9]'	1	1	0

ANNEXE O :
ARTICLE – AIRFRAME DISMANTLING OPTIMIZATION FOR
ALUMINUM VALORIZATION

Airframe dismantling optimization for aerospace aluminum valorization

Julie L. Viau
julie.latremouille-viau@polymtl.ca

Pierre Baptiste
pierre.baptiste@polymtl.ca

Christian Mascle
christian.mascle@polymtl.ca

École Polytechnique de Montréal
Department of mathematics and industrial engineering
2900, boul. Édouard-Montpetit, Montreal

Abstract – Seeking the most cost-effective process, dismantlers must continuously make decisions while they part and shear out a plane. The mathematical model presented optimizes the profitability of aircraft dismantling process by determining which airframe entities must be sheared and sorted prior to shred its components or which entities must be directly shredded. The model also identifies which shredded components should be sorted in order to upgrade recovered materials composition. Until now, disassembly sequences generation and disassembly planning methods have been elaborated based on assembly connection types and generic mathematical models have been published. Most of the time, these approaches are time consuming and require efforts to be adapted to a specific product. The model proposed here is aircraft-oriented and is not only based on assembly connection types and fasteners classification which are considered as being too restrictive. Knowing that an airplane is made of about 60 % of aluminum alloys and that aluminum recycling could considerably reduce the aerospace industry's ecological footprint, the model focuses on aircraft aluminum recovery.

Keywords – Aircraft dismantling, linear programming, aluminum recycling, product value recovery

I. INTRODUCTION

Aircraft retirement occurs when reparations or upgrades are too expensive [1]. In this case, aircraft dismantling can be an interesting option knowing that the aircraft design, its age, state and location, material collecting costs, infrastructure availability, recovery methods and consumer demand for used or remanufactured components have an important influence on the overall profitability. According to the president of Aircraft End-of-Life Solutions (AELS), more than 90 % of an aircraft can be reused, remanufactured or recycled [2]. Components and materials valorization rarely reach more than 60 weight percents of an airplane because of the lack of infrastructures and technologies inefficiency. Therefore, aircraft owners often prefer to warehouse obsolete airplanes or to dump them near an airport or in the desert. These unsecured storages can have important environmental impact such as soil contamination. Boeing has determined that about 7,200 civil airplanes will be retired in the next 20 years without considering military equipment. Actually, about 300 aircrafts of a hundred passengers' capacity are dismantled each year [2] in order to

reuse non obsolete components, to recover them and to recycle materials. The metallic airframe is a mix of aluminum, zinc and magnesium alloys [1]. According to Bartin Recycling Group, a specialized aircraft-dismantling company, the metallic composition of an airplane contains between 65 and 75 % of aluminum alloys, 10 % of steel, 3 % of titanium and 2 % of copper [3]. The remainder is made of wood, isolating materials, plastics, glass and rubber. The primary aluminum production from bauxite is an energy-consuming process which needs important quantities of non-renewable natural resources. In addition, this process generates air and water emissions, byproducts and solid wastes. Each kilogram of aluminum produced from bauxite release 3.5 kg eqCO₂ in the atmosphere [4]. Aluminum recycling provides many advantages compared to primary production because it reduces material consumption as energy, water, land occupation, waste disposal, and air and water emissions. The secondary aluminum production (aluminum recycling) requires between 80 and 95 % less energy, produces 90 % less wastes and reduces 90 % of air emissions (CO₂, fluoride, SO₂) by ton of aluminum produced compared to primary production [5]. According to London Metal Exchange (LME) historical data, secondary aluminum costs less than primary aluminum which is due to lower production costs. This observation applies only to basic aluminum alloys that are found in large amounts on the market and that are easily recycled because of their availability and large demand. It is perhaps more difficult to recycle specialized aluminum alloys due to their small demand and their mechanical properties which require more complex production processes. Aerospace aluminum alloys are in majority wrought alloys which have a lower tolerance to impurities than cast alloys. The most used alloys are specialized alloys from series 2xxx and 7xxx. The nominal composition of these alloys contains high quantities of copper and zinc which explain their highest market value compared to other series knowing that these alloying elements are in much lower proportions in other wrought alloys.

According to reference [6], three options should be taken into consideration in aircraft dismantling strategies: reuse aluminum alloys from recycled aircrafts (1) in new aircrafts (closed loop), (2) in non-aircraft applications or (3) in aluminum castings (open loop). Even though cost-effective

aircraft alloys recycling is complex because of high alloying element concentrations and the low level of impurities required, it is important to evaluate if the amount of aircrafts retired each year, their aluminum composition, the technology available and operation costs associated to the aircraft dismantling process can provide an economic source of recycled aluminum for the aerospace industry. In this paper, an algorithm is proposed in order to determine which aircraft dismantling sequence provides the most cost-effective aluminum value recovery for a specific aircraft given the three options mentioned above. A literature review is first presented in which an overview of research issues in the disassembly field is made, followed by the actual aerospace aluminum recirculation flow based on two well-known aircraft dismantling sites activities. Then, an airframe dismantling optimization method based on a mathematical optimization model is developed and tested in order to optimize aluminum valorization based on operation costs and aluminum market value.

II. LITERATURE REVIEW

Nowadays, the implementation of environmental legislations, increasing disposal fees, social responsibility, corporate imaging, environmental growing concern, production costs reduction and the awareness of conserving energy and material resources are encouraging original equipment manufacturers (OEM's) to ensure an environmental friendly end-of-life treatment of their products according to the extended producer responsibility principle (EPR) [7, 8, 9, 10]. This situation explains the growing interest for the dismantling and disassembly fields.

A. Research issues in the disassembly/dismantling field

According to reference [11, 12], distinct levels of detail are used in dismantling planning (DP). The strategic (long-term) level focuses on reverse logistics: network planning and facility location planning. The tactical (mid-term) level is the field of disassembly planning and scheduling: master dismantling schedule and capacity planning. Finally, the operational (short-term) level is related to the detailed dismantling scheduling (DDS): shop floor control and task planning. Disassembly sequences generation and optimization are needed prior to disassembly planning. Disassembly sequences are network representations of admissible subsequent disassembly operations. Feasible sequences depend on the type of product to be dismantled, the techniques applicable, the objective of the dismantling effort [11] and the knowledge of connection types and preceding relations among disassembly actions. In many cases, incomplete disassembly can provide a most cost-effective option than complete disassembly. Technical constraints can also force an incomplete disassembly [13]. Disassembly sequences can be of two different natures: selective or partial. Selective disassembly emphasis on a particular component and optimizes a disassembly sequence for this specific component as mentioned by Wang et al. (2003) [24]. Instead of focusing

on a particular component, partial disassembly determines the best disassembly sequence within feasibility limits, i.e. the best sequence and the best end-node of a whole product. Tripathi et al. (2009) have implemented this approach [25]. References [10, 12] present an overview of different dismantling sequences modeling strategies. Takeyama et al. (1983) assumed that the disassembly sequence of a product was the reverse of its assembly sequence [14]. Knowing that some assembly processes are not completely reversible, this approach can't be applied for any product. Bourjault (1984) introduced the generation of all assembly/disassembly sequences using connection diagram, component-fasteners graph or direct graph elaborated on the study of connection types and fasteners classification. According to preceding relations among disassembly actions, disassembly choice diagrams can then be generated [15]. This approach has been used by Zhang, H. C. and Kuo, T. C. (1997) to generate a graph-based disassembly sequence planning for end-of-life (EOL) product recycling and they also introduced the use of disassembly precedence matrices [16]. In the case of complex assemblies, the amount of disassembly choice diagrams becomes hardly manageable. Furthermore, the model can't be used when more than one component or subassembly can be disassembled simultaneously when *one-to-many* disassembly techniques are available. A near optimal disassembly sequences approach has been proposed in order to solve this problem [17]. De Fazio and Whitney (1987) elaborated a single disassembly graph based on connectivity states and a graph based on corresponding subassembly states also called diamond diagram [18]. Bourjault et al. (1987) have also proposed the use of Petri nets in disassembling sequences [19] when these sequences are already known. AND/OR graph representation have been introduced by Homen de Mello and Sanderson (1990) which is a compact representation of all feasible assembly sequences and can provide a selection tool for the optimal assembly plan [20]. In 1991, they adapted this strategy for the generation and selection of disassembly sequences [21]. Here again, the large amount of possibilities can complicate the implementation of the proposed strategy particularly if incomplete dismantling sequences must be included. To avoid this disadvantage, Lambert (2000) proposed a reduced disassembly graph [22]. A component-oriented approach integrating assembly and disassembly in a computer aided system which includes direction, physical properties, connections and fasteners analysis has also been elaborated by Mascle and Balasou (2001) [23]. Product-oriented approach has been proposed too for the automatic analysis of detachability of subassemblies from CAD-files or drawings, but the size of problems grows exponentially with the amount of components which requires the addition of geometric and technical constraints.

Once the set of dismantling sequences is identified, mathematical programming methods (MP) such as Linear Programming (LP), Mixed Integer Programming (MIP), Dynamic Linear Programming (DLP) and the shortest path algorithm can provide a complete or incomplete optimal disassembly sequence based on costs and revenues or any

other objective: minimum dismantling time, maximum recycling ratio, minimum environmental impact, etc. Krikke et al. (1998) have developed a DLP to optimize a recovery plan and its disassembly sequence by considering technical, commercial and ecological aspects [26]. Willems et al. (2004) have presented a LP model based on costs and revenues related to a particular network [27]. Artificial intelligence methods have also been implemented as genetic algorithm (GA), ant colony algorithm, neural networks and fuzzy logic but the generated solutions are often sub-optimum solutions.

B. Actual situation in the aerospace industry

Shearing and shredding equipments as excavator with shears combined with sorting technologies as magnetic sorting, air current sorting and laser induced breakdown spectroscopy (LIBS) can provide homogeneous aluminum lots. According to the aircraft dismantling approaches used by Bartin Recycling Group and Evergreen air center, two businesses which own an aircraft dismantling site, it is not the way things are actually done. Figure 1 shows the actual aircraft dismantling parting out chain and figure 2 presents the actual recirculation diagram for aircraft aluminum components. First, the decontamination of the aircraft starts: kerosene, battery, pyrotechnic, electronic and electric materials removal. Then, airplane components as seats, reactors, engines and landing gears are collected (disassembled). The remained structure, the airframe, is cut out and crushed with a shear. The scrap obtained is finally sent to smelters and melted without being sorted or after being sorted coarsely. Because of the high impurity of the aluminum collected, the aluminum alloys obtained by this recirculation process can't be reused in the aerospace industry for fracture critical aerospace components, but can be reused in non-fracture critical aircraft components and in non-aircraft applications as in the automobile industry. These alloys can also be reused in the production of cast aluminum alloys for which specifications are less restrictive and the tolerance to impurities is higher.

III. ALGORITHM AND MODEL DESCRIPTION

In papers, dismantling is often associated to disassembly. A precision must be made to differentiate both activities. Disassembly is the action of separating components of an assembly or a subassembly. On the other hand, a part could be dismantled in several pieces even if this part is made of a unique component. Equipment used to dismantle EOL products such as airplanes are not limited to assemblies and subassemblies concepts. This is why dismantling sequences generation must not be restricted to the study of joint types and fasteners classification. The algorithm proposed in this paper (Fig. 3) is based on dismantling sequences generation instead of being based on disassembly sequences generation which contrasts with every modeling strategy proposed in previous papers.

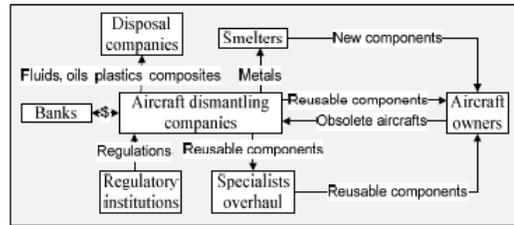


Fig. 1 : Aircraft dismantling parting out chain

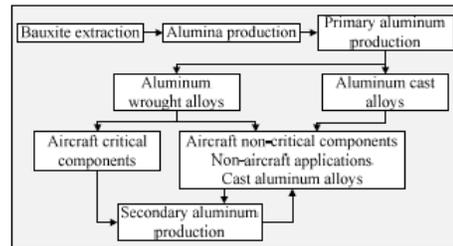


Fig. 2 : Actual recirculation diagram for aerospace aluminum alloys

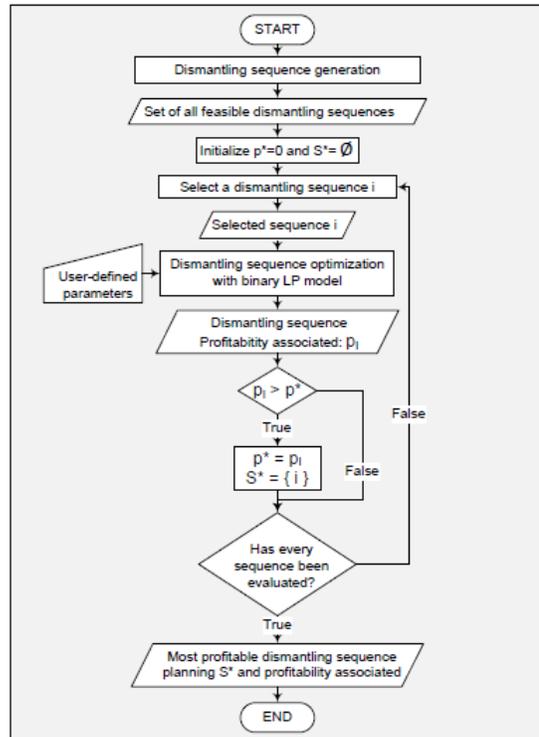


Fig. 3 : Dismantling algorithm

A. Algorithm description

The algorithm starts with the dismantling sequences generation. Even if it is time consuming, disassembly graphs can easily be generated because assemblies, subassemblies and components have been known since the product conception phase. In dismantling, the product's entities are unknown because the process is not limited to disassembly possibilities. For this reason, dismantling sequences must be generated based on subsequent dismantling actions feasibility, therefore on human knowledge of the product and available technical resources. Each sequence generated must reach the maximal decomposition level according to technical and geometric limits. A decomposition operation is a shearing operation which separates an element in two or more elements. Once the dismantling sequences generation is completed, every sequence must be implemented in the binary linear program proposed. For each sequence, the model determines for which decomposition level the proposed sequence is optimal and the profitability associated. Using the given algorithm, the optimal complete or incomplete dismantling sequence is obtained. The main inconvenient of this approach is that it can be difficult to collect the required knowledge of the product to elaborate dismantling sequences but the proposed algorithm reduces the number of sequences generated to the most appropriate and can deal with the uncertainty of the EOL product state due to changes on the product during its usage phase. The main frame of this algorithm can be used for any disassembly or dismantling sequences generation and optimization, but the binary linear program is only applicable for airframes and products that can be dismantled without being restricted to their disassembly. Finally, the algorithm can also be used for a section of a product instead of an entire product.

B. Linear programming model description

The mathematical optimization model presented beside offers the opportunity to recycle aircraft critical aluminum components in the aeronautic industry if shreds' sorting is a cost-effective operation. The model determines which airframe entities must be sheared prior to shred its components or which entities must be directly shredded. The model also identifies which shredded components should be sorted in order to upgrade recovered materials composition. The word "entities" is used instead of assemblies and subassemblies for an evident purpose. Figure 4 presents the aspect of a dismantling sequence (dismantling tree) and its components designation. Six assumptions have been made: (1) sorting is done by air current sorting, magnetic sorting and LIBS which sort aluminum by alloy types; (2) the shearing time is linearly proportional to the number of components included in the sheared entity; (3) the shredding time of a component is linearly proportional to its volume; (5) the sorting time of a component is linearly proportional to its volume; (5) shearing, shredding and sorting operation costs are determined by the user (cd , cs , ct); shred's sorting costs are the only sorting cost considered.

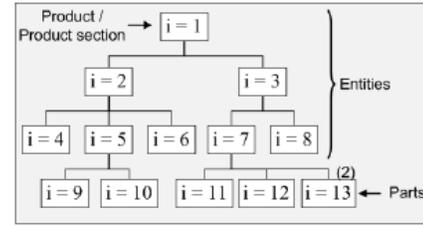


Fig. 4 : Example of an airframe dismantling tree

Indices and sets

i : airframe components

z : entities

y : parts

a : aluminum alloy types

SA_i : sets of components obtained from the shearing of component 'i'

Parameters

n_i : number of components obtained from the shearing of component 'i'

V_a : Market value of alloy type 'a' per weight unit

cd : shearing cost per time unit

cs : shredding cost per time unit

ct : sorting cost per time unit

N_i : quantity of different alloy types contained in component 'i'

vm : Non sorted aluminum market value by weight unit

H_i : User defined parameter, 1 if the component 'i' is made of only one kind of aluminum alloy, 0 else.

P_{ai} : total weight of alloy type 'a' contained in component 'i'

$$P_{ai} = \begin{cases} \text{user defined value,} & i \in y, \forall a \\ \sum_{k \in SA_i} n_k P_{ak}, & i \in z, \forall a \end{cases} \quad (1)$$

VT_i : Total aluminum market value contained in component 'i'

$$VT_i = \sum_a V_a P_{ai}, \quad \forall i \quad (2)$$

V_i : Volume of component 'i'

$$V_i = \begin{cases} \text{user defined value,} & i \in y \\ \sum_{k \in SA_i} n_k V_k, & i \in z \end{cases} \quad (3)$$

TD_i : Time needed to shear component 'i'

$$TD_i = C1 \sum_{k \in SA_i} n_k, \quad i \in z \quad (4)$$

$C1$ is a constant linked to aluminum shearing which must be determined by the user by experimentations. $C1$ varies according to the used shearing equipment.

<p>TS_i: Time needed to shred component 'i'</p> $TS_i = C2 V_i, \quad \forall i \quad (5)$ <p>$C2$ is a constant linked to aluminum shredding which must be determined by the user by experimentations. $C2$ varies according to the used shredding equipment.</p> <p>TT_i: Time needed to sort shreds of component 'i'</p> $TT_i = C3 V_i, \quad \forall i \quad (6)$ <p>$C3$ is a constant linked to aluminum sorting which must be determined by the user by experimentations. $C3$ varies according to the used sorting technologies.</p> <p>Variables</p> $D_i = \begin{cases} 1, & \text{component 'i' is sheared} \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (7)$ $S_i = \begin{cases} 1, & \text{component 'i' is shredded} \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (8)$ $T_i = \begin{cases} 1, & \text{shreds of component 'i' are sorted} \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (9)$ <p>Object function</p> <p>The objective of this mathematical model is to maximize the profitability of an airframe dismantling process. The object function contains two main parts: revenues associated with the aluminum recovery from sorted aluminum shreds or non-sorted aluminum shreds and operation costs linked to shearing ($D_i T D_i cd$), shredding ($S_i T S_i cs$) and sorting ($T_i T T_i ct$). The last expression of the function must be added in order to consider only the shredding costs of first shredded entities of each branch of the dismantling tree which include the shredding costs of all their subsequent components.</p> $\begin{aligned} Max P = & \sum_i n_i [T_i V T_i] + \sum_x \sum_{k \in SA_x} H_k D_x V T_k \\ & + vm \left(\sum_a P_{a1} - \sum_i \sum_a n_i T_i P_{a1} - \sum_x \sum_{k \in SA_x} \sum_a H_k D_x P_{a1} \right) \\ & - \sum_i n_i (D_i T D_i cd + S_i T S_i cs + T_i T T_i ct) \\ & + \sum_x \sum_{k \in SA_x} n_k S_x T S_k cs \end{aligned} \quad (10)$ <p>Constraints</p> <p>A sheared component can't be shredded, a shredded component can't be sheared and every component must be sheared or shredded:</p> $D_i + S_i = 1, \quad \forall i \quad (11)$	<p>Last parts of the disassembly tree can't be sheared:</p> $D_i = 0, \quad i \in y \quad (12)$ <p>If an entity is shredded, all its components are shredded too:</p> $S_i \leq S_k, \quad i \in x, k \in SA_i \quad (13)$ <p>Sorting operation costs are only considered for shreds sorting. A component can be sheared or sorted but can't be both:</p> $D_i + T_i \leq 1, \quad \forall i \quad (14)$ <p>Shreds' sorting is possible only for components made of more than one alloy type:</p> $N_i \geq 2 T_i, \quad \forall i \quad (15)$ <p>Sorting is possible only for the first shredded component of each branch of the dismantling tree:</p> $2 - (S_i + S_k) \geq T_k, \quad i \in x, k \in SA_i \quad (16)$ <p>Sorting is possible only for a shredded component:</p> $S_i \geq T_i, \quad \forall i \quad (17)$ $D_i, S_i, T_i \in \{0,1\} \quad \forall i \quad (18)$
--	--

IV. MODEL IMPLEMENTATION

The proposed model has been used to evaluate which components of an empennage (Fig. 5) should be sheared, shredded and/or sorted. Using the Cplex solver of AmplStudio software, it took 0:10:10 seconds to solve a problem of 57 constraints and 27 variables. Table I contains the parameters' value used to solve the problem. The solution obtained with shearing, shredding and sorting costs of 100 \$/h is to shred and sort the empennage ($i=1$) for a total profit of 42 700 \$. $C1$, $C2$, $C3$ and vm have been arbitrarily fixed to 1 h/component, 2 h/m³, 1 h/m³ and 1000 \$/t.

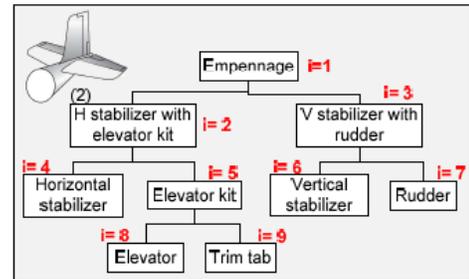


Fig. 5: Empennage dismantling sequence

TABLE I
EMPENNAGE PROBLEM PARAMETERS

Alloys	Estimate value (\$/ton)	Quantity per component (tons)				
		4	6	7	8	9
a1	3000					1.0
a2	3500		2.0		2.0	
a3	2500	2.0		1.0		1.0
Estimate volume (m ³)		1.0	1.0	1.0	0.5	0.5

C1, C2 and C3 have an impact on the generated solution and its profit. When C1 worth less than 0.42, the program propose to shear entities 1 and 3 for a greater benefit but when C1 is higher than 0.42, the optimal solution proposed and its profit remain the same as the original because from that point it is no more cost-effective to shear an entity. In the original scenario, every entity is shred so a diminution of C2 leads to an augmentation of the profit without modifying the sequence. But, when C2 is greater than 60 h/m³ shearing becomes a cost-effective operation instead of shredding for entities 1, 2 and 3. Finally, lower values of C3 bring a higher profit but superior values of C3 leads to sequences without sorting operations.

V. CONCLUSION

As mentioned before, the dismantling optimization model exposed in this paper could be used for the dismantling of any products which are not restricted to their disassembly possibilities. The model could be adapted for the valorization of any materials and could also be modified for the valorization of multiple materials. Further studies will be done in order to incorporate other elements in the object function such as the environmental impact and energy savings. Eventually, the algorithm will be adapted to determine which end-of-life strategy must be selected between the dismantling process, dumping or storage.

REFERENCES

- [1] ATE&M, "The end of the line – aircraft recycling initiatives," *Aircraft Technology Engineering and Maintenance Magazine*, pp. 28-33, April/May 2007.
- [2] S. Vlieland, "The end of an aircraft's life. Auto Recycling Nederland", [Online] Available :http://www.aels.nl/sites/aels/user_files/NewsArticles/ARNArticleEnglishComplete.pdf
- [3] Z. Itzkowitch, « 1^{er} Plateforme européenne de démantèlement aéronautique, » Dossier de presse Bartin AERO Recycling, Mars 2008. [Online] Available :http://www.veoliaproprete.com/documents/DP%20Bartin%20Aero%20Recycling_2008_HD.pdf
- [4] L. Reh, "Challenges for process industries in recycling," *China Particology*, vol. 4, no. 2, pp. 47-59, 2006.
- [5] M. E. Schlesinger, *Aluminum Recycling*, Florida: Boca Raton, 2007, 225 p.
- [6] S. K. Das, "Recycling Aluminum Aerospace Alloys," *Light Metals*, pp. 1161-1163, 2007.
- [7] A. Mutha and S. Pokharel, "Strategic network design for reverse logistics and remanufacturing using new and old product modules," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 56, pp. 334-346, 2009.
- [8] M. Fleischmann, P. Beullens, J. M. Bloemhof-Ruwaard and L. N. Van Wassenhove, "The impact of product recovery on logistics network design," *Production and operations management*, vol. 10, no. 2, pp. 156-173, Summer 2001.
- [9] M. W. Toffel, "Strategic management of product recovery," *California management review*, vol. 46, no. 2, pp. 120-141, Winter 2002.
- [10] Y. Tang, M. Zhou, E. Zussman and R. Caudill, "Disassembly modeling, planning and application: a review," *Proceedings of the 2000 IEE International Conference on Robotics & Automation*, San Francisco, CA, pp. 2197-2202, April 2000.
- [11] F. Schultmann and N. Sunke, "Planning Models for the Dismantling of Electrical and Electronic Equipment Under Consideration of Uncertainties," *Progress in Industrial Ecology – An International Journal*, vol. 5, nos 1/2, pp. 82-101, 2008.
- [12] A. D. J. Lambert, "Disassembly sequencing: a survey," *International Journal of production Research*, vol. 41, no. 16, pp. 3721-3759, 2003.
- [13] A. D. J. Lambert, "Determining optimum disassembly sequences in electronic equipment," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 43, no. 3, pp. 553-575, 2002.
- [14] H. Takeyama, T. Kojima, K. Inoue and T. Honda, "Study on Automatic Determination of Assembly Sequence," *CRP Annals*, vol. 32, no. 1, pp. 371-374, 1983.
- [15] A. Bourjault, « Contribution a une approche méthodologique de l'assemblage automatisé : élaboration automatique des séquences opératoires, » PhD Thesis, Besançon, France : Faculty of Science and Technology, Université de Franche-Comté, 1984.
- [16] H. C. Zhang and T. C. Kuo, "A Graph-Based Disassembly Sequence Planning for EOL Product Recycling," *21st IEEE/CPMT Int. Electronics Manufacturing*, pp. 140-151, Oct. 1997.
- [17] A. Gungor and S. M. Gupta, "Disassembly Sequence Planning for Complete Disassembly in Product Recovery," *Proc. of the Northeast Decision Sciences Institute Conf*, Boston, MA, 1998.
- [18] T. L. De Fazio and D. E. Whitney, "Simplified Generation of all Mechanical Assembly Sequences," *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol. 3, no. 6, pp. 640-658, 1987.
- [19] A. Bourjault, D. Chappe and J. M. Henrioud, « Élaboration automatique des gammes d'assemblage à l'aide de réseaux de Pétri, » *RAIRO APM*, vol. 21, pp. 323-342, 1987.
- [20] L. S. Homen De Mello and A. C. Sanderson, "And/or graph representation of assembly plans," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 6, no. 2, pp. 188-189, 1990.
- [21] L. S. Homen De Mello and A. C. Sanderson, "A correct and complete algorithm for the generation of mechanical assembly sequences," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 7, no. 2, pp. 228-240, 1991.
- [22] A. J. D. Lambert, "Optimum disassembly sequence generation," *Proceedings of 2000 SPIE Conference of Environmentally conscious Manufacturing*, pp. 56-67, 2000.
- [23] C. Mascle and B. A. Balazoiu, "Disassembly-assembly sequencing using feature-based life-cycle model," *Proceedings of 2001 IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning*, pp. 399-403, 2001.
- [24] J. F. Wang, J. H. Liu, S. Q. Li and Y. F. Zhong, "Intelligent Selective Disassembly using the Ant Colony Algorithm," *Artificial Intelligence for Engineering Design and Manufacturing*, vol. 17, pp. 325-333, 2003.
- [25] M. Tripathi, S. Agrawal, M. K. Pandey, R. Shankar and M. K. Tiwari, "Real world disassembly modeling and sequencing problem: Optimization by Algorithm of Self Guided Ants (ASGA)," *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, vol. 25, pp. 2197-2202, 2009.
- [26] H. R. Krikke, A. V. Harten and P. C. Schuur, "On a medium term product recovery and disposal strategy for durable assembly products," *International Journal of Production Research*, vol. 36, pp. 111-139, 1998.
- [27] B. Willems, W. Dewulf and J. Dufloy, "End-Of-Life strategy selection: a linear programming approach to manage innovations in product design," *International Journal of Production Engineering and Computers*, vol. 6, no. 7, pp. 45-53, 2004.
- [28] J. Yi, B. Yu, L. Du, C. Li and D. Hu, "Research on the selectable disassembly strategy of mechanical parts based on the generalized CAD model," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 37, no. 5-6, pp. 599-604, 2008.

ANNEXE P :
DROITS ACQUIS POUR LES IMAGES

CONTRAT POUR LE TÉLÉCHARGEMENT DE CONTENU (LICENCE STANDARD)

- o [Sans Vente](#)
- o [Sous-licence](#)
- o [Restrictions](#)
- o [Paiements et Tarification](#)
- o [Droit de propriété et Conservation des Droits](#)
- o [Déclarations et Garanties](#)
- o [Indemnisation](#)
- o [Réserves et Rejet de Responsabilité](#)
- o [Terme et Résiliation](#)
- o [Conséquences de la Résiliation](#)
- o [Divers](#)

Ce Contrat (ci-après désigné ce « Contrat ») liera Fotolia LLC (ci-après désignée « Fotolia ») et tout membre (ci-après désigné le « Membre Téléchargeur Non Exclusif ») qui télécharge une photographie, une illustration, une image ou une autre œuvre picturale ou graphique (ci-après désignée l'« œuvre ») depuis le site Fotolia.com. Le Membre Téléchargeur Non Exclusif reconnaît et accepte d'être lié par les termes et conditions de ce Contrat et que ce Contrat s'applique à chaque œuvre téléchargée par le Membre Téléchargeur Non Exclusif.

1. Sans Vente

Le Membre Téléchargeur Non Exclusif reconnaît et accepte que ce Contrat n'entraîne aucune vente de l'œuvre. A l'exception des droits expressément sous-licenciés dans ce Contrat, le Membre Téléchargeur Non Exclusif n'a pas de droit, de titre, ni d'intérêt sur l'œuvre, et ne possède en tout cas pas de droit de propriété, de droit d'auteur ni d'autres droits de propriété intellectuelle sur l'œuvre.

2. Sous-licence

Conformément aux termes et conditions de ce Contrat, Fotolia accorde par le présent acte au Membre Téléchargeur Non Exclusif une sous-licence perpétuelle, non exclusive, internationale et non-transférable pour utiliser, reproduire ou afficher l'œuvre un nombre illimité de fois dans tous types de média, uniquement (a) à des fins personnelles ou pédagogiques et (b) dans le cadre du fonctionnement d'une activité commerciale. Toutefois, le Membre Téléchargeur Non Exclusif n'a pas le droit ni de vendre ni de distribuer l'Œuvre ou toutes ses reproductions, qu'elle(s) soi(en)t seules, incorporée(s) ou intégrée(s) à un objet dérivé ou à une œuvre de l'esprit dont la valeur principale repose sur l'Œuvre elle-même, et ce, quel que soit le support et le format, qu'ils soient connus ou à venir. Le Membre Téléchargeur Non Exclusif ne peut pas accorder d'autres sous-licences. Le Membre Téléchargeur Non Exclusif a le droit de transférer des fichiers contenant l'œuvre ou les travaux dérivés autorisés à ses clients directs et employés, ou de laisser ses sous traitants reproduire l'œuvre, si toutefois ceux-ci acceptent de respecter les restrictions du présent contrat. Conformément à son activité, le Membre Téléchargeur Non Exclusif peut également transmettre à une tierce partie (comme un imprimeur) des copies temporaires de l'œuvre essentielles à la réalisation du produit final et sans lesquelles le produit ne pourrait être finalisé. Les tiers et sous traitants n'ont aucun droit supplémentaire d'utiliser l'œuvre et ne peuvent y avoir accès ou l'extraire de tout autre fichier fourni. Le Membre Téléchargeur Exclusif peut créer une collection numérique, une configuration réseau ou tout autre arrangement similaire pour permettre à l'œuvre d'être vue par ses employés, partenaires et clients. Le Membre Téléchargeur Non Exclusif doit payer à Fotolia un droit de sous-licence conformément aux [Conditions Tarifaires](#) de Fotolia.

Pour les formats électroniques, en dépit de toute stipulation contraire prévue dans ce Contrat, la reproduction, la distribution ou l'affichage de l'œuvre par le Membre Téléchargeur Non Exclusif est limité(e) à une résolution de 640 x 480 pixels dans les utilisations du site web (quelle que soit la résolution de l'œuvre disponible au téléchargement depuis le site Fotolia.com), et est limité(e) à la résolution disponible au téléchargement depuis le site Fotolia.com dans d'autres utilisations électroniques. A des fins d'éclaircissement mais soumise aux restrictions susmentionnées, ladite sous-licence est destinée à permettre l'utilisation, la reproduction et l'affichage de l'œuvre dans des situations ou activités commerciales, comme par exemple une affiche pour un commerce (y compris sur un site web), l'affichage dans un bureau ou autre établissement commercial, sur des matériels publicitaires, de promotion ou analogues.

3. Restrictions

En dépit de toute stipulation contraire prévue dans ce Contrat, et sans limitation des restrictions susmentionnées, le Membre Téléchargeur Non Exclusif reconnaît, accepte et s'engage à ne pas :

- (a) sous-licencier, vendre, céder, transmettre ou transférer l'un des droits contenus dans ce contrat. Vendre, licencier, ou distribuer l'œuvre ou l'œuvre modifiée comme fichier autonome ou partie d'une base de données en ligne ou de tout autre base de données, ou tout produit dérivé contenant l'œuvre qui permettrait à un tiers de télécharger, d'extraire ou d'accéder à l'image comme un fichier autonome ;
- (b) partager l'œuvre avec une autre personne physique ou morale, sauf comme autorisé dans ce Contrat ;
- (c) mettre l'œuvre en ligne dans un format téléchargeable, poster l'œuvre sur un forum, permettre à l'œuvre d'être distribuée sur téléphone portable, intégrer l'œuvre dans un template ou une application, y compris les applications web, dont l'objet est de créer de multiples impressions d'un produit imprimé ou numérique comme par exemple les design de sites web, les

modèles de présentation, les cartes de vœux électroniques, les cartes de visites ou tout autre produit imprimé ou électronique ;

(d) télécharger ou stocker l'œuvre sur plus d'un ordinateur à la fois, sauf si le Membre Téléchargeur Non Exclusif réalise une seule copie de sauvegarde pour la stocker sur un média extérieur à l'ordinateur unique autorisé ;

(e) utiliser, reproduire, distribuer ou afficher l'œuvre dans des applications de templates graphiques destinés à la revente ;

(f) utiliser, reproduire, distribuer ou afficher l'œuvre dans des biens ou services destinés à la revente ou la distribution, dont la valeur principale repose sur l'œuvre elle-même comme par exemple : les mugs, les t-shirts, les posters, les cartes de vœux, les cartes postales et tout autre produit imprimé ou électronique.

(g) utiliser, reproduire, distribuer ou afficher l'œuvre (y compris et sans limitation l'œuvre seule ou en combinaison avec une autre œuvre protégée par le droit d'auteur) d'une manière diffamatoire ou calomnieuse, obscène ou indécente ;

(h) supprimer toute notice de copyright, marque commerciale, autre droit de propriété intellectuelle ou tout autre information susceptible d'apparaître sur ou en association avec l'œuvre ou intégré à celle-ci sous sa forme originale téléchargée, il est entendu que le Membre Téléchargeur Non Exclusif doit reproduire toutes ces notices dans une copie de sauvegarde du fichier comprenant l'œuvre que le Membre Téléchargeur réalise ;

(i) incorporer l'œuvre dans une marque de fabrique ou de service;

(j) commettre tout acte lié à l'œuvre qui contrevient à la loi, la réglementation ou le code dans une juridiction applicable ;

(k) utiliser l'œuvre d'une manière éditoriale sans associer à l'image les crédits suivants : "© [Nom du Photographe] / [Nom de l'agence ayant fourni l'image].";

(l) commettre tout acte lié à l'œuvre qui viole ou enfreint les droits de la propriété intellectuelle et les autres droits de toute personne physique ou morale, y compris et sans limitation, les droits moraux du créateur de l'œuvre et les droits de toute personne qui, ou toute personne dont la propriété, figure dans l'œuvre ; ou

(m) commettre tout acte lié à l'œuvre qui associe celle-ci, son créateur, les personnes ou propriétés figurant dans l'œuvre le cas échéant, à des mouvements ou partis politiques, religieux, économiques ou analogues.

Utiliser une œuvre dans un sens qui pourrait faire apparaître les modèles représentés sur la photo dans une situation inconfortable ou d'une façon qui pourrait porter préjudice aux modèles comme (de manière non exhaustive) :

(a) l'utilisation d'une image dans un cadre pornographique

(b) la publicité pour le tabac et l'alcool

(c) la publicité pour les clubs d'adultes, les sites de rencontres ou les services d'escort girl

(d) l'attachement à une cause politique

(e) la publicité pour les produits pharmaceutiques ou parapharmaceutiques, en particulier, et de manière non exhaustive, les produits d'hygiène, les produits contraceptifs ou les produits liés aux troubles sexuels

(f) l'utilisation dans un contexte diffamatoire, illégal, immoral ou portant atteinte aux bonnes mœurs

4. Paiements et Tarification

Tel qu'indiqué ci-dessus, le Membre Téléchargeur Non Exclusif doit payer à Fotolia un droit de sous-licence conformément aux [Conditions Tarifaires](#) de Fotolia.

5. Droit de propriété et Conservation des Droits

Le Membre Téléchargeur Non Exclusif reconnaît et accepte que Fotolia et/ou son concédant de licence conserve(nt) ses (leurs) droits, titres et intérêts sur l'œuvre (sauf les droits accordés conformément à ce Contrat). Par conséquent, aucun titre ni aucun droit de propriété participation sur l'œuvre n'est transmis(e) au Membre Téléchargeur Non Exclusif en vertu de ce Contrat. Fotolia et/ou son concédant de licence (selon le cas) conserve(nt) également son (leur) droit d'utiliser, de reproduire ou d'afficher l'œuvre uniquement pour montrer l'œuvre comme partie intégrante de son(leur) portfolio professionnel. Sans limitation des autres droits que Fotolia est susceptible de conserver, Fotolia peut continuer à utiliser l'œuvre à des fins de référence et d'archivage internes.

6. Déclarations et Garanties

Outre les déclarations et garanties effectuées par le Membre Téléchargeur Non Exclusif ci-dessus, Fotolia et le Membre Téléchargeur Non Exclusif déclarent et garantissent par le présent acte avoir le droit de conclure ce Contrat.

7. Indemnisation

Le Membre Téléchargeur Non Exclusif accepte d'indemniser, de défendre et de dégager de toute responsabilité Fotolia et ses affiliés, ainsi que leurs dirigeants, administrateurs, employés, propriétaires, mandataires, représentants, concédants de licence et (sous-)licenciés (ci-après collectivement désignés les « Indemnitaires ») respectifs pour des réclamations, des frais (y compris les honoraires de conseil) ou d'autres responsabilités dues au manquement du Membre Téléchargeur Non Exclusif à l'une de ses déclarations, garanties ou obligations dans le cadre de ce Contrat, et pour toutes les utilisations de l'œuvre, y compris et sans limitation, les réclamations ou demandes en justice suivantes : enfreinte ou violation des droits de la propriété intellectuelle, diffamation écrite, orale ou autre, atteinte à la vie privée ou « présentation sous un jour défavorable ou trompeur », atteinte à l'image, ou encore effet de flou, déformation ou altération, qu'ils soient intentionnels ou non. Fotolia a le droit, à sa seule discrétion, d'assurer la défense de toute réclamation, demande en justice ou affaire qui fait l'objet d'une indemnisation par le Membre Téléchargeur Non Exclusif en faisant appel à un avocat de son choix. Le Membre

Téléchargeur Non Exclusif doit coopérer pleinement avec Fotolia dans le cadre de la défense de ladite réclamation, demande en justice ou affaire.

8. Réserves et Rejet de Responsabilité

Le Membre Téléchargeur Non Exclusif accepte que Fotolia, ses affiliés, leurs dirigeants, administrateurs, employés, propriétaires, mandataires, représentants, concédants de licence et (sous-)licenciés (autre que le Membre Téléchargeur), ne soient pas tenus pour responsables des dommages directs, accessoires, indirects ou immatériels, suite à une utilisation ou à une non-utilisation de l'œuvre, même si lesdites parties ont été informées, ou informées de la possibilité, de tels dommages.

Le Membre Téléchargeur Non Exclusif reconnaît que Fotolia ne possède généralement pas les autorisations pour les marques, logos et autres éléments pouvant être protégés par un droit de propriété intellectuelle, représentés dans certaines œuvres. L'obtention de ces autorisations est de la responsabilité du Membre Téléchargeur Non Exclusif.

Le Membre Téléchargeur Non Exclusif reconnaît que Fotolia ne possède généralement pas les autorisations des propriétaires de biens meubles ou immeubles, des fabricants et designers des produits commerciaux tels que notamment, les automobiles, les avions, les vêtements, etc. pouvant être représentés dans certaines œuvres. Il est généralement impossible pour les banques d'images ou les artistes d'obtenir une autorisation générale pour ce type de produits mais il est souvent possible des les obtenir au cas par cas. L'obtention de ces autorisations est de la responsabilité du Membre Téléchargeur Non Exclusif.

L'OEUVRE EST FOURNIE « TELLE QUELLE » ET, SAUF STIPULATION EXPRESSE DANS CE CONTRAT, AUCUNE PARTIE N'EFFECTUE DE DECLARATIONS NI DE GARANTIES, EXPRESSES OU IMPLICITES, COMME LES GARANTIES IMPLICITES DE QUALITE MARCHANDE OU D'APTITUDE A UN EMPLOI PARTICULIER.

9. Terme et Résiliation

Ce Contrat est reconduit tacitement à moins qu'il ne soit résilié conformément à cet Article 9. Fotolia peut résilier ce Contrat à tout moment, quelle que soit l'œuvre, si le Membre Téléchargeur Non Exclusif manque à l'une de ses représentations, garanties ou obligations dans le cadre de ce Contrat. Le Membre Téléchargeur Non Exclusif peut résilier ce Contrat à tout moment. Fotolia et le Membre Téléchargeur Non Exclusif informeront chacun l'autre partie s'il(s) elle) décide de résilier ce Contrat. Fotolia a le droit également, à sa seule discrétion, de refuser le téléchargement de toute œuvre depuis le site Fotolia.com. A compter de la résiliation d'une licence pour une œuvre en particulier, le Membre Téléchargeur Non Exclusif doit immédiatement cesser d'utiliser cette œuvre, détruire ou, à la demande de Fotolia, retourner cette œuvre à Fotolia, détruire ou retirer l'œuvre de son système informatique et de ses périphériques de stockages (physiques ou électroniques), et s'assurer que ses clients font de même.

10. Conséquences de la Résiliation

A compter de la date de résiliation de ce Contrat, le Membre Téléchargeur Non Exclusif cessera d'utiliser l'œuvre et détruira toutes les copies de l'œuvre, ainsi que toutes les œuvres dérivées et matériels rattachés (s'ils existent) se trouvant en sa possession ou à sa charge. A la demande de Fotolia, le Membre Téléchargeur Non Exclusif doit attester par écrit la destruction de l'œuvre, des œuvres dérivées et/ou des matériels rattachés. La résiliation de ce Contrat ne doit pas libérer le Membre Téléchargeur Non Exclusif des obligations de paiement éventuellement contractées avant la résiliation. Les dispositions des Articles 1, 4, 5, 6, 7, 8, 10 et 11 demeurent en vigueur à l'issue de la résiliation de ce Contrat.

11. Divers

Ce Contrat est régi et interprété conformément aux lois de l'Etat de New York, sans tenir compte des principes du droit international privé. Toute action judiciaire, poursuite ou procédure issue de ou liée à ce Contrat doit être engagée devant une juridiction compétente auprès des tribunaux fédéraux ou territoriaux de l'Etat de New York. Le Membre Téléchargeur Non Exclusif et Fotolia se soumettent tous deux à la compétence territoriale de cette juridiction et renoncent à tout droit que chacun pourrait éventuellement réclamer pour manque de compétence territoriale ou désagrément causé par le forum.

La relation entre Fotolia et le Membre Téléchargeur Non Exclusif dans le cadre de ce Contrat est celle d'entrepreneurs indépendants. A des fins d'éclaircissement, les parties ne sont pas coentrepreneurs, associés, mandant et mandataire, ni employeur et employé. Les parties n'ont en aucune façon le pouvoir d'engager ou d'obliger l'autre.

Le Membre Téléchargeur Non Exclusif accepte d'assumer la responsabilité pour l'utilisation, les ventes, les taxes sur la valeur ajoutée et autres taxes analogues ainsi que les droits imposés par une administration d'une juridiction, pour la licence qu'il ou elle aura accordée dans le cadre de ce Contrat.

Aucune renonciation de la part de Fotolia à exercer un pouvoir, un droit, un privilège ou un recours dans le cadre de ce Contrat, et aucun délai de la part de Fotolia pour exercer un pouvoir, un droit, un privilège ou un recours, ne doivent empêcher tout autre exercice ou tout autre pouvoir, droit, privilège ou recours.

A l'exception des droits de marques, tous les droits et licences accordés par le Fotolia dans le cadre de ou conformément à ce Contrat, sont à toutes les fins de la Section 365(n) du Chapitre 11 du Code des Etats-Unis (« Chapitre 11 »), des licences sur des droits de « propriété intellectuelle » tel qu'indiqué au Chapitre 11. Fotolia accepte, en cas d'introduction d'une procédure de faillite par ou contre elle aux termes du Chapitre 11, que le Membre Téléchargeur Non Exclusif, en qualité de licencié desdits droits conformément à ce Contrat, conserve et puisse exercer pleinement ses droits prévus par ce Contrat (y compris la licence accordée selon ce Contrat) et tous ses droits et prérogatives prévus au chapitre 11.

Fotolia peut, à sa seule discrétion, céder un ou tous ses droits ou obligations prévus dans ce Contrat. Le Membre Téléchargeur Non Exclusif ne peut céder aucun de ses droits ou obligations prévus dans ce Contrat.

Ce Contrat entre en vigueur dans l'intérêt de, et engage Fotolia et le Membre Téléchargeur Non Exclusif, ainsi que leurs

successieurs et ayants droit respectifs. Aucun élément dans ce Contrat, explicite ou implicite, n'est destiné à conférer à une personne physique ou morale, autre que Fotolia et le Membre Téléchargeur Non Exclusif, ainsi que leurs successieurs et ayants droit respectifs, les droits, les recours, les obligations ou les responsabilités aux termes de ou découlant de ce Contrat.

Quand le contexte l'exige, toute référence au singulier inclut le pluriel et vice-versa, et les genres masculin, féminin et neutre incluent les uns et les autres.

Si une condition ou disposition de ce Contrat est nulle, illégale ou non applicable, toutes les autres dispositions de ce Contrat demeurent néanmoins en pleine vigueur.

Les titres soulignés dans ce Contrat sont employés par pure commodité de référence et n'influencent en rien le sens ou l'interprétation de ce Contrat.

Contract : sell / default license

Informations de téléchargement

Viau Julie

Content ID: 3936168



successieurs et ayants droit respectifs. Aucun élément dans ce Contrat, explicite ou implicite, n'est destiné à conférer à une personne physique ou morale, autre que Fotolia et le Membre Téléchargeur Non Exclusif, ainsi que leurs successieurs et ayants droit respectifs, les droits, les recours, les obligations ou les responsabilités aux termes de ou découlant de ce Contrat.

Quand le contexte l'exige, toute référence au singulier inclut le pluriel et vice-versa, et les genres masculin, féminin et neutre incluent les uns et les autres.

Si une condition ou disposition de ce Contrat est nulle, illégale ou non applicable, toutes les autres dispositions de ce Contrat demeurent néanmoins en pleine vigueur.

Les titres soulignés dans ce Contrat sont employés par pure commodité de référence et n'influencent en rien le sens ou l'interprétation de ce Contrat.

Contract : sell / default license

Informations de téléchargement

Viau Julie

Content ID: 646180



successeurs et ayants droit respectifs. Aucun élément dans ce Contrat, explicite ou implicite, n'est destiné à conférer à une personne physique ou morale, autre que Fotolia et le Membre Téléchargeur Non Exclusif, ainsi que leurs successeurs et ayants droit respectifs, les droits, les recours, les obligations ou les responsabilités aux termes de ou découlant de ce Contrat.

Quand le contexte l'exige, toute référence au singulier inclut le pluriel et vice-versa, et les genres masculin, féminin et neutre incluent les uns et les autres.

Si une condition ou disposition de ce Contrat est nulle, illégale ou non applicable, toutes les autres dispositions de ce Contrat demeurent néanmoins en pleine vigueur.

Les titres soulignés dans ce Contrat sont employés par pure commodité de référence et n'influencent en rien le sens ou l'interprétation de ce Contrat.

Contract : sell / default license

Informations de téléchargement

Viau Julie

Content ID: 1472821



successeurs et ayants droit respectifs. Aucun élément dans ce Contrat, explicite ou implicite, n'est destiné à conférer à une personne physique ou morale, autre que Fotolia et le Membre Téléchargeur Non Exclusif, ainsi que leurs successeurs et ayants droit respectifs, les droits, les recours, les obligations ou les responsabilités aux termes de ou découlant de ce Contrat.

Quand le contexte l'exige, toute référence au singulier inclut le pluriel et vice-versa, et les genres masculin, féminin et neutre incluent les uns et les autres.

Si une condition ou disposition de ce Contrat est nulle, illégale ou non applicable, toutes les autres dispositions de ce Contrat demeurent néanmoins en pleine vigueur.

Les titres soulignés dans ce Contrat sont employés par pure commodité de référence et n'influencent en rien le sens ou l'interprétation de ce Contrat.

Contract : sell / default license

Informations de téléchargement

Viau Julie

Content ID: 594370



successesseurs et ayants droit respectifs. Aucun élément dans ce Contrat, explicite ou implicite, n'est destiné à conférer à une personne physique ou morale, autre que Fotolia et le Membre Téléchargeur Non Exclusif, ainsi que leurs successesseurs et ayants droit respectifs, les droits, les recours, les obligations ou les responsabilités aux termes de ou découlant de ce Contrat.

Quand le contexte l'exige, toute référence au singulier inclut le pluriel et vice-versa, et les genres masculin, féminin et neutre incluent les uns et les autres.

Si une condition ou disposition de ce Contrat est nulle, illégale ou non applicable, toutes les autres dispositions de ce Contrat demeurent néanmoins en pleine vigueur.

Les titres soulignés dans ce Contrat sont employés par pure commodité de référence et n'influencent en rien le sens ou l'interprétation de ce Contrat.

Contract : sell / default license

Informations de téléchargement

Viau Julie

Content ID: 549781



successesseurs et ayants droit respectifs. Aucun élément dans ce Contrat, explicite ou implicite, n'est destiné à conférer à une personne physique ou morale, autre que Fotolia et le Membre Téléchargeur Non Exclusif, ainsi que leurs successesseurs et ayants droit respectifs, les droits, les recours, les obligations ou les responsabilités aux termes de ou découlant de ce Contrat.

Quand le contexte l'exige, toute référence au singulier inclut le pluriel et vice-versa, et les genres masculin, féminin et neutre incluent les uns et les autres.

Si une condition ou disposition de ce Contrat est nulle, illégale ou non applicable, toutes les autres dispositions de ce Contrat demeurent néanmoins en pleine vigueur.

Les titres soulignés dans ce Contrat sont employés par pure commodité de référence et n'influencent en rien le sens ou l'interprétation de ce Contrat.

Contract : sell / default license

Informations de téléchargement

Viau Julie

Content ID: 7448936



successieurs et ayants droit respectifs. Aucun élément dans ce Contrat, explicite ou implicite, n'est destiné à conférer à une personne physique ou morale, autre que Fotolia et le Membre Téléchargeur Non Exclusif, ainsi que leurs successieurs et ayants droit respectifs, les droits, les recours, les obligations ou les responsabilités aux termes de ou découlant de ce Contrat.

Quand le contexte l'exige, toute référence au singulier inclut le pluriel et vice-versa, et les genres masculin, féminin et neutre incluent les uns et les autres.

Si une condition ou disposition de ce Contrat est nulle, illégale ou non applicable, toutes les autres dispositions de ce Contrat demeurent néanmoins en pleine vigueur.

Les titres soulignés dans ce Contrat sont employés par pure commodité de référence et n'influencent en rien le sens ou l'interprétation de ce Contrat.

Contract : sell / default license

Informations de téléchargement

Viau Julie

Content ID: 4781362



successieurs et ayants droit respectifs. Aucun élément dans ce Contrat, explicite ou implicite, n'est destiné à conférer à une personne physique ou morale, autre que Fotolia et le Membre Téléchargeur Non Exclusif, ainsi que leurs successieurs et ayants droit respectifs, les droits, les recours, les obligations ou les responsabilités aux termes de ou découlant de ce Contrat.

Quand le contexte l'exige, toute référence au singulier inclut le pluriel et vice-versa, et les genres masculin, féminin et neutre incluent les uns et les autres.

Si une condition ou disposition de ce Contrat est nulle, illégale ou non applicable, toutes les autres dispositions de ce Contrat demeurent néanmoins en pleine vigueur.

Les titres soulignés dans ce Contrat sont employés par pure commodité de référence et n'influencent en rien le sens ou l'interprétation de ce Contrat.

Contract : sell / default license

Informations de téléchargement

Viau Julie

Content ID: 2052589

