

**Titre:** Aide à la décision pour la gestion d'un parc d'avions en fin de vie.  
Title:

**Auteur:** Chloé Siles  
Author:

**Date:** 2011

**Type:** Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

**Référence:** Siles, C. (2011). Aide à la décision pour la gestion d'un parc d'avions en fin de vie.  
[Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.  
Citation: <https://publications.polymtl.ca/537/>

## Document en libre accès dans PolyPublie

Open Access document in PolyPublie

**URL de PolyPublie:** <https://publications.polymtl.ca/537/>  
PolyPublie URL:

**Directeurs de recherche:** Pierre Baptiste, & Christian Mascle  
Advisors:

**Programme:** Génie Industriel  
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

AIDE À LA DÉCISION POUR LA GESTION  
D'UN PARC D'AVIONS EN FIN DE VIE

CHLOÉ SILES

DÉPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES ET GÉNIE INDUSTRIEL  
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

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

AVRIL 2011

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

AIDE À LA DÉCISION POUR LA GESTION  
D'UN PARC D'AVIONS EN FIN DE VIE

Présenté par : SILES, Chloé

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

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

M. FRAYRET, Jean-Marc, Ph.D., président

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

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

M. HAÏT, Alain, Doc., membre

M. VANHEERDEN, Derk-Jan, M.Sc., membre observateur

## **REMERCIEMENTS**

Je tiens en premier lieu à exprimer ma profonde gratitude envers mon directeur de recherche Pierre Baptiste pour sa confiance, ses idées judicieuses et les longues heures de discussions passionnantes qui s'en sont suivies, ainsi que pour son implication générale dans le but de faire de cette maîtrise une expérience des plus enrichissantes.

J'ai été très sensible à la participation de Derk-Jan VanHeerden, PDG d'une des compagnies étudiées, à travers son accueil, son aide et son précieux point de vue interne sur l'industrie du démantèlement d'avions, ainsi que celle de Mark Gregory (PDG d'une autre compagnie étudiée) avec la permission de visiter le site industriel de sa compagnie, et d'observer de près les opérations de désassemblage et de démantèlement.

Je suis également reconnaissante envers M. Sapnar pour ses commentaires sur les traductions anglaises.

Enfin, je souhaite remercier ALCAN pour la bourse de recherche attribuée, ainsi que N. De Marcellis-Warin et Cécile Locart pour leur aide dans l'obtention de cette bourse.

## RÉSUMÉ

Malgré la récente crise économique mondiale qui en a perturbé l'utilisation, le transport aérien est aujourd'hui indispensable, et toujours en croissance. Le nombre d'aéronefs en service ne cesse d'augmenter depuis la mise en service des premières séries produites en masse, au milieu du XX<sup>ème</sup> siècle. La durée de vie moyenne d'un avion se situant autour de 30 ans, ces dernières années le nombre d'appareils en fin de vie devient significatif. Par ailleurs, l'opinion publique, les législateurs et les entreprises accordent de plus en plus de crédit aux problématiques environnementales. Aussi, les secteurs automobile et électronique grand public par exemple, sources considérables de déchets, ont déjà fait l'objet de lois régissant la gestion en fin de vie de ces produits dans de nombreux pays, notamment en Europe. Les produits mis au rebut doivent être éliminés dans l'observance de règles strictes, s'assurant de l'application de pratiques respectueuses de l'environnement. Dans la plupart des cas, le principe de responsabilité élargie des producteurs est mis en pratique, contraignant le manufacturier à prendre en charge la gestion de son produit en fin de vie.

Mais à l'heure actuelle, aucune législation de ce type concernant les avions n'existe. Les constructeurs aéronautiques (notamment Airbus, Boeing et Bombardier) anticipent la mise en place d'une tel règlement. En outre, démontrer son implication dans les problématiques environnementales devient un facteur décisif pour l'image de marque de ces compagnies. De plus, un avion, même en fin de vie, possède une valeur potentielle conséquente. D'une part, les alliages d'aluminium constituant la carcasse sont de très haute qualité ; d'autre part, parmi les pièces détachées qui s'y trouvent, les plus importantes pourront être remises en état de vol (moteurs, trains d'atterrissement et avionique notamment) et revendues parfois pour plusieurs millions de dollars. La récupération de ces pièces nécessite par ailleurs un soin particulier et un cadre strict pour éviter le développement d'un marché noir de pièces détachées déjà existant, posant notamment des problèmes de sécurité majeur.

Ainsi, tous ces éléments incitent les constructeurs aéronautiques à prendre part au démantèlement d'avions, et d'autres compagnies à se lancer dans cette activité. Pour qu'un réseau démantèlement d'avions efficace soit mis en place, celui-ci doit impérativement être économiquement attrayant, afin de donner naissance à un secteur industriel florissant, et auto-alimentant sa progression par l'investissement des entreprises. Pour cela, deux grandes avenues

peuvent être étudiées : d'une part les techniques actuelles de démantèlement sont à améliorer, et d'autre part, la gestion des compagnies de démantèlement doit être optimisée. Cette deuxième avenue est explorée dans ce mémoire.

Après une courte revue de littérature sur la gestion de la fin de vie dans d'autres industries ainsi que les activités et acteurs impliqués dans le démantèlement d'avions, une étude approfondie des modèles d'affaires de 5 compagnies opérant un site de désassemblage et démantèlement d'avions est présentée. Cette étude, menée notamment grâce à la visite de sites industriels, a démontré qu'il n'existe pour l'instant pas de modèle d'affaires unique dans cette industrie. Cependant, il est possible d'expliquer le modèle d'affaires d'une compagnie par son cœur de métier originel, ou sa nature. En effet, d'aucuns exploitent le démantèlement d'avions pour alimenter leur activité principale s'agissant pour certains du courtage en pièces détachées (via récupération des pièces détachées), pour d'autres du recyclage industriel (via récupération de la carcasse). L'implication des constructeurs, et de compagnies œuvrant uniquement dans le démantèlement d'avions quant à elle, s'explique par les arguments évoqués plus haut entre volonté de respect de l'environnement, régulations et valeur potentielle.

Suite à ces conclusions, un modèle mathématique a été développé, représentant le fonctionnement d'une compagnie opérant un site de démantèlement d'avions. L'objectif est de décrire le plus fidèlement possible ce qui se passe réellement sur le terrain, par le biais d'observations réalisées lors des visites de sites, et des informations fournies par les contacts dans les compagnies. Finalement, un modèle unique pouvant décrire le fonctionnement de tous les modèles d'affaires a été élaboré, moyennant l'ajustement de certains paramètres. Le modèle proposé vise ultimement à développer un outil d'aide à la décision pour ces compagnies.

Le modèle prend en entrée principalement des dates de réception d'avions à démanteler, ainsi que différents scénarios de démantèlement réalisables par la compagnie (caractérisés par des niveaux de tri plus ou moins évolués) avec leurs coûts et revenus de revente des produits obtenus. L'objectif est de maximiser une fonction reliée au profit de la compagnie, tout en respectant un certain nombre de contraintes, parmi lesquelles : (1) dès qu'une date de livraison d'avion est prévue, pour cette date une place doit être libérée, (2) les pièces détachées réutilisables doivent être retirées dès réception de l'appareil, (3) l'étape de broyage et d'élimination des débris supposant un frais fixe important, le broyage de plusieurs avions en

même temps est à favoriser. En sortie, le modèle propose pour chaque appareil le scénario de démantèlement à adopter (en fonction du temps à disposition et des coûts et revenus associés au scénario), ainsi que le ou les avions à broyer avant chaque réception d'appareil. Ainsi, contrairement aux modèles précédemment développés dans la littérature, celui-ci propose à la compagnie d'utiliser plusieurs scénarios différents sur différents avions, s'adaptant aux modèles et aux conditions du moment (temps alloué notamment).

La formulation du modèle présentée tente d'optimiser le profit économique de la compagnie, mais des paramètres concernant notamment l'impact environnemental peuvent être pris en compte, afin de s'adapter aux objectifs premiers de la compagnie.

Finalement, bien que son efficacité n'ait pas pu être testée avec des données réelles, de nombreux arguments en font un modèle solide et pertinent : il est fidèle à la réalité car basé sur des observations de terrain, adaptables à la fois à différents modèles d'affaires et à des objectifs variés (profit économique ou respect de l'environnement), et enfin, il peut être implémenté à faible coûts, puisqu'il ne prend en compte que les scénarios de démantèlement réalisés par la compagnie, et non des stratégies nécessitant un investissement dans de nouvelles machines ou du nouveau personnel, par exemple. Néanmoins, des instances pourront être lancées avec différentes configurations afin d'étudier l'intérêt de l'intégration de nouveaux scénarios.

## ABSTRACT

In spite of the recent economic crisis that disrupted it, air transportation is essential to both leisure and business worlds, and is still expanding. The number of aircraft in use keeps growing since the first mass produced models in the middle of the 20<sup>th</sup> century. The average lifespan of an airplane being around 30 years, the number of retired aircraft has become significant over the past few years.

Public opinion, legal institution as well as companies are taking more and more interest in environmental issues. Automotives and electronics industries have already been legislated regarding products' end-of-life (EOL) in several countries, particularly in Europe. Those EOL products must be disposed of in a strictly regulated, environmentally-friendly way. In most cases, "polluter pays-principle" is applied, making the manufacturer responsible for proper treatment.

At the present time, though, no analogous rule has emerged for aircraft. Therefore, manufacturers (like Airbus, Boeing and Bombardier) anticipate the implementation of a similar legislation in the next few years. Moreover, showing an interest in environmental topics has become essential for companies' brand image. Besides, there's still a great value in an EOL airplane; essentially in spare parts, worth several million dollars in some cases (mainly through engines, landing gears and avionics), but potentially in the airframe as well, because of the very high quality-alloys that make of planes. The development of a well organized-distribution channel for spare parts is critical in order to avoid the black market's expansion, leading to major safety issues.

Thus, all those factors are conduced aircraft manufacturers to take part into their products' dismantling, and other companies to get in this business as well. For an efficient dismantling network to be implemented, it has to be economically attractive, so that companies can invest in this activity and make it evolve and get more and more effective, both in an economically and environmentally-friendly way. To do so, to major avenues can be explored: on the one hand, current dismantling techniques need to be improved, on the other hand, the way companies organize their activity with their current knowledge can be optimized. This second possibility is analyzed in this thesis.

After a short literature review on various actors and activities related to aircraft dismantling, as well as the way EOL products are managed in other industries, a detailed analysis of five aircraft disassembly and dismantling companies is presented. This study, conducted in particular through site visits, showed that for now, there is no unique, business model in the aircraft dismantling industry. Nevertheless, a company's business model can be justified by its core business. Some companies are taking part into this activity to expand their original activity, that being spare parts brokerage (thanks to spare parts) or industrial recycling (thanks to airframe). Some others, among which aircraft manufacturers and aircraft dismantling-specialized companies, get in this business for arguments afore mentioned: willingness to protect the environment, possible regulations and potential value.

As a result of this study, a mathematical model has been developed, describing the way a dismantling company organizes its operations. The purpose is to be as faithful as possible to what really happens on site, thanks to the conduction of on-site visits and meetings with key

stakeholders. In the end, we came up with a unique model allowing the description of any business model, by means of adjusting parameters. Ultimately, the model intends to be developed in order to build a decision support tool for dismantling companies.

The model takes input of two main types of data: (1) aircraft expected delivery dates, and (2) various feasible dismantling scenarios (depending on know-how, tools and available technology, among others), along with cost and revenues related to the dismantling and sell of products

The objective is to maximize a function related to profit, while respecting constraints, of which the main are: (1) at least an aircraft has to be scrapped in order to free up a space at each delivery date, (2) valuable spare parts have to be removed as soon as possible, and (3) scrapping several aircraft at a time is preferable.

The model then proposes for each aircraft the dismantling scenario to be performed (depending on available time, cost and revenues related to the scenario), as well as the aircraft to be scrapped to free up a space at each delivery date. Thus, unlike previously developed models, this one allows a company to use several dismantling scenarios, adapting them to each aircraft and ongoing conditions (e.g. available time).

Even though the model formulation developed herein aims at optimizing economic profit of the company, parameters regarding environmental impact can be incorporated in order to fit the company's primary objectives.

Eventually, although the model couldn't be tested with real data, several arguments make it sound and relevant: it is faithful to reality, flexible and adaptable to both various business models and various objectives (economic profit or environment for instance). Finally, it can be implemented at low cost, because only currently-used scenarios are taken into account, so there is no need to invest in new tools, machines or human resources. Nevertheless, instances can be run with different configurations in order to find out whether considering a new dismantling scenario can be profitable.

## TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS .....	III
RÉSUMÉ .....	IV
ABSTRACT.....	VI
TABLE DES MATIÈRES .....	IX
LISTE DES TABLEAUX.....	XII
LISTE DES FIGURES .....	XIII
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS .....	XIV
LISTE DES ANNEXES .....	XV
INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE 1 MISE EN CONTEXTE ET REVUE DE LITTÉRATURE .....	3
1.1 Le traitement en fin de vie dans les autres industries .....	3
1.1.1 L'électronique.....	3
1.1.2 L'automobile.....	5
1.2 Gestion actuelle des avions en fin de vie.....	6
1.3 Les acteurs et activités majeurs impliqués dans le démantèlement d'avions .....	10
1.3.1 Les institutions légales et l'implication des constructeurs aéronautiques .....	10
1.3.2 L'Aircraft Fleet Recycling Association (AFRA).....	12
1.3.3 Recyclage de l'aluminium .....	14
1.3.4 Séquencement de désassemblage.....	16
CHAPITRE 2 COMPARAISON DE MODÈLES D'AFFAIRES DANS L'INDUSTRIE DU DÉMANTÈLEMENT AÉRONAUTIQUE .....	19
2.1 Méthodologie .....	19
2.2 Description des modèles d'affaires observés.....	24

2.2.1	La compagnie A .....	24
2.2.2	La compagnie B .....	27
2.2.3	La compagnie C .....	30
2.2.4	La compagnie D .....	32
2.2.5	La compagnie E .....	34
2.3	Discussion : pourquoi un modèle d'affaires plutôt qu'un autre? .....	38
2.3.1	Priorité : gestion des pièces et équipements .....	41
2.3.2	Priorité : démantèlement de la carcasse .....	46
2.3.3	Législation et questions environnementales .....	49
2.4	Conclusions et pistes de recherche .....	52
<b>CHAPITRE 3 MODÈLE POUR L'AIDE À LA DÉCISION DANS LA GESTION D'UN PARC D'AVIONS EN FIN DE VIE .....</b>		<b>55</b>
3.1	Justification du modèle .....	55
3.2	Facteurs clés influençant la structure du modèle .....	57
3.2.1	Absence de méthode de démantèlement unique et choix des variables de décision	57
3.2.2	Priorités énoncées par les démantilleurs .....	63
3.2.3	Gestion des ressources humaines .....	65
3.2.4	Résumé .....	65
3.3	Expression mathématique .....	67
3.3.1	Notations et paramètres .....	67
3.3.2	Variables .....	68
3.3.3	Contraintes .....	69
3.3.4	Objectif .....	72
3.4	Exploitation .....	72

3.5 Conclusion .....	74
CONCLUSION.....	75
BIBLIOGRAPHIE.....	79
ANNEXES.....	85

**LISTE DES TABLEAUX**

Tableau 1-1 Collecte des données.....	20
Tableau 1-2 Capacités de la compagnie B .....	29
Tableau 1-3 Gestion des pièces détachées et de la pour les 5 entreprises étudiées .....	40
Tableau 2-1 Accessibilité des donnés nécessaires au modèle .....	73

## LISTE DES FIGURES

Figure 0-1 Cheminement des produits électroniques en fin de vie .....	4
Figure 0-2 Étapes du traitement d'un avion en fin de vie .....	8
Figure 0-3 Acteurs impliqués dans le démantèlement d'un avion .....	9
Figure 1-2 Récolte des données .....	22
Figure 1-3 Méthodologie .....	23
Figure 1-4 Modèle d'affaires de la compagnie A .....	27
Figure 1-5 Modèle d'affaires de la compagnie B .....	30
Figure 1-6 Modèle d'affaires de la compagnie C .....	32
Figure 1-7 Modèle d'affaires de la compagnie D .....	34
Figure 1-8 Modèle d'affaires de la compagnie E .....	38
Figure 1-9 Valeur qu'il est possible de retirer de la carcasse d'un avion en fin de vie .....	47
Figure 2-1 Focus du modèle mathématique dans le processus de traitement complet d'un avion en fin de vie .....	57
Figure 2-2 Exemples de stratégies de démantèlement .....	60
Figure 2-3 Différents scénarios utilisables par une compagnie dans le modèle .....	62
Figure 2-4 Schématisation du modèle mathématique .....	66

## **LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS**

AFRA	Aircraft Fleet Recycling Association
ASA	Aviation Suppliers Association
BMP	Best Management Practices
CAR	Canadian Aviation Regulation (Règlement de l'Aviation Canadienne)
CE	Commission Européenne
EASA	European Aviation Safety Agency (Agence Européenne de la Sécurité Aérienne)
FAA	Federal Aviation Agency
LIFE	L'Instrument Financier pour l'Environnement
OCDE	Organisation de Coopération et de Développement Économiques
OEM	Original Equipment Manufacturer
PAMELA	Process for Advanced Management of End of Life of Aircraft
PMA	Parts Manufacturer Approval
PPP	Principe Pollueur Payeur
REP	Responsabilité Élargie des Producteurs
UE	Union Européenne
VHU	Véhicules Hors d'Usage
WEEE	Waste Electronic and Electrical Equipment

## **LISTE DES ANNEXES**

ANNEXE A : Cheminement des composants en aluminium d'un aéronef.....	85
ANNEXE B : Graphique sur réutilisation et récupération des VHU 2006-2008 (mise à jour 21 janvier 2011).....	86
ANNEXE C : Graphique sur réutilisation et recyclage des VHU 2006-2008 (mise à jour 21 janvier 2011).....	87
ANNEXE D : Principaux chiffres du projet PAMELA.....	88
ANNEXE E : Table des matières du guide de bonnes pratiques de l'AFRA, version 2 .....	89

## INTRODUCTION

Jusqu'à récemment, la plupart des fabricants de produits, quels qu'ils soient, concentraient leurs efforts sur la conception, la production, la commercialisation et la vente: la marchandise ayant quitté l'usine, seul le service après-vente liait le fabricant et l'utilisateur. Mais aujourd'hui, l'intérêt général croissant pour les problématiques environnementales, l'apparition de nouvelles réglementations, l'influence de l'image de marque ou encore la réduction des coûts de production contraignent de plus en plus les entreprises à se préoccuper du sort de leurs produits en fin de vie, selon le principe « pollueur-payeur ». De nombreuses industries sont concernées et ont déjà évolué dans cette direction, notamment l'automobile et l'électronique grand public. Le cas de l'aéronautique est néanmoins particulier, la plupart des méthodes utilisées dans ces dernières ne pourront pas y être appliquées et certaines différences majeures nécessitent un traitement spécifique de cette industrie. En effet, le volume des aéronefs en fin de vie reste par exemple très faible par rapport aux volumes des appareils électroniques ou des voitures en fin de vie et implique de trouver des solutions à une autre échelle. Par ailleurs, la valeur résiduelle des composants et des matériaux contenus dans les avions peut être très élevée, selon les technologies de démantèlement et de désassemblage utilisées; les aéronefs sont constitués d'alliages de haute qualité et de pièces de valeur marchande importante, comme les moteurs ou les trains d'atterrissage.

Entre volonté de respect de l'environnement, régulations et valeur potentielle, les motivations pour créer une filière de gestion efficace des avions en fin de vie sont bien présentes. Pourtant aujourd'hui encore beaucoup d'appareils mis au rebus sont entreposés dans des « cimetières d'avions » en attendant d'être traités, ou sont utilisés pour alimenter un marché noir de pièces détachées. En 2009, environ 2300 avions (ASCEND, 2009) commerciaux étaient stationnés dans de telles conditions, ce qui correspond à 11% de la flotte mondiale totale en opération. Environ 60% de ces appareils étaient immobilisés depuis plus de 2 ans, et après deux ans, la probabilité de remise en situation de vol chute à 5%. Ainsi, la majorité des avions actuellement

immobilisés en attente d'un acheteur ne voleront plus jamais, et devront donc être éliminés (Zitter, 2007). Par ailleurs, selon les estimations d'Airbus et Boeing, entre 6000 et 8000 avions commerciaux seront mis hors service dans les 20 années à venir, ce qui promet des volumes importants d'appareils à démanteler.

Pour être généralisée, la valorisation de ces aéronefs doit impérativement être économiquement attrayante, afin de donner naissance à un véritable secteur industriel où des entreprises peuvent naître, évoluer et faire progresser les méthodes et procédés. C'est pourquoi ce mémoire s'intéresse dans un premier temps à la façon dont les compagnies opèrent aujourd'hui les sites de démantèlement, puis dans un deuxième temps à un modèle d'allocation des ressources maximisant le profit d'une telle entreprise.

## **CHAPITRE 1 MISE EN CONTEXTE ET REVUE DE LITTÉRATURE**

Le démantèlement d'avions étant une industrie récente, les articles scientifiques sur ce sujet sont peu nombreux.

Dans la littérature concernant la fin de vie des produits, les études sont majoritairement effectuées par secteur. Il semble ainsi intéressant d'étudier comment sont traités les produits en fin de vie dans les autres industries. Ainsi, dans un premier temps, les travaux de recherche menés dans deux domaines significatifs, l'électronique et les véhicules en fin de vie (hors véhicules aériens), sont présentés, de même que les facteurs empêchant une application directe des résultats au cas de l'aéronautique. Dans un deuxième temps, les travaux réalisés d'une part sur les différents acteurs intervenant dans l'industrie du démantèlement d'avions, et d'autre part sur des activités connexes qui semblent indispensables à une bonne mise en contexte du sujet, sont développés.

### **1.1 Le traitement en fin de vie dans les autres industries**

#### **1.1.1 L'électronique**

Les produits électroniques dont il est question ici sont du type ordinateurs personnels, photocopieurs, appareils photos jetables, ou encore téléviseurs. Les déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE, en anglais Waste Electronic and Electrical Equipment WEEE) contiennent à la fois des métaux précieux (argent, or, palladium, cuivre et indium en particulier), en très faible quantité, et des matières dangereuses (mercure, cadmium, plomb notamment), ce qui rend un recyclage efficace intéressant tant d'un point de vue économique que d'un point de vue écologique. Les revenus du traitement en fin de vie proviennent de deux sources : la récupération des pièces d'une part (dans le cas d'un ordinateur personnel, les cartes mémoire et disques durs par exemple), et la récupération des métaux constitutifs d'autre part. Le niveau de désassemblage (c'est-à-dire la quantité de composants retirés avant recyclage) optimal

en termes de profit économique dépend du produit et des techniques utilisées. Un réseau de recyclage de produits électroniques comprend trois catégories d'acteurs principaux :

- Les sources, où seront collectés les produits en fin de vie
- Les recycleurs, qui réalisent le désassemblage et le tri des métaux
- Les fondeurs, qui traitent les matériaux une fois séparés

Parfois, les sources paient les recycleurs pour venir ramasser les appareils afin de se conformer aux réglementations en vigueur. C'est le cas des écrans d'ordinateurs à tubes cathodiques par exemple, pour lesquels l'élimination des matières dangereuses coûte cher. Pour des produits à haute valeur en fin de vie en revanche, comme les circuits imprimés (qui contiennent souvent des métaux précieux), le recycleur devient le client et paie la source pour collecter ces produits (Sodhi & Reimer, 2001) (voir Figure 1-1 Cheminement des produits électroniques en fin de vie).

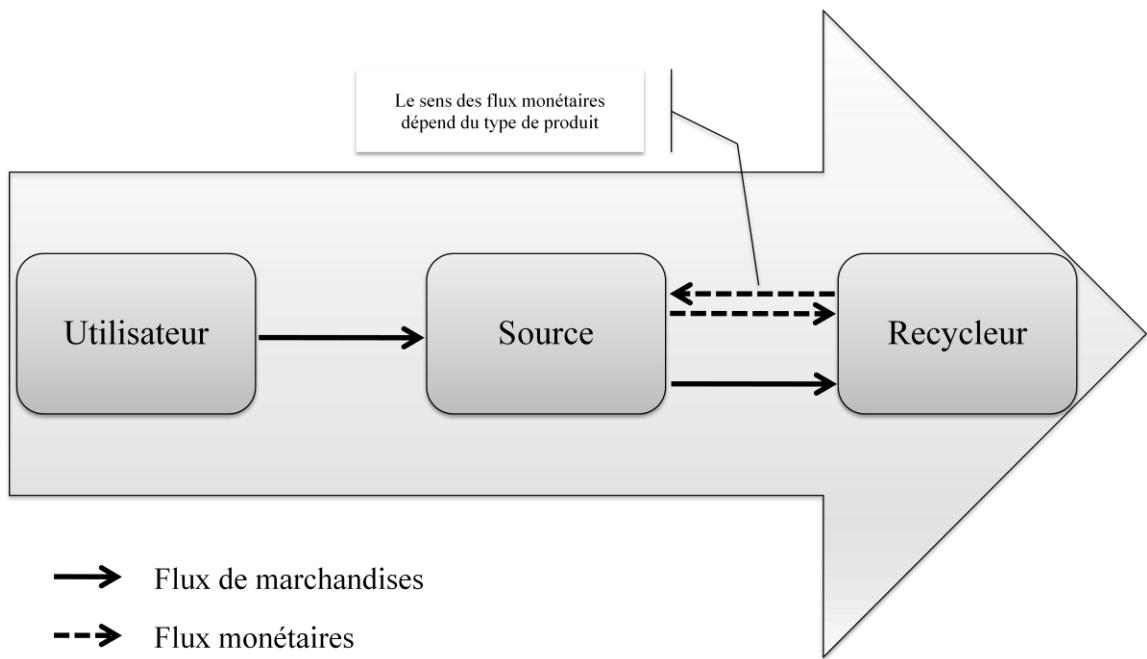


Figure 1-1 Cheminement des produits électroniques en fin de vie

De très nombreux pays ont déjà passé des législations concernant le traitement des appareils électroniques en fin de vie. À titre d'exemple, la directive WEEE en Europe, le programme AWARENESS (Advanced WEEE Recovery and Recycling Management System) en Finlande (Ylä-Mella, Pongrácz, & Keiski, 2004), LPUR (Law for the recycling of specific kinds of house appliances) au Japon, le RFMC (Recycling Fund Management Committee) à Taiwan, ou encore des lois dans certains états des États-Unis et certaines provinces du Canada en font partie. Ces deux dernières législations sont détaillées dans (Chung S.-W. & Murakami-Suzuki R., 2008).

### **1.1.2 L'automobile**

Jusqu'à l'année 2000, aucune législation ne régulait le sort des véhicules en fin de vie. Mais l'Europe manquant d'espace, et l'opinion publique acceptant de moins en moins les méthodes d'élimination traditionnelles de leurs véhicules en fin de vie, les sites de décharge devenaient donc de plus en plus rares et chers et suscitaient des préoccupations sur leurs effets nocifs sur l'environnement. Ainsi, l'Union Européenne (UE) a lancé en 1997 une réflexion sur le sort des véhicules hors d'usage (VHU). Suite à cela, une directive européenne sur le traitement des VHUs a été adoptée par l'UE en 2000. La directive (CE) n°2000/53 (European Commission, 2000) établit les exigences spécifiques pour la gestion des VHUs. Le principal objectif de la directive est, d'une part, de limiter les déchets issus des véhicules et, d'autre part, d'encourager la réutilisation, le recyclage et les autres formes de valorisation des VHUs et de leurs pièces détachées, afin de réduire le volume de déchets. La directive vise en outre à améliorer la performance environnementale de tous les agents économiques impliqués dans le cycle de vie des véhicules, et notamment des opérateurs directement concernés par le traitement des véhicules hors d'usage (European Commission, 2011). Les termes de la loi comprennent notamment l'obligation par les fabricants de véhicules de reprendre leurs véhicules en fin de vie, et de les traiter selon les normes imposées. En termes de chiffres, l'objectif affiché par la directive est d'arriver à une réutilisation ou une valorisation pour au moins 95 % des véhicules (y compris une valorisation énergétique) et une réutilisation ou un

recyclage au moins égal à 85 % à l'horizon 2015. Les annexes 2, et 3 présentent respectivement les graphiques sur la réutilisation et récupération des véhicules en Europe entre 2006-2008 et la réutilisation et le recyclage entre 2006-2008 en Europe. Il est encore tôt pour dresser des conclusions fermes sur l'efficacité de la législation en place, mais un rapport préliminaire publié en 2007 (Fergusson, 2007) donne les premiers résultats. Parmi les remarques principales, on note qu'il y a toujours une part importante de voitures illégalement abandonnées une fois les pièces de valeur récupérées, ce procédé étant moins coûteux que d'éliminer un véhicule selon les indications de la loi. Le coût semble actuellement être le frein le plus important à l'implémentation de cette directive. En outre, d'autres difficultés ont été relevées parmi les états membres de l'UE. Par exemple, des obstacles administratifs ont été rencontrés. En effet, certains points de la loi nécessitaient l'établissement de standards nationaux, tandis que d'autres touchaient des sujets généralement traités par les régions. Ce point pourrait également poser problème pour l'implantation d'une telle loi au Canada ou aux États-Unis par exemple. Par ailleurs, la loi impose aux fabricants de véhicules de prendre en charge le coût du traitement en fin de vie de leurs véhicules, y compris ceux actuellement en circulation. Or, si les manufacturiers acceptent d'appliquer la loi pour les véhicules mis sur le marché après la mise en place de la législation, ils sont beaucoup plus réticents à le faire en ce qui concerne les véhicules mis sur le marché avant.

Finalement, tous ces facteurs révèlent les difficultés de mise en place d'une telle loi. Le rapport conclut que l'Europe est dans la bonne direction, mais que les objectifs annoncés au moment de l'application de la loi seront à reculer de quelques années pour la plupart des états.

## 1.2 Gestion actuelle des avions en fin de vie

Avant d'aller plus loin, il est important de bien comprendre les étapes clés de la gestion d'un avion en fin de vie. Le processus de démantèlement complet est composé de plusieurs étapes. Dans un premier temps, une **dépollution** de l'appareil doit être effectuée : vidange du kérosène et des fluides, dégazage des réservoirs et dépose des

batteries, des éléments pyrotechniques, des matériaux électroniques et électriques (cuivre).

Ensuite, l'étape de désassemblage peut commencer. Le **désassemblage** (ou 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 (dits *réavionnables*), incluant les opérations de réparation et de recertification lorsque requis. Pour les membres de l'EASA (European Aviation Safety Agency, Agence Européenne de la Sécurité Aérienne), cette étape doit être réalisée par des ingénieurs certifiés EASA Part 145. La certification équivalente pour la FAA est FAR Part 145, et Part 571 pour la CAR (Canadian Aviation Regulation, Règlement de l'aviation canadienne). Des structures de maintenance ou de démantèlement d'avions situées à l'étranger doivent obtenir ces certifications si elles veulent travailler sur des appareils respectivement européens, américains ou canadiens. Les pièces retirées sont ensuite inspectées, confrontées avec leurs documents de suivi, puis certifiées dans un des trois états suivants :

- Réutilisables en l'état (*serviceable*)
- Réparables
- Irrécupérables

Les pièces réutilisables sont traitées dépendamment du modèle d'affaires de la compagnie (rendues au propriétaire ou revendues à d'autres clients).

Une fois le désassemblage terminé, le démantèlement est entamé. Le **démantèlement** consiste en un ensemble d'activités qui mènent à une mise en forme d'une part des matériaux valorisables en vue de les recycler, et d'autre part des déchets en vue de les éliminer (European Commission, 2009). Ce n'est qu'une fois cette seconde étape amorcée que la décision de mise au rebus de l'appareil est irréversible, l'avion ne pourra plus être remis en situation de vol (Kingsley-Jones, 2008). Dans cette étape, la structure restante après le désassemblage, comprenant notamment le fuselage, les ailes, ou encore

les empennages, aussi appelée cellule, est ensuite plus ou moins nettoyée (dépouillée des tapis, compartiments à bagages, parois plastiques intérieures, tissus variés, etc...) puis découpée. La ferraille obtenue est finalement **broyée** et triée avec différents niveaux de précision selon l'entreprise en charge, puis envoyée à des fonderies pour le recyclage final des métaux. La Figure 1-2 synthétise les différentes étapes de ce processus.

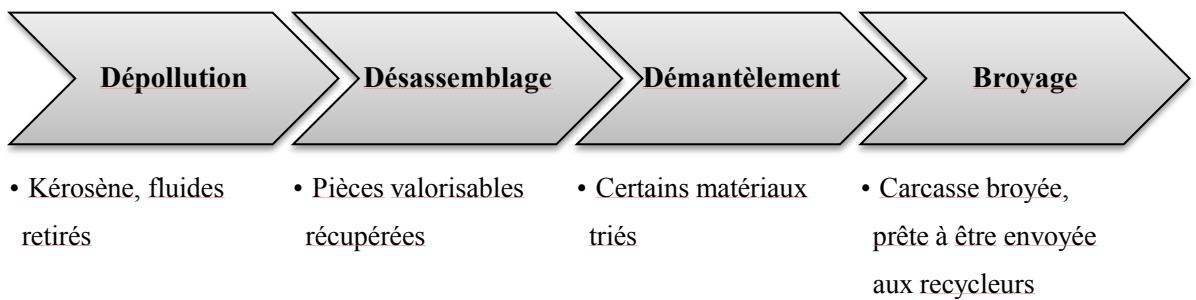


Figure 1-2 Étapes du traitement d'un avion en fin de vie

La majeure partie du métal récupéré est de l'aluminium. Même si un tri méticuleux mène à des alliages d'une qualité intéressante, l'aluminium collecté contient malgré tout des impuretés (restes de colles et peintures par exemple), ce qui rend à l'heure actuelle les alliages d'aluminium résultant de ce processus de recyclage difficilement réutilisables dans l'industrie aérospatiale, très exigeante en matière de pureté des alliages employés. Ils peuvent toutefois être réutilisés plus aisément dans d'autres secteurs comme l'automobile.

Ainsi, de la manipulation de pièces détachées au recyclage des métaux, des activités variées entrent en jeu dans le processus de démantèlement au complet, ce qui implique donc l'intervention de métiers et acteurs différents. Entreprises de traitement de déchets, propriétaires d'avions (il s'agit souvent de compagnies aériennes ou d'institutions financières), courtiers en pièces détachées (ou spécialistes en maintenance), fonderies pour le recyclage des métaux, ou encore institutions légales pour donner un cadre à ces activités, sont autant de parties prenantes intervenant dans la fin de vie d'un avion. Un

schéma résumant l'organisation de ces différents acteurs est présenté en Figure 1-3. Il a été réalisé selon les informations renseignées par les maisons mères des compagnies C et D, deux entreprises opérant un site de démantèlement d'avions (Latrémouille, 2009). Il est à noter que l'organisation peut varier selon les cas, certaines compagnies pouvant parfois réaliser plusieurs activités. Des exemples précis seront développés dans le Chapitre 1.

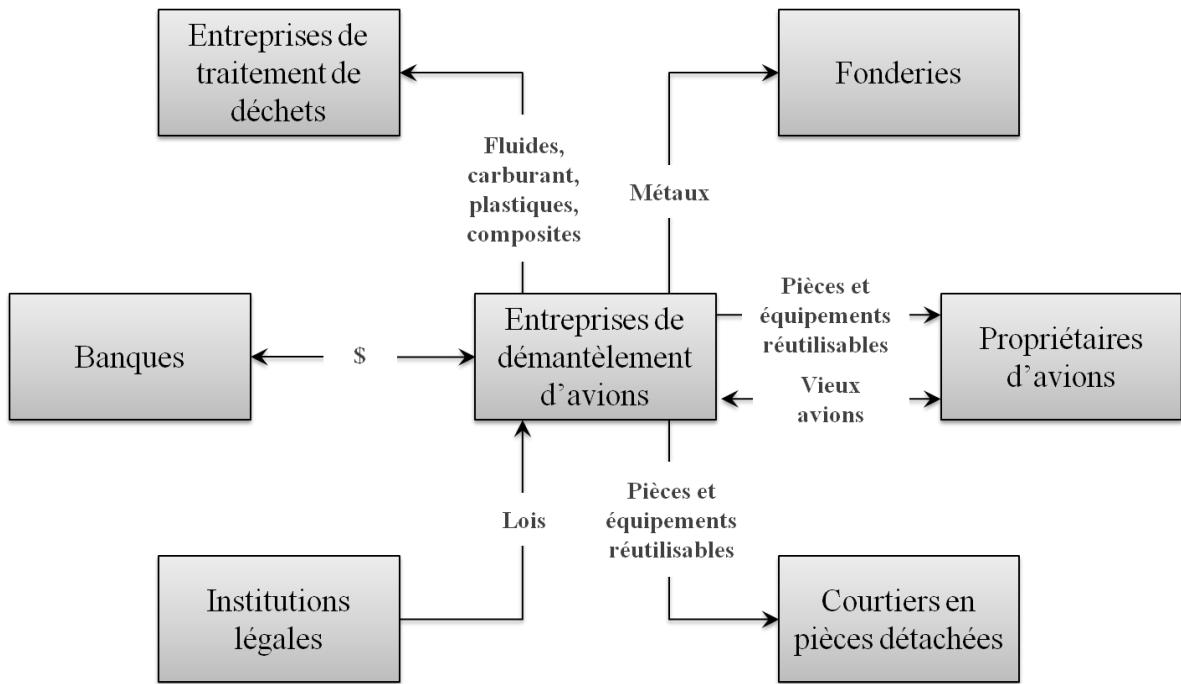


Figure 1-3 Acteurs impliqués dans le démantèlement d'un avion

La sous-section 1.3 décrit plus en détail les acteurs et activités majeurs impliqués dans le démantèlement d'avions.

## **1.3 Les acteurs et activités majeurs impliqués dans le démantèlement d'avions**

Les institutions légales donnent un cadre au démantèlement d'avions. Si cette activité est encore peu régulée, bon nombre d'éléments tendent à penser que cela est sur le point de changer. Le paragraphe 1.3.1 décrit ces éléments, ainsi que l'entrée en jeu des constructeurs aéronautiques qui en découle. Le paragraphe 1.3.2 présente l'Aircraft Fleet Recycling Association (AFRA), qui bien que n'ayant pour l'instant pas de statut légal, constitue à l'heure actuelle le principal organisme d'accréditation.

Par la suite, dans les paragraphes 1.3.3 et 1.3.4 sont exposés la littérature sur le séquencement de désassemblage, ainsi que les travaux concernant le recyclage de l'aluminium.

### **1.3.1 Les institutions légales et l'implication des constructeurs aéronautiques**

Les constructeurs aéronautiques jouent par essence un rôle prépondérant dans l'industrie du démantèlement d'avions: d'une part ils ont une connaissance parfaite de l'aéronef, ce qui est un atout majeur dans le choix d'une stratégie de démantèlement adaptée; d'autre part, dans le cas de l'éventuelle mise en place d'une loi régissant la gestion des avions en fin de vie, c'est probablement à eux qu'incomberait la tâche de veiller au sort de leurs appareils une fois hors service, si l'on compare à ce qui se passe dans l'industrie automobile avec la responsabilité élargie des producteurs (REP) (cf 1.1.2)

Le principe de la REP est une extension logique du principe « pollueur-payeur », sur lequel l'Organisation de Coopération et de Développement Économiques (OCDE) recommande à ses membres de fonder leur politique environnementale (OECD, 1972). En vertu de ce principe, qui vise à « internaliser les externalités environnementales », « les États devraient prendre les mesures nécessaires pour garantir que les pollueurs et les utilisateurs des ressources naturelles supportent les coûts environnementaux et

sociaux de leurs activités » (Hunter, Salzman, & Zelke, 2002). Afin de réduire l'impact environnemental généré par l'élimination des produits grand public, les décideurs souhaitent donc faire porter la responsabilité de ces coûts aux producteurs. Néanmoins, il convient de relever que l'approche de la REP varie en fonction des acteurs considérés (Atasu & Van Wassenhove, 2010). En effet, si l'on se place du côté des législateurs, l'objectif est de diminuer l'impact environnemental des produits visés par la loi, tout en minimisant les conséquences négatives au niveau socio-économique. En revanche, côté manufacturiers, le but poursuivi est bien souvent d'appliquer les méthodes les moins coûteuses permettant de se conformer à la loi. Ces divergences peuvent conduire à des désaccords sur les méthodes utilisées.

Dans l'optique de la REP, plusieurs pays ont déjà mis en place des lois de « récupération », imposant des restrictions aux fabricants concernant la fin de vie de leurs produits. Ceux-ci sont alors censés propager ces coûts dans les différentes étapes de la chaîne d'approvisionnement, et ainsi finalement facturer au consommateur le prix intégral de leur produit, comprenant la gestion de la fin de vie (Toffel, 2003). L'objectif de ces lois est d'inciter les producteurs à mettre en place les améliorations nécessaires dès la conception et la production (Toffel, 2004). Le principe de REP implique à la fois consommateur et le producteur : le premier se doit de retourner le produit usité, le second de le traiter (Forslind, 2005).

Avec l'émission d'un certain nombre de directives visant à accroître la responsabilité des producteurs à travers l'Europe, la Commission Européenne (CE) est très active en la matière. Voici quelques-unes des principales mesures déjà adoptées en Europe (European Union, 2008), (Union Européenne) :

- Emballages et déchets d'emballage (Packaging and Packaging Waste)
- Fin de vie des véhicules (End of Life Vehicles, EOL Vehicles)
- Restriction sur les substances dangereuses (Restriction of Hazardous Substances, RoHS)

- Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques (Waste Electrical and Electronic Equipment, WEEE)
- Enregistrement, Évaluation, Autorisation et Restriction Relatifs aux Substances Chimiques (Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals, REACH)

Ainsi, l'introduction par la CE d'une directive concernant le traitement des avions hors service est raisonnablement prévisible. Si en matière de lois sur le traitement des produits en fin de vie, l'Europe semble un peu en avance sur l'Amérique du Nord, ces derniers rattrapent peu à peu ce retard et la mise en place d'une telle directive pour les avions en Europe sans équivalent dans les autres continents est ainsi peu probable. Par ailleurs, l'étude des impacts économiques et environnementaux de la loi sur le traitement des véhicules en fin de vie pourrait constituer un indicateur pertinent sur l'efficacité d'une telle directive (Gerrard & Kandlikar, 2007). La mise en place d'une structure de démantèlement d'avions efficace est complexe et ne peut pas s'improviser. Ainsi, dans cette optique, les grands acteurs de l'industrie aéronautique se doivent d'être proactifs et de s'intéresser le plus tôt possible à ces problématiques afin de ne pas être surpris et dépourvus de solutions viables le moment venu.

### **1.3.2 L'Aircraft Fleet Recycling Association (AFRA)**

Aucune réglementation n'étant pour l'instant établie sur la gestion des avions en fin de vie, aucun standard n'a été adopté, et des organismes d'accréditation se mettent en place et tentent d'imposer leurs normes en tant que standard officiel. Ainsi, même si d'un point de vue purement législatif rien n'est obligatoire, un démanteleur aura plus de difficultés à être connu et reconnu s'il n'est pas accrédité. L'Aircraft Fleet Recycling Association (AFRA) est actuellement l'association fournissant une homologation sur le démantèlement des avions la plus importante dans le monde en termes de nombre de compagnies accréditées et de réputation.

L'AFRA est un consortium international constitué d'acteurs variés ayant un intérêt dans le démantèlement d'avions, notamment des fabricants de pièces détachées (Original Equipment Manufacturers, OEM), des compagnies de démantèlement, des courtiers en pièces détachées, des assureurs d'avions ou encore des recycleurs de plastiques et métaux. Lancée par le constructeur américain Boeing en 2006, l'association affiche l'objectif d'améliorer la gestion globale des avions en fin de vie (AFRA, 2007). Avec onze entreprises membres à ses débuts (dont Boeing), l'AFRA comportait 49 membres en janvier 2011 (AFRA, 2011b). Toute société ou tout groupe universitaire dont l'activité est liée au monde des avions en fin de vie ou des procédés de recyclage peut faire une demande d'adhésion. Cette organisation à but non lucratif vise à:

- Favoriser le retour des avions en service lorsque c'est possible
- Faciliter la collecte et la gestion respectueuse de l'environnement et sécuritaire des pièces d'avions en fin de vie, et
- Encourager la réutilisation des matériaux récupérés pour un usage commercial, à valeur maximale

L'AFRA est financée exclusivement par ses membres et les revenus de ses audits.

En août 2008, l'organisation a publié un « Guide de bonnes pratiques » (« Best Management Practice » (BMP)), pour la gestion des avions, sous-assemblages et pièces détachées usités, majoritairement axé sur le démantèlement de la cellule (ie. le fuselage, les atterrisseurs, la voilure (ailes et empennages)) et les éléments mobiles de la voilure (ailerons, gouvernes, volets), y compris les éléments aux fonctions combinées (aérofreins, spoilers, elevons et flaperons). Le guide s'articule en 45 pratiques couvrant tous les aspects du démantèlement et du recyclage. La version 2.0 du BMP, publiée en mai 2009, se focalise davantage sur les moteurs, qui sont les pièces dont la valeur est la plus importante. Le guide propose une définition claire et précise des conditions de navigabilité afin d'assurer la traçabilité des pièces et composants remis en service, ainsi que les conditions dans lesquelles, le cas échéant, ils sont rendus inutilisables (Beauclair, 2009). L'annexe 5 montre la table les matières du BMP version 2.0.

L'AFRA a également développé un **programme de certification**, en collaboration avec le Groupement des Fournisseurs de l'Industrie Aéronautique (Aviation Suppliers Association, ASA), établissant des normes minimales de performance pour les entreprises qui traitent les aéronefs hors service, et fournissant une évaluation par une tierce partie des entreprises de démantèlement. Afin d'obtenir cette accréditation, une compagnie candidate sera principalement auditee sur :

- Installations (caractéristiques de l'emplacement, respect des normes de sécurité)
- Formation des acteurs
- Documentation et papiers administratifs (comptes rendus des actifs et transactions en cours, manuels de référence)
- Équipements et outillage disponibles
- Gestion et suivi des pièces
- Recyclage et environnement (tri, traitement des déchets)

La conformité au guide des bonnes pratiques est un élément clé pour l'obtention de l'accréditation, détenue par 12 entreprises en janvier 2011 (AFRA, 2011a).

Actuellement, l'AFRA n'a aucune valeur juridique. L'association affirme cependant travailler en étroite collaboration avec les organismes de réglementation tels que l'Agence Européenne de la Sécurité Aérienne (AESA) et la Federal Aviation Agency (FAA) aux États-Unis, afin de faire reconnaître son guide de bonnes pratiques et de le faire adopter comme norme officielle de l'industrie (AFRA, 2009).

### 1.3.3 Recyclage de l'aluminium

La cellule métallique d'un avion est un mélange d'alliages d'aluminium, de zinc et de magnésium (ATE&M, 2007). Les aéronefs actuellement en service contiennent 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 est constitué de bois, d'isolant, de matières plastiques, de verre et de caoutchouc.

L'aluminium peut être issu soit directement du minerai (aluminium primaire), soit d'un processus de recyclage, à partir de ferraille (aluminium secondaire). Dans le premier cas, l'oxyde d'aluminium (aussi appelé alumine) est extrait de la bauxite. L'oxygène contenu dans l'alumine est alors retiré par des processus d'électrolyse (International Aluminum Institute, 2010). Cette fusion consomme une quantité importante d'énergie, génère des émissions dans l'eau et l'air ainsi que des déchets solides, et utilise des ressources naturelles (Reh, 2006). Les déchets d'aluminium gardent une valeur intrinsèque très significative, ce qui incite à le recycler. Par ailleurs, **la production d'aluminium secondaire ne nécessite que 5% de l'énergie utilisée pour l'aluminium primaire**. Les avantages économiques, sociaux et environnementaux sont majeurs (The Global Aluminum Recycling Committee, 2009).

Les alliages d'aluminium utilisés dans l'aéronautique sont majoritairement des alliages de corroyage (c'est-à-dire destinés à être transformés), et ont donc une faible tolérance aux impuretés (Riley & Makar, 1986). Les alliages des séries 2xxx et 7xxx sont les plus couramment utilisés, ils contiennent un taux relativement élevé de cuivre et de zinc, respectivement. Trois options peuvent être prises en considération pour la réutilisation des alliages d'aluminium provenant des aéronefs (Das, 2008):

- Réutilisation en **boucle fermée**, c'est-à-dire recyclage d'un alliage en ce même alliage en conservant les mêmes propriétés, dans l'industrie aéronautique.
- Recyclage de ces alliages toujours en **alliages de corroyages**, mais pour **d'autres industries** moins exigeantes sur la pureté des alliages, comme le transport (moteurs, boulons, radiateurs) ou la construction (ponts, bâtisses) notamment.
- Recyclage en **boucle ouverte**, c'est-à-dire transformation de ces alliages de corroyage en alliages de moulages.

Dans tous les cas, un recyclage rentable de ces alliages haute qualité reste aujourd'hui difficile à envisager : il est très coûteux d'obtenir des alliages purs à partir de l'aluminium issu de produits obsolètes, et le recyclage de l'aluminium à forte valeur

marchande entraîne donc une perte de valeur liée à une réutilisation dans la production d'alliages moins purs et moins dispendieux (Latrémouille, 2009). Ainsi, le recyclage des alliages d'aluminium de l'aéronautique représente un défi majeur, tant au niveau économique que social et environnemental. L'annexe 1 montre le cheminement des composants en aluminium d'un avion.

Si le recyclage de l'aluminium semble aujourd'hui difficilement performant, le désassemblage de l'avion prend toute son importance afin de rendre efficace le traitement des avions en fin de vie.

### **1.3.4 Séquencement de désassemblage**

Si l'on veut démanteler un avion de la meilleure façon possible (quelle que soit la priorité donnée à l'adjectif « meilleure » : économique, écologique, ou encore rapide par exemple), il faut déterminer les opérations de désassemblage à effectuer, ainsi que l'ordre dans lequel elles seront réalisées. En cela, les méthodes de détermination du désassemblage d'un avion seront similaires à celles utilisées pour d'autres produits; il paraît ainsi indispensable d'étudier la littérature concernant ces méthodes.

Une séquence de désassemblage est une représentation en réseau des différentes opérations de désassemblage admissibles. Par opérations de désassemblage, on entend séparation d'un assemblage en plusieurs sous-assemblages, ou bien rupture d'une ou plusieurs connections entre différents composants (Lambert & Gupta, 2005). Avant de déterminer la meilleure séquence, il faut identifier celles qui sont réalisables et admissibles. Elles seront déterminées en fonction de plusieurs critères, notamment (Schultmann, 2008):

- Le type de produit à démanteler
- Le matériel à disposition et les techniques applicables
- L'objectif prioritaire du démantèlement (respect de l'environnement, réutilisation en boucle fermée ou non, démantèlement rapide, peu dispendieux...)

- La connaissance des connections entre les différents composants
- La connaissance des relations de précédence

Il est important de noter que la détermination d'une séquence optimale de démantèlement peut varier dans le temps pour un même type de produit au sein d'une même compagnie de démantèlement, si l'un des facteurs précédents est modifié. On pourrait notamment penser à la non disponibilité de certains équipements parce que déjà utilisés pour démanteler un autre produit, un temps alloué plus court, ou encore l'état général du produit.

Actuellement, parmi les méthodes les plus efficaces pour établir la meilleure séquence de désassemblage, de nombreuses utilisent les algorithmes génétiques. (Seo, Park, & Jang, 2001), (Kongar & Gupta, 2006), (Giudice & Fargione, 2007), (McGovern & Gupta, 2007), (Duta, Filip, & Zamfirescu, 2008) ou encore (Hui, Dong, & Guanghong, 2008) ont proposé différentes solutions. Un avantage majeur de ces méthodes est qu'elles ne nécessitent pas d'hypothèses de linéarité, convexité ou différentiabilité (Keung, Ip, & Lee, 2001), ce qui favorise une définition du problème plus proche de la réalité. Les algorithmes de colonies de fourmis sont également largement utilisés ((Lu, Huang, Zheng, Fuh, & Wong, 2008), (Tripathi, Agrawal, Pandey, Shankar, & Tiwari, 2009) et (Ding, Feng, Tan, & Gao, 2010)).

Une fois la séquence de désassemblage à utiliser déterminée, la stratégie de démantèlement peut être mise en place. Des scénarios alternatifs de traitement en fin de vie doivent être identifiés à la fois aux niveaux **stratégique, tactique et opérationnel** (Schultmann, 2008). Le niveau stratégique (long terme) met l'accent sur la logistique inverse, notamment la localisation des infrastructures et la mise en place du réseau. Le niveau tactique (moyen terme) consiste à effectuer la planification et l'ordonnancement de la capacité, avec le programme directeur de production pour l'activité de démontage. Enfin, la partie opérationnelle (court terme) concerne l'ordonnancement détaillé et le contrôle de l'atelier.

En conclusion, s'il apparaît que des industries telles que l'automobile ou l'électronique grand public sont avancées en ce qui concerne le traitement en fin de vie, le secteur aéronautique quant à lui n'en est qu'au début de sa réflexion. Des initiatives ont déjà été lancées par différents acteurs, mais aucune méthode de désassemblage et démantèlement, à la fois respectueuse de l'environnement et économiquement rentable, n'a émergé pour l'instant. Les travaux effectués sur le recyclage de l'aluminium montre que les techniques actuelles ne permettent pas de recycler les alliages utilisés dans l'aéronautique en boucle fermée de façon économiquement viable.

Le Chapitre 1 présente et analyse les modèles d'affaires de cinq compagnies de démantèlement, et la façon dont celles-ci s'organisent autour des activités décrites précédemment. Le Chapitre 3 propose un modèle qui prendra en entrée les résultats produits par les résultats des travaux de recherche concernant le séquencement de désassemblage et le recyclage des métaux, dans le but de développer un outil d'aide à la décision pour une compagnie opérant un site de démantèlement.

## **CHAPITRE 2 COMPARAISON DE MODÈLES D'AFFAIRES DANS L'INDUSTRIE DU DÉMANTÈLEMENT AÉRONAUTIQUE**

Il n'existe encore que peu de compagnies réalisant du démantèlement d'avions, on peut en trouver quelques-unes œuvrant notamment aux États-Unis et en Europe. L'objectif de ce premier chapitre est d'établir dans quelle mesure un modèle d'affaires unique peut être identifié, ou le cas échéant de déterminer similitudes et disparités entre les différents modèles, et d'expliquer pourquoi une entreprise fonctionne selon un certain modèle d'affaires plutôt qu'un autre.

### **2.1 Méthodologie**

La première étape du travail était d'identifier des compagnies opérant des sites de démantèlement d'avions, et de les convaincre de prendre part au projet. L'étude de ces compagnies étant orientée sur leur modèle d'affaires, le sujet était épineux, et nous avons rencontré des problèmes de confidentialité. En raison du caractère très récent de l'industrie ciblée, le nombre d'acteurs en mesure de prendre part à l'étude se trouvait dès le départ assez restreint. L'identification des acteurs a été majoritairement réalisée par Julie Latrémoulle-Viau dans sa maîtrise recherche « Traitement en fin de vie des avions et valorisation de l'aluminium » (Latrémoulle, 2009).

Les plateformes de démantèlement actuellement les plus importantes dans le monde ont été ciblées, en termes de nombres d'avions démontés par an. Le choix a été limité aux compagnies opérant une plateforme physique, c'est-à-dire n'effectuant pas uniquement du démantèlement sur le site de son client. Pour chacune de ces plateformes, lorsque c'était possible, les vice-présidents et directeurs généraux des compagnies exploitantes ont été sollicités. Un questionnaire destiné à établir les données requises et orienter les discussions futures avec les parties prenantes a été mis en place.

Sept plateformes ont été contactées, cinq ont accepté de prendre part à l'étude. Par souci de confidentialité, elles seront appelées A, B, C, D et E dans la suite de ce mémoire.

Julie Latrémoille-Viau a pu visiter dans le cadre de sa maîtrise le site industriel de la compagnie D. Christian Mascle, codirecteur de cette maîtrise, s'est rendu sur le site de la compagnie E. J'ai pour ma part rencontré le PDG de la compagnie A, ainsi que ses employés sur leur site; et également visité la plateforme de démantèlement de la compagnie B où je me suis entretenue avec le PDG et un technicien. Finalement, sur les cinq entreprises contactées, seul le site la compagnie C n'a pas pu être visité. Le Tableau 2-1 Collecte des données résume les sources de la collecte d'informations.

Tableau 2-1 Collecte des données

<b>NOM DE LA COMPAGNIE</b>	<b>OBTENTION DES DONNÉES</b>	<b>CONTACTS AU SEIN DE LA COMPAGNIE</b>
<b>A</b>	Visite du site	Rencontre du PDG, des 2 gestionnaires de projet et de l'ingénieur commercial
<b>B</b>	Visite du site	Rencontre du PDG et d'un technicien
<b>C</b>	Échange de courriels	Communication avec le directeur technique
<b>D</b>	Visite du site	Rencontre avec le directeur - récupération
<b>E</b>	Visite du site	Rencontre avec différents acteurs

Dans tous les cas, les sites internet, articles de journaux et magazines, communiqués de presses et réseaux sociaux concernant les compagnies ont été consultés.

Une fois les acteurs impliqués dans le projet déterminés, les informations à récolter ont été plus précisément identifiées. Afin de comprendre au mieux le fonctionnement de l'industrie du démantèlement d'avions, plusieurs facettes du travail de ces entreprises, ainsi que les caractéristiques de la plateforme qu'ils opèrent, devaient être analysées. Les données recherchées peuvent être structurées comme suit :

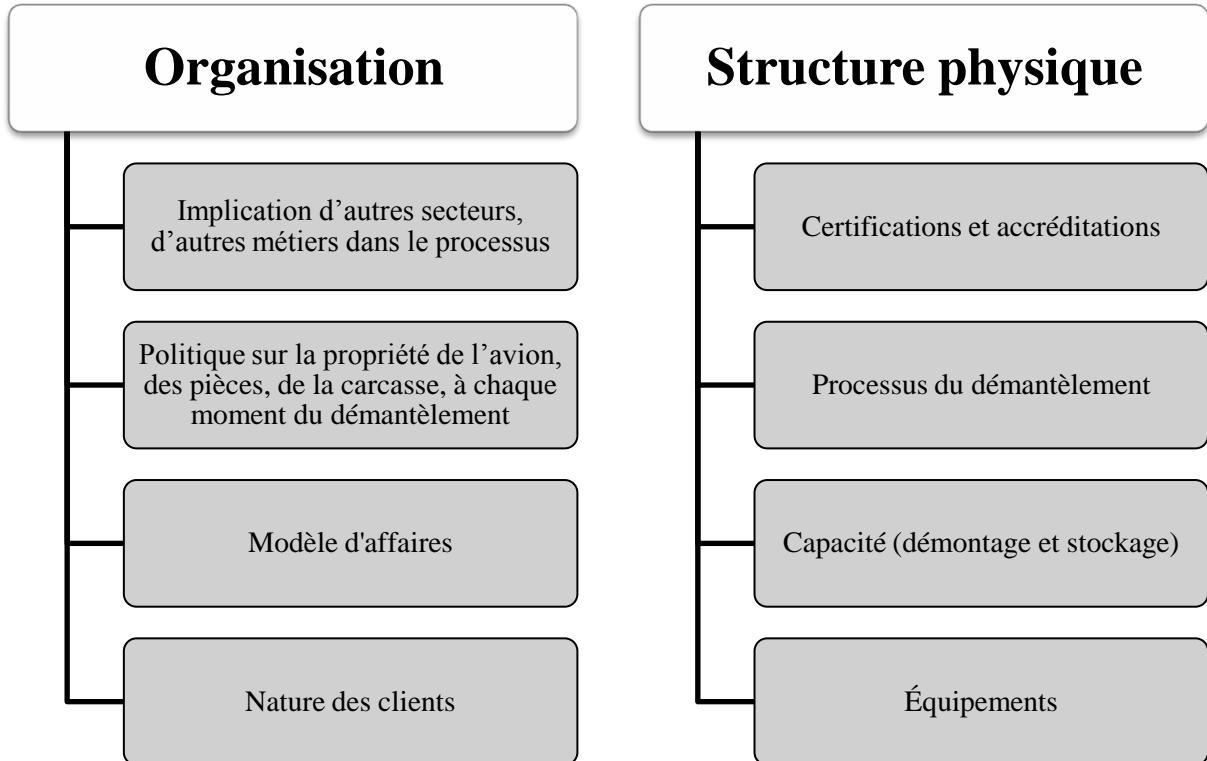


Figure 2-1 Récolte des données

À partir de cette trame, un questionnaire général a été établi. L'objectif du questionnaire était de constituer un point de départ et un fil directeur de la discussion. À cet égard, les visites sur sites ont été très fructueuses. En effet, les rencontres face à face avec les acteurs encouragent un dialogue moins formel, très instructif et enrichissant. Les personnes rencontrées de visu parlent plus aisément de leurs expériences. Les informations récoltées sont présentées en détail dans la section 2.2, « Résultats : modèles d'affaire dans l'industrie de la gestion des avions en fin de vie ».

Finalement, les données recueillies ont été analysées et comparées afin d'en dégager les modèles d'affaires, déterminer s'il en existait un unique ou dominant, et le cas échéant de comprendre les différences observées. La section 2.3 « Discussion : pourquoi un modèle d'affaires plutôt qu'un autre » expose les résultats de ces analyses. Un résumé de la méthodologie est présenté sur la Figure 2-2.

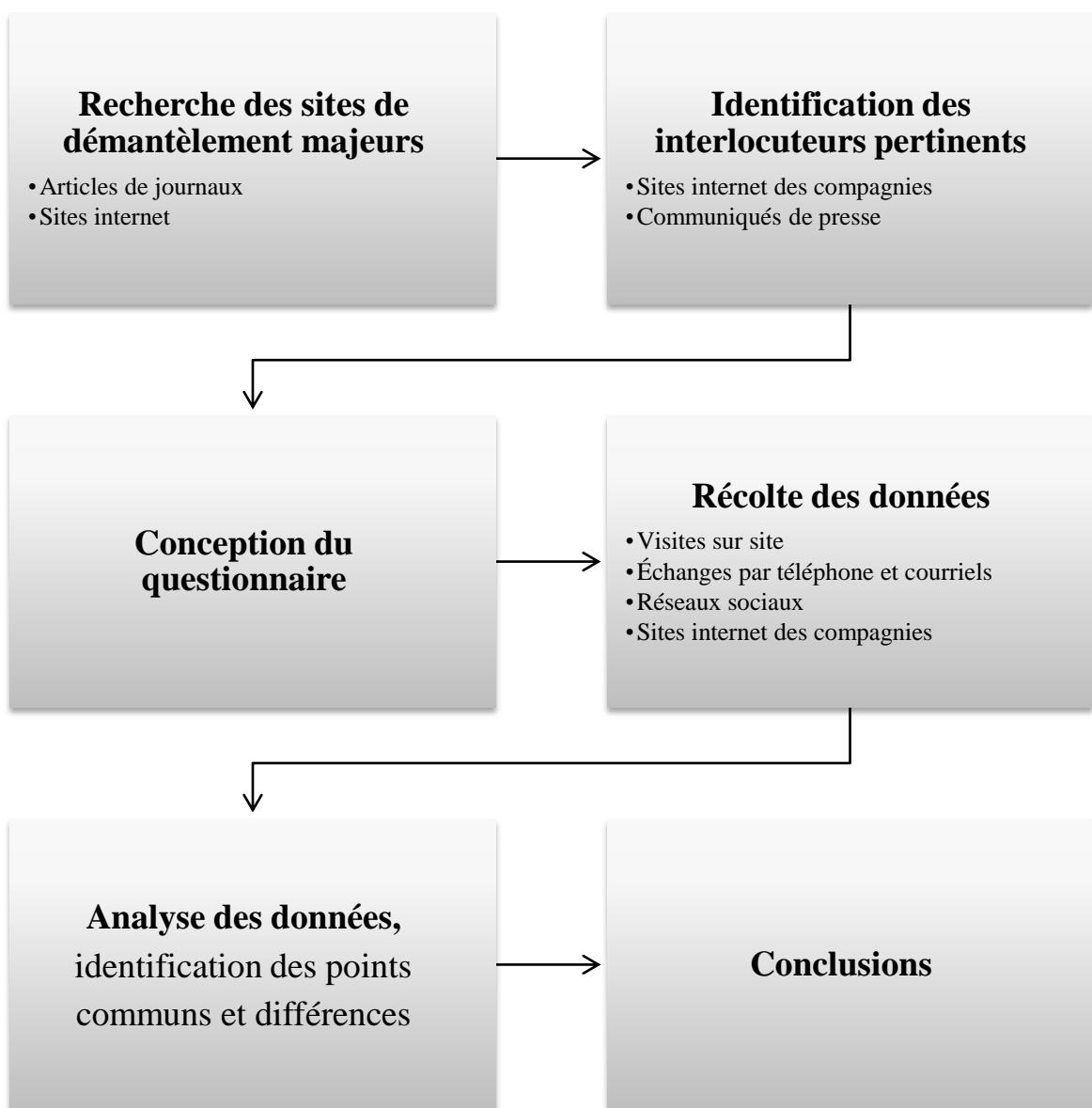


Figure 2-2 Méthodologie

## 2.2 Description des modèles d'affaires observés

L'information recueillie a permis de comprendre les différentes façons dont une plateforme de démantèlement d'avions peut être opérée. Dans cette partie sont relatées les caractéristiques majeures de chaque plateforme et de son exploitant. La contribution des entreprises étant sur une base volontaire, la quantité et la qualité des renseignements obtenus peut varier d'un cas à l'autre, dépendamment notamment de la politique de confidentialité.

### 2.2.1 La compagnie A

La compagnie A est une société néerlandaise qui désassemble et démantèle des avions dans le monde entier, depuis 2006. Les informations concernant la société ont été obtenues suite à un déplacement dans les bureaux de la compagnie ayant permis une rencontre avec le PDG et les trois employés. Le fondateur et PDG de la compagnie a fondé A suite à un M.Sc.A, effectué à l'Université de Technologie de Delft aux Pays Bas, sur le sujet « End-of-life aircraft : How to deal with an old aircraft withdrawn from service ». Dans sa thèse, réalisée en partenariat avec KLM engineering and maintenance, il étudie deux options de traitement en fin de vie pour un propriétaire : faire démanteler son appareil pour en vendre les pièces détachées, ou le stocker et chercher un acheteur potentiel pour l'avion en l'état. Bien qu'il m'ait accordé la chance de la consulter, pour des raisons de confidentialité avec KLM, cette thèse n'est pas rendue publique et il n'y sera donc pas fait référence dans ce mémoire. Elle a donné naissance à un outil d'aide à la décision, aujourd'hui toujours utilisé par la compagnie.

La compagnie A propose trois types de service :

- Aide à l'élaboration d'une stratégie de traitement de l'aéronef en fin de vie
- Désassemblage et démantèlement
- Gestion des pièces et équipements

Le premier vise à aider le client à décider du sort de son appareil en fin de vie : essayer de trouver un acheteur? Démanteler pour revendre les pièces? Pour cela, la compagnie utilise l'outil d'aide à la décision développé par le PDG, qui fournit une estimation du revenu engendré par chacune des options. Les coûts de stockage, de désassemblage, de re-certification de pièces, ainsi que les différentes recettes apportées par la vente de l'appareil ou des pièces sont évaluées. La compagnie rédige ensuite un rapport dans lequel les avantages et les inconvénients de chaque scénario sont confrontés, et détermine la solution qui semble être la plus intéressante. Lorsque cela s'avère être le démantèlement, le client peut ensuite choisir de confier la tâche à A, ou de récupérer son appareil. Les deux services ne sont pas liés, bien que la compagnie ayant suite à cette première étape une bonne connaissance de l'appareil, le client fasse souvent appel à A pour le démantèlement. Dans ce cas, deux options s'offrent à lui :

- Si l'appareil est encore en état de vol, il est transporté sur l'un des deux sites qu'exploite la compagnie A. Le marché européen se voit offrir le service à l'aéroport de Maastricht Aachen (Pays-Bas), tandis que les avions en provenance d'Amérique du Nord sont envoyés à l'aéroport de Gander, Terre Neuve (Canada).
- Si l'avion n'est plus en état de fonctionnement, pour cause par exemple d'un trop mauvais état général, d'un accident ou de la faillite du propriétaire, A offre également la possibilité d'effectuer le travail là où l'appareil est entreposé

Lorsque c'est possible, le recours au service de démantèlement sur l'un des sites de la compagnie A est à favoriser. En effet, lorsque la compagnie se déplace pour réaliser le travail sur le site du client, des partenaires industriels doivent être trouvés dans la région (notamment pour le traitement des déchets et la récupération du métal), et s'assurer que toutes les procédures mises en place sont conformes aux législations locales. De plus, l'implantation de l'organisation et des infrastructures nécessaires peut prendre du temps et s'avérer très dispendieuse, surtout si cela est fait pour un seul avion.

Chaque site ne peut démanteler qu'un avion à la fois, jusqu'à un A320 ou un B737 pour les plus gros. Il faut trois à cinq jours pour traiter un petit avion, tandis que jusqu'à trois semaines peuvent être requises pour des avions plus gros nécessitant de nombreuses manipulations (tri, découpe précise).

Les opérations de vidage du carburant et d'élimination des matières dangereuses sont d'abord exécutées, suivies par le retrait des pièces demandées par le client, effectué dans un hangar. Certains éléments (plastiques, cuivres) sont également extraits. L'appareil est ensuite transféré sur une plateforme en plein air où la carcasse restante est découpée en carrés d'un mètre de côté. Un premier tri est effectué par des mécaniciens qui mettent les morceaux dans différents conteneurs en fonction de leur composition. Ces conteneurs seront ensuite transportés vers un ramasseur de métal, une entreprise de transformation ou un ramasseur de plastique en fonction du matériau.

Une fois retirées de l'avion, le client peut récupérer les pièces en l'état, utiliser le service de re-certification ou bien le service de revente proposés par la compagnie A. Dans ces deux derniers cas, la compagnie se charge des différentes activités impliquées:

- **Vérification des documents de suivi** : comme mentionné plus haut, pour être vendues ou réutilisées, les pièces détachées doivent venir avec des documents permettant de retracer leur origine et leur parcours. La compagnie A peut déterminer dans quelle mesure le client dispose des documents nécessaires, se charger de les trier et, sur demande, de les faire re-certifier
- **Logistique**: les pièces sont fragiles et nécessitent un emballage et un soin particulier durant la manipulation et le transport entre la plate-forme de démantèlement et l'acheteur (ou le propriétaire). La compagnie dispose du savoir faire nécessaire au bon déroulement de cette étape
- **Marketing et ventes**: la compagnie A entretient un large réseau de partenaires, et est donc en mesure de faire pleinement profiter le propriétaire du marché des pièces détachées

Bien que la compagnie A puisse prendre en charge tout le circuit des pièces détachées de l'extraction à la revente, celles-ci restent la propriété du client tout au long du processus. Seul le service fourni est acheté. Toutefois, la compagnie achète quoi qu'il en soit la coque de l'avion, qu'elle revendra à des ramasseurs de métaux et à des recycleurs. La compagnie A est actuellement membre et accréditée de l'AFRA, et est dans le processus d'acquisition des normes ISO 9001 et ISO 14001. Le mode de fonctionnement de la compagnie est résumé dans la Figure 2-3

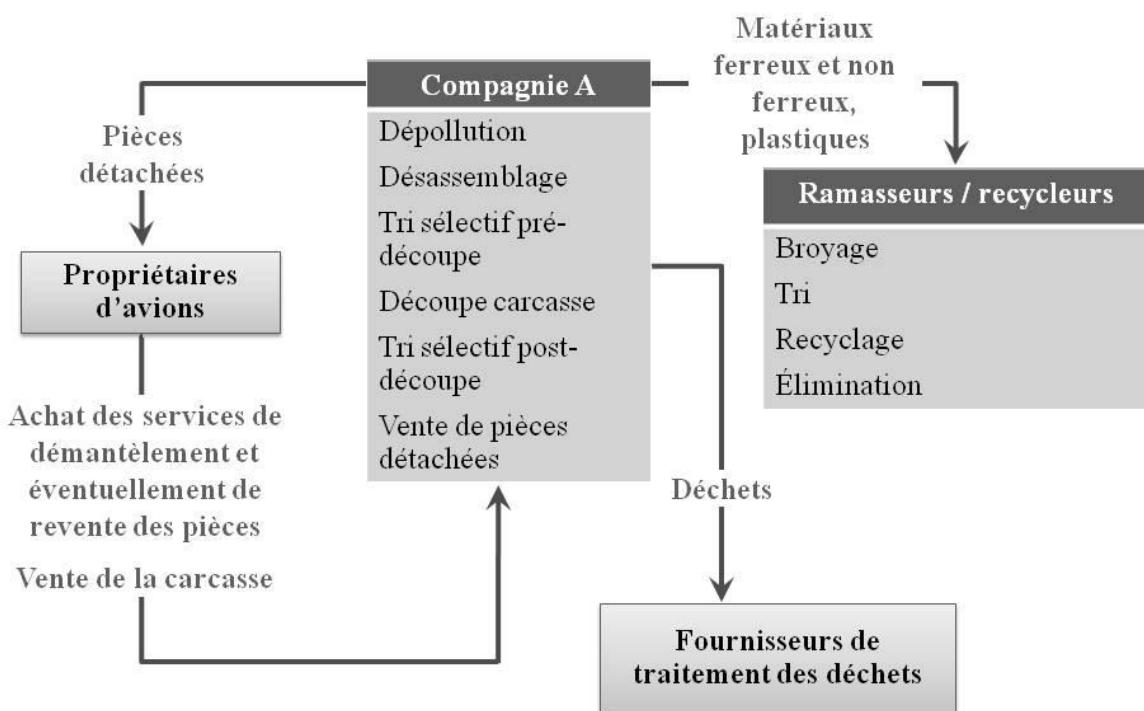


Figure 2-3 Modèle d'affaires de la compagnie A

## 2.2.2 La compagnie B

La compagnie B opère depuis 1994 trois sites de démantèlement aéronautique en Angleterre: (1) Lasham Airfield, situé à proximité du village Lasham dans le Hampshire,

(2) Kemble Airfield, dans le comté de Gloucestershire, (3) Alton Facility, Hampshire, tous conformes au standard EASA Part 145. La plateforme visitée est celle de Kemble Airfield. Comme la compagnie A, la compagnie B propose également de procéder au désassemblage et au démantèlement sur le site du client, si l'appareil ne peut pas rejoindre les plateformes de la compagnie.

B propose deux types de services majeurs :

- Stockage et maintenance
- Désassemblage et démantèlement

Il est à noter que la compagnie offre également d'autres services annexes. Elle fournit par exemple des avions, maquettes ou sections d'aéronefs à l'industrie cinématographique ainsi que des postes de pilotage complets, des intérieurs de cabines et des équipements divers pour les centres de formation de personnels navigants ou encore de services de secours.

20 avions peuvent être stockés à l'aérodrome de Lasham, et un avion peut être démonté à la fois. L'aérodrome de Kemble, peut accueillir 30 appareils et cinq peuvent y être démontés simultanément. Le site d'Alton quant à lui ne dispose pas de piste d'atterrissement, les avions doit y arriver par la route. Il y a huit espaces de stockage, et deux à trois aéronefs peuvent être démontés en même temps, un British Aerospace BAe146 pour le plus grand. Ces capacités sont regroupées dans le Tableau 2-2. En résumé, B a la capacité de démonter et de démanteler les 25 à 30 avions par an, chacun nécessitant quatre à douze semaines, en fonction de la taille et du modèle.

Tableau 2-2 Capacités de la compagnie B

SITE	CAPACITÉ DE STOCKAGE	CAPACITÉ DE DÉMONTAGE
<b>Lasham</b>	20	1
<b>Kemble</b>	30	5
<b>Alton</b>	8	2 à 3

Les pièces sont retirées à l'aide du manuel du constructeur, par des techniciens certifiés EASA-Part 145 puis emballées, prêtes à être envoyées ou directement collectées par le client. Celui-ci reste propriétaire de son avion durant tout le processus; il achète uniquement le service de démantèlement offert par la compagnie B, qui revend ensuite les débris métalliques à un ferrailleur. Les autres déchets sont gérés par une entreprise de traitement des déchets. B est certifiée ISO9001 et ISO14001, et est également accréditée AFRA. Son modèle d'affaires est résumé sur la Figure 2-4.

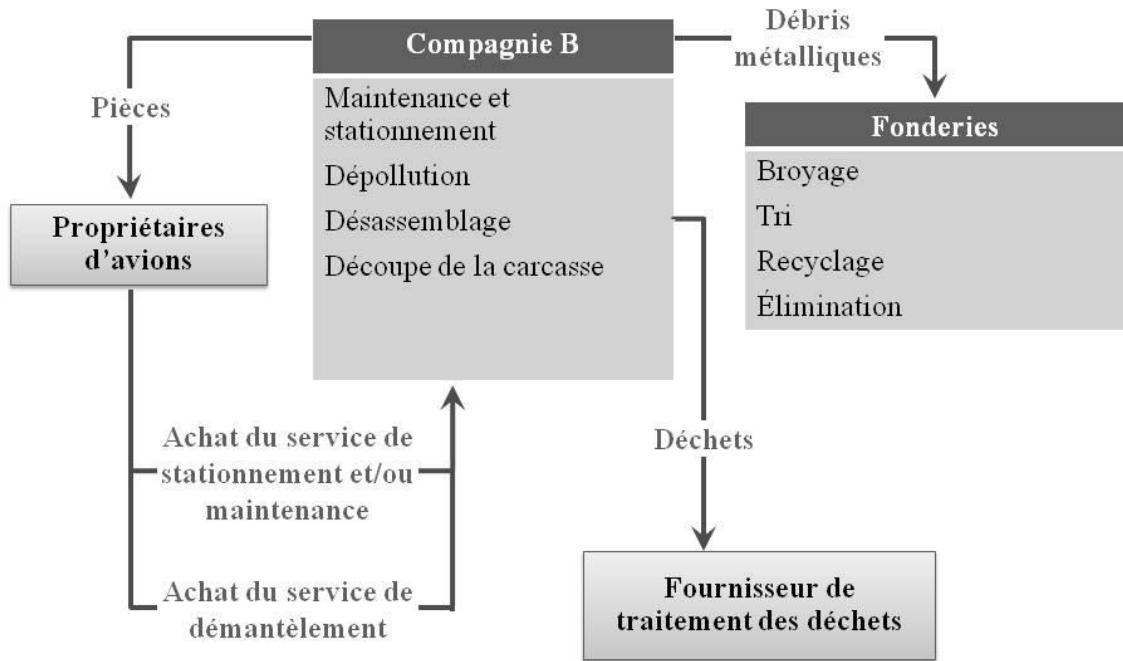


Figure 2-4 Modèle d'affaires de la compagnie B

### 2.2.3 La compagnie C

La compagnie C est une filiale d'une entreprise spécialisée dans le recyclage industriel (collecte et valorisation des déchets), elle-même filiale d'un leader mondial des services à l'environnement. La compagnie mère de C a créé en 2005 avec une entreprise partenaire (partenaire 1) spécialisée dans la maintenance aéronautique et membre de l'AFRA, la première plateforme de démantèlement d'avions en Europe à l'aéroport de Châteauroux-Déols (Châteauroux Air Center). Cette plateforme est opérée par la compagnie C.

Deux avions peuvent être démantelés simultanément sur ce site, tandis que 50 espaces de stationnement sont disponibles pour les avions en attente de démantèlement.

L'entreprise partenaire 1 prend en charge les étapes de dépollution de l'appareil et de retrait des pièces réavionnables qui sont affiliées à son cœur de métier, la maintenance. Les pièces sont ensuite vendues à une entreprise spécialisée dans la re-certification et la vente des pièces de rechange (partenaire 2). Enfin, c'est une autre filiale de la maison mère de la compagnie C (partenaire 3), dont l'expertise est dans le traitement de tous types de déchets, qui traite la préparation au recyclage (notamment le retrait des déchets non métalliques facilement accessibles comme les planchers), de la découpe de l'avion et de l'élimination des déchets.

Un propriétaire d'avion peut faire directement affaire avec la compagnie C. Dans ce cas, il vend à la fois l'avion et le droit de propriété à la société. Il a également la possibilité de passer par un revendeur de pièces détachées, qui pourra lui s'en remettre à C pour la gestion de la carcasse.

C détient les certifications ISO9001 et ISO14001, et est également conforme aux normes ICPE (Installation Classée pour la Protection de l'Environnement).

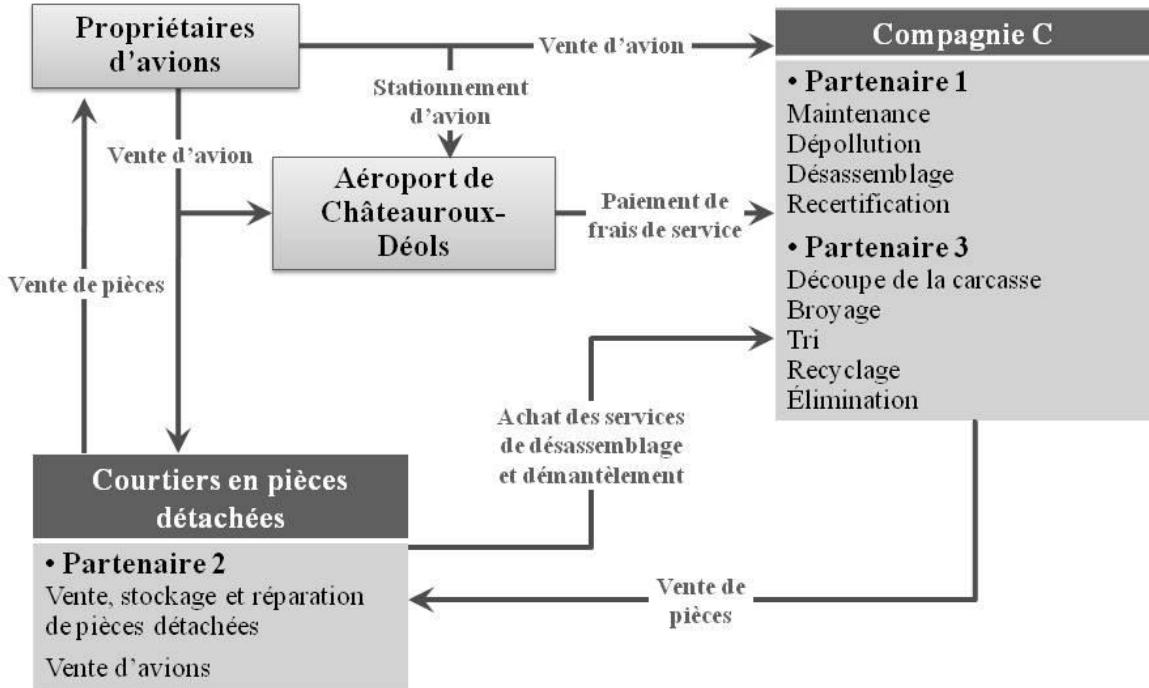
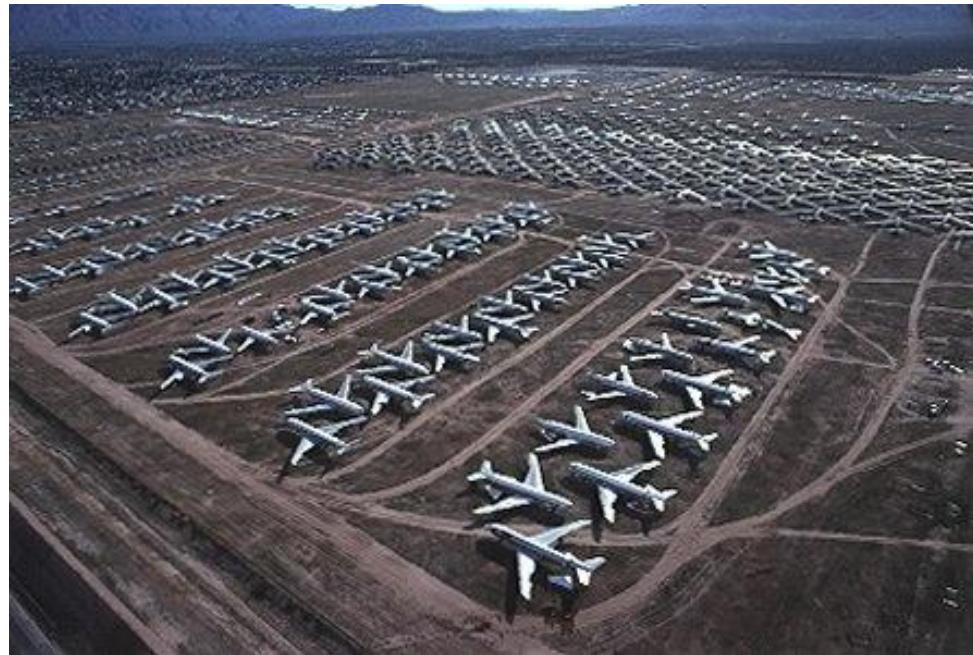


Figure 2-5 Modèle d'affaires de la compagnie C

## 2.2.4 La compagnie D

La maison mère de la compagnie D est une grande compagnie œuvrant dans le domaine des services de maintenance, de réparation et d'inspection d'avions. Cette entreprise, située en Arizona (États-Unis), est active au travers de plusieurs filiales. La compagnie D est l'une d'entre elles, spécialisée dans l'entreposage, la maintenance et le courtage d'avions, d'hélicoptères et de pièces détachées.

Le site, situé dans un endroit désertique, permet de stationner jusqu'à 300 avions et d'en démanteler quatre simultanément, de n'importe quel modèle. Il faut compter environ deux semaines pour un petit avion (type Boeing DC-9) et trois mois pour un B-747.



© Mark Wagner / Aviation-images.com

Photo 2-1 Photo du site de la compagnie D

Lorsqu'il fait appel à la compagnie D, un propriétaire d'avion a deux choix principaux :

- Acheter le service de démontage des pièces mais ne vendre que le reste de la carcasse à la compagnie
- Vendre l'avion et la totalité de ses pièces à la compagnie

Dans le premier cas, les pièces sont simplement retournées au client une fois enlevées. Dans le deuxième, une autre filiale de la maison mère de D, Filiale 2, se charge de les vendre ou de les louer. Quoi qu'il en soit, la carcasse est vendue à la compagnie D, qui la revend ensuite à un ferrailleur qui vient la broyer sur place et remporte les morceaux obtenus. Enfin, les déchets sont éliminés par la maison mère de D, qui dispose de l'expertise pour le faire.

D est certifiée FAA FAR Part 145, ISO9002, et est titulaire de l'accréditation AFRA. Son modèle d'affaires est représenté en Figure 2-6.

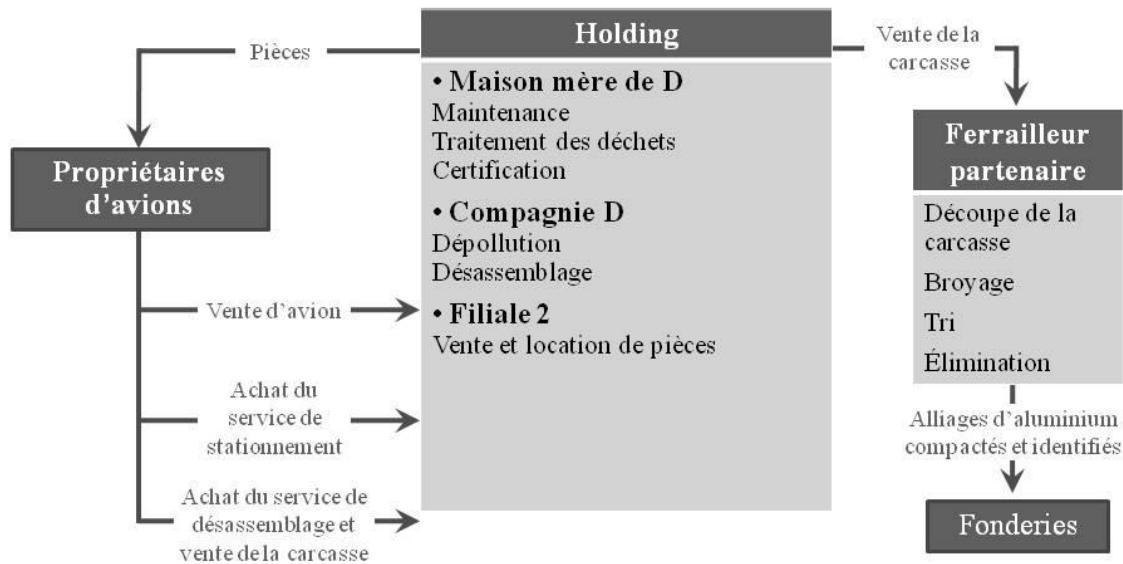


Figure 2-6 Modèle d'affaires de la compagnie D

## 2.2.5 La compagnie E

Comme il a été expliqué dans le paragraphe 1.3.1, les constructeurs aéronautiques montrent beaucoup d'intérêt pour la gestion des avions en fin de vie. Tous mettent en œuvre des stratégies pour développer un ensemble de bonnes pratiques, et idéalement de norme, pour procéder au démantèlement d'un avion en toute sécurité et dans le respect de l'environnement. Néanmoins, si l'on prend l'exemple des deux plus grands

mondiaux, leur approche du problème diffère beaucoup. La mise en place de l'AFRA par Boeing (cf paragraphe 1.3.2) montre que celui-ci n'a pour l'instant pas l'intention de démanteler des avions lui-même. À l'inverse, son concurrent européen Airbus souhaiterait opérer et s'imposer dans cette industrie. En Mars 2005, Airbus lance PAMELA (Project for Advanced Management of End of Life Aircraft, ou Procédé Innovant de Management des Avions en Fin de Vie), un projet de 3.3 millions d'euros sur 32 mois, financé en partie par l'Union Européenne (au travers de LIFE, L'Instrument Financier pour l'Environnement). Airbus s'associe à des partenaires dont les métiers sont complémentaires : construction aéronautique, traitement et valorisation des déchets, législateurs, etc. La compagnie travaille ainsi sur le projet avec les compagnies SITA France, EADS CCR, EADS SOGERMA SERVICES, ainsi que la Préfecture des Hautes-Pyrénées (division territoriale française). Le projet visait à déterminer la façon la plus sécuritaire et respectueuse de l'environnement de démanteler un aéronef, en particulier en réduisant au maximum la quantité de déchets enfouis, en s'assurant de la re-certification et d'un suivi efficace des pièces extraites réavionnables, et en triant les matériaux de sorte qu'ils puissent être réutilisés le plus possible dans l'industrie aéronautique, en boucle fermée. Voici plus particulièrement quelques-uns des objectifs affichés par Airbus:

- Servir de référence pour la mise en place d'une réglementation et d'une normalisation Européenne dans le domaine du stockage, du démontage, de la déconstruction et du recyclage ou de l'élimination des matériaux issus des avions,
- Protéger l'environnement,
- Participer au marché de revente des pièces détachées dans des conditions sécuritaires
- Se donner une image verte en montrant son approche globale sur le cycle de vie des produits
- Développer une expertise technologique dans le domaine,

- Générer des emplois et des gains financiers.

L'équipe PAMELA a travaillé sur un centre spécialement dédié à l'aéroport de Tarbes (France), sur un Airbus A300 entré en service en 1982 et ayant totalisé 53 489 heures de vol. Des procédures couvrant l'ensemble du processus de démantèlement ont été testées, à savoir le stockage, le désassemblage, le démantèlement, le recyclage des matériaux, et la gestion des déchets dangereux. Finalement, seuls 15% du poids de l'avion sont allés à l'enfouissement contre 45% avec les techniques actuelles. En outre, plus de 70% du poids de l'avion (après dépollution et vidange des réservoirs) ont été réutilisés directement (pièces détachées) ou recyclés en matières premières secondaires dans l'aéronautique ((Kingsley-Jones, 2008), (Pamela Life, 2008)). Le projet a ainsi démontré que l'impact environnemental associé au démantèlement des avions pouvait être considérablement réduit. L'annexe 4 montre les principaux chiffres publiés par Airbus concernant PAMELA.

Sur la base de ces résultats, Airbus a prolongé ce projet en une application industrielle. Avec cinq partenaires, il crée donc la compagnie E, qui propose différents services depuis sa mise en service en Février 2009 :

- Stationnement d'avions, en attente de vente sur le marché d'occasion ou pour être conservés en condition de vol,
- Désassemblage,
- Gestion et re-certification des équipements réutilisables, et
- Démantèlement

La plateforme dispose de six zones de stockage étanches en plein air, capables de recevoir jusqu'à 20 appareils, dépendamment de leur taille. La piste d'atterrissage et les voies de circulation peuvent faire transiter jusqu'à un Airbus A380-900. Un hangar est également dédié au stationnement et à l'entretien, entièrement équipé pour procéder aux opérations de maintenance, et pouvant accueillir le démantèlement d'un A380 ou de

quatre A320 simultanément. Environ trois mois sont nécessaires pour effectuer tout le processus de démantèlement.

Avant de procéder à la découpe de la carcasse, des ingénieurs expérimentés prennent une semaine pour effectuer une cartographie de l'avion à l'aide du manuel du fabricant et d'un spectrophotomètre, afin de localiser les différents types de matériaux desquels l'avion est composé. Le démantèlement est alors entièrement basé sur ces résultats.

La compagnie E offre différentes formules à ses clients : ils peuvent acheter uniquement le service de stationnement et de maintenance, ou bien le service de désassemblage et de démantèlement, et peuvent également profiter du réseau de la compagnie pour revendre leurs pièces. Il est à noter que l'activité de stationnement est aujourd'hui financièrement primordiale pour la compagnie E.

La plateforme est certifiée EASA Part 145 et classée ICPE.

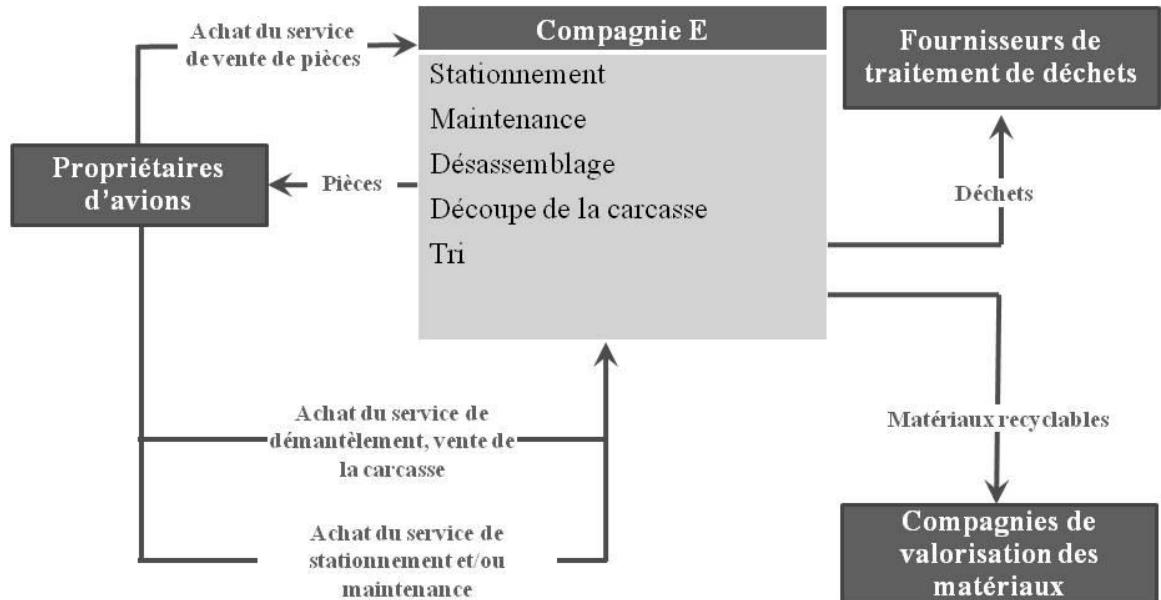


Figure 2-7 Modèle d'affaires de la compagnie E

### 2.3 Discussion : pourquoi un modèle d'affaires plutôt qu'un autre?

Cette étude a permis de comparer de nombreuses caractéristiques des différents modèles d'affaires pour l'industrie du démantèlement d'avions en fin de vie. La synthèse et l'analyse de ces résultats est présentée dans cette section.

Deux grandes activités sont réalisées dans le démantèlement d'avion, résultant en deux types de produits: d'une part le désassemblage qui fournit pièces et équipements réavionnables, et d'autre part le traitement de la carcasse restante d'autre part, qui donne lieu à des débris (majoritairement des alliages d'aluminium, mélangés avec des impuretés plus ou moins triées avant broyage). Une première approche dans l'objectif de comparer les modèles d'affaires de ces compagnies est d'étudier de plus près la façon dont chacune des entreprises sondées traite ces deux différents types de produits. Le Tableau 2-3 résume ces caractéristiques.

Tableau 2-3 Gestion des pièces détachées et de la pour les 5 entreprises étudiées

COMPAGNIE	PIÈCES ET ÉQUIPEMENTS	CARCASSE
A	<b>Démontés par A, restent la propriété du client, mais si requis A peut se charger de la vente</b>	<b>Broyé, triée, puis vendue</b>
B	<b>Démontés par B, rendus au client</b>	<b>Broyée puis vendue</b>
C	<b>Désassemblage confié à une autre compagnie</b>	<b>Broyée et triée par la maison mère de C</b>
D	<b>Démontés par D puis rendus au client ou vendus par la filiale 2</b>	<b>Vendue intacte à un sous-traitant qui la broie sur site et repart avec les débris</b>
E	<b>Démontés par E puis rendus au client ou vendus par E</b>	<b>Broyée, méticuleusement triée, puis vendue</b>

En première observation, il apparaît qu'il n'y a pas d'unique « combinaison type ». Les pièces et équipements peuvent être rendus au client ou vendus par la compagnie, et indépendamment de cela, la carcasse broyée (et éventuellement triée) en interne ou revendue telle quelle.

Le Tableau 2-3 met en évidence la façon dont les différentes compagnies orientent leur travail autour des activités de désassemblage des pièces et de démantèlement de la carcasse.

Dans le cas de D par exemple, la compagnie se charge elle-même de la gestion des pièces et équipements (retrait et, si besoin est, revente par le biais de la filiale spécialisée), mais ne s'occupe pas de la carcasse vidée, qu'elle revend telle quelle à un ferrailleur.

La compagnie C, à l'inverse, se concentre sur le broyage et le tri de la carcasse, que sa maison mère réalise. Par contre, les pièces sont retirées par une entreprise extérieure.

Enfin, les trois autres démanteleurs étudiés retirent (et éventuellement revendent) eux-mêmes les pièces, et se chargent également du démantèlement de la carcasse (avec un tri plus ou moins évolué). Trois modèles d'affaires possibles ressortent alors de cette étude pour une compagnie opérant un site de démantèlement d'avions. Ils sont présentés et analysés dans les sections 2.3.1 Priorité : gestion des pièces et équipements, 2.3.2 Priorité : démantèlement de la carcasse et 2.3.3 Législation et questions environnementales.

Il est intéressant de noter que dans tous les cas, les compagnies de démantèlement doivent être en mesure de fournir à leur client la totalité du service de traitement de l'avion en fin de vie, quelle que soit son cœur de métier. Ainsi, les compagnies qui ne réalisent pas l'une ou l'autre des deux activités s'associent avec des partenaires.

### **2.3.1 Priorité : gestion des pièces et équipements**

### 2.3.1.1 Justification du modèle d'affaires

La première famille de modèles d'affaires analysée concerne les démanteneurs orientés vers les activités d'extraction et de revente des pièces détachées et équipements. Tout d'abord, il est à noter que quatre des cinq compagnies étudiées retirent elles-mêmes les pièces détachées demandées par le client : A, B, D et E. Parmi celles-ci, seule B ne propose pas de service revente des pièces récupérées.

À l'instar de nombreuses industries, le marché des pièces détachées se révèle être très rentable (Suomala, Sievänen, & Paranko, 2002), comme l'ont confirmé les différents acteurs contactés. Pour certains types d'aéronefs, la vente séparée des pièces réutilisables est même financièrement plus intéressante que la vente de l'avion dans son ensemble (De Brito, 2007). Certains avions n'ayant pas atteint la moitié de leur espérance de vie peuvent parfois être mis au rebus, pour la simple raison que la valeur qu'il est possible de retirer de ces pièces détachées est plus importante que le bénéfice de son opération. En effet, un modèle aéronef encore jeune signifie que beaucoup d'exemplaires similaires sont encore en état de vol, et qu'il y a donc une demande importante pour les pièces détachées, et une offre assez faible en pièces d'occasion.

Mais l'implication dans le courtage en pièces détachées nécessite un savoir-faire, des installations, des ingénieurs qualifiés et certifiés ainsi qu'un réseau de partenaires, de clients et de fournisseurs bien développé. L'existence d'un réseau d'experts dans ce domaine est essentielle pour le secteur aéronautique. En effet, l'une des principales préoccupations des OEM est le marché noir des pièces détachées. Des composants illégalement récupérés (par exemple après avoir été jetés car déclarés inutilisables ou trop vieux, mais pas suffisamment détruits pour les rendre inexploitables) avec une documentation falsifiée regagnent les circuits de pièces des rechange, se vendent à des prix bradés et se retrouvent dans les flottes aériennes. Cette pratique est un fléau pour tous les acteurs du domaine aéronautique, qui ne tarit pas aujourd'hui avec la tendance des compagnies à externaliser leur maintenance, et donc à avoir de plus en plus de mal à contrôler parfaitement les pièces qui circulent sur leurs appareils. Des préoccupations

majeures évidentes concernent la sécurité des utilisateurs de l'aéronef. Outre cela, OEM et détenteurs du Parts Manufacturer Approval (PMA, autorisation accordée par la FAA à une compagnie de produire des pièces de remplacement sans l'accord du constructeur de l'appareil) perdent illégitimement des parts de marché importantes, les fabricants et opérateurs d'avions doivent changer ces pièces de qualité bien inférieure plus souvent, ils font également face à de gros problèmes d'image de marque si un incident se produit. Ainsi, afin de prévenir la croissance de ce marché, les pièces doivent être très rigoureusement contrôlées.

Un premier tri doit être effectué, séparant les pièces pouvant être réutilisées sur un avion de celles à récupérer pour leurs matériaux constitutifs. Les pièces décrétées non réavionnables doivent être irrémédiablement détruites afin d'éviter toute récupération intempestive. Les pièces destinées à revoler doivent subir toutes les vérifications concernant les documents de vol, ainsi que les réparations nécessaires. Un nouveau propriétaire est ensuite cherché, ce pour quoi un réseau bien développé est fondamental. Enfin, les aspects logistiques sont abordés : ces pièces étant fragiles, leur transport et leur manipulation requièrent un soin particulier. Néanmoins, l'ordre de ces étapes n'est pas immuable : en effet, le démontage de l'avion peut également être tiré par la demande en pièces détachées, c'est-à-dire qu'on n'enlève une pièce d'un avion en fin de vie qu'une fois qu'on en a trouvé un acquéreur. Les problématiques rencontrées sont dans ce cas similaires à celles du domaine de l'automobile, en tant que gestion d'une flotte d'avions au sol.

L'absence des capacités décrites ci-dessus pourrait expliquer le choix de B de ne pas s'impliquer dans la revente des pièces détachées. Le PDG de la compagnie a également donné lors d'une rencontre sur son site une autre explication. Il affirme que sa présence sur le marché des pièces détachées risquerait de générer des conflits d'intérêt avec ses clients. Il mentionne la difficulté de satisfaire à la fois l'objectif du propriétaire d'avions qui souhaite vendre ses pièces au prix le plus haut, et celui du courtier en pièces détachées, qui cherche à obtenir des pièces les moins chères possibles pour les revendre plus chères.

Pour les compagnies restituant les pièces au client, comme B, la question du choix des pièces à retirer ne se pose pas : elles se plient à la demande du client, le reste de la carcasse est broyé indépendamment de ce qu'il reste à l'intérieur. Ces demandes peuvent être très variables en fonction de la nature du client. Par exemple, une compagnie aérienne voudra probablement récupérer le plus d'équipements possibles afin d'alimenter la maintenance de sa flotte. À l'inverse, un établissement financier cherchera plutôt à récupérer les fonds le plus rapidement possible, et ainsi pourra ne demander uniquement le retrait des pièces les plus importantes et dont la valeur est la plus élevée.

Pour les entreprises qui pratiquent également le courtage des pièces retirées, le choix des pièces à enlever de l'appareil avant démolition prend tout son sens. Certaines pièces ne présentent pas de doute, la revente sera rentable. Parmi elles, il y a évidemment les moteurs, qui peuvent constituer 80% de la valeur de l'appareil en fin de vie; les trains d'atterrissement ou encore l'avionique dont il est possible de retirer 1.5 millions de dollars. Mais pour les autres, comment savoir à partir de quel moment les pièces restantes ne valent pas le coup d'être démontées et que la carcasse peut être broyée? Le choix n'est pas toujours laissé au démanteleur. En effet, certains clients imposeront les pièces à démonter et celles à broyer, même s'ils laissent ensuite au démanteleur le soin de se débarrasser de la carcasse. Ceci s'explique par une volonté de contrôler le marché des pièces détachées. En effet, si le client est lui-même courtier en pièces détachées et qu'il ne souhaite pas récupérer une certaine pièce parce qu'il estime en disposer d'un nombre suffisant, il ne voudra pas non plus qu'elle soit mise sur le marché et concurrence potentiellement son propre stock. Le démanteleur sera alors dans l'obligation de la détruire même s'il estimait pouvoir en tirer un certain profit.

Dans le cas où le choix des pièces à retirer est laissé au démanteleur, il est difficile d'obtenir de l'information sur les facteurs influençant cette décision. Il semble que l'expérience soit pour l'instant le meilleur outil permettant de juger si le retrait d'une pièce peut être économiquement intéressant.

Finalement, il apparaît que le marché des pièces détachées semble être d'une part très rentable, mais d'autre part exigeant d'un point de vue réglementaire et stratégique, dans lequel il peut être difficile de s'insérer. Le cas de la compagnie D, seule compagnie réalisant uniquement l'étape de retrait et de revente des pièces, est significatif. Le métier d'origine de la compagnie est le courtage d'avions et de pièces détachées, elle dispose donc des infrastructures et du réseau nécessaire pour revendre pièces et équipements. L'entreprise a ainsi probablement vu dans le démantèlement d'avions un nouveau moyen d'obtenir des pièces détachées pour alimenter son activité. C'est pourquoi elle ne prend pas en charge la partie de démantèlement de la carcasse.

### 2.3.1.2 Pistes d'amélioration

L'activité concernant les pièces détachées peut se décomposer en deux parties : le désassemblage à proprement parler, et la gestion des pièces récupérées. Concernant la première, les discussions avec les compagnies de démantèlement ont montré qu'elles retirent la plupart du temps que les pièces requises par le client, ce qui ne laisse guère de marge de manœuvre. Pour les courtiers en pièces détachées, la gestion des pièces récupérées présente en revanche un potentiel d'amélioration. La compagnie peut fonctionner à la fois en flux tiré et en flux poussé. En effet, certaines pièces jouissent d'une demande très importante, et l'on peut considérer que la compagnie doit les gérer en flux tiré. Il s'agit soit des pièces dites « rotables » (pièces qui doivent être changées fréquemment sur un avion), soit des pièces pour des appareils dont de nombreux modèles sont encore en vol. À l'inverse, pour les pièces dont la demande est plus rare, la compagnie se retrouve dans un mode de gestion en flux poussé : la compagnie reçoit un avion qu'elle se doit de démanteler, même si les pièces sont plus difficiles à vendre. Cette gestion des pièces détachées est tout à fait similaire à ce qui se fait dans l'industrie automobile. Or, comme il a été présenté dans le paragraphe 1.1.2, le traitement des véhicules en fin de vie est régulé (notamment en Europe) depuis plusieurs années déjà, ce qui implique une certaine expérience dans le domaine. Ainsi, des méthodes analogues à cette industrie pourraient être utilisées.

### 2.3.2 Priorité : démantèlement de la carcasse

Le premier type de modèle d'affaires, centré sur le désassemblage et la gestion des pièces détachées ayant été développé, ce paragraphe s'intéresse à une deuxième famille de modèles d'affaires, pour les compagnies dont le cœur de métier se situe dans le démantèlement de la carcasse.

#### 2.3.2.1 Justification du modèle d'affaires

En termes d'ordres de grandeur, il est possible de retirer d'un avion en fin de vie plusieurs millions de dollars en pièces détachées. Par ailleurs, la masse de carcasse à broyer peut être estimée selon le PDG de la compagnie A, par 50% de la masse à vide en ordre d'exploitation (Operating Empty Weight, OEW), c'est-à-dire la masse incluant l'appareil et l'équipage, mais pas sa charge utile (passagers et fret), ni le kérosène. Pour un Boeing 747-400, dont le premier modèle a été livré en 1989 et le dernier en 2009 (ce qui en fait un bon candidat pour une arrivée en fin de vie progressive dans les années à venir), l'OEW est d'environ 200 tonnes (Boeing, 2002). En première approximation, 100 tonnes de carcasse broyée peuvent donc être récupérées. La valeur retirée de ces 100 tonnes dépendra de nombreux facteurs, notamment des techniques de tri, des équipements utilisés et du cours des matières premières. Néanmoins, schématiquement, la carcasse étant majoritairement constituée d'aluminium, la valeur que le démanteleur peut retirer d'une tonne de carcasse peut être approximée par le prix de l'aluminium à la tonne (indice de référence sur le marché européen London Metal Exchange par exemple, voir (London Metal Exchange, 2011)) diminué des coûts suivants :

- broyage de l'avion
- logistique du site de broyage à l'usine de recyclage
- tri réalisé par l'usine de recyclage
- refonte des métaux
- marges bénéficiaires pour les différents acteurs intervenant dans le processus

Ceci est schématisé en Figure 2-8.

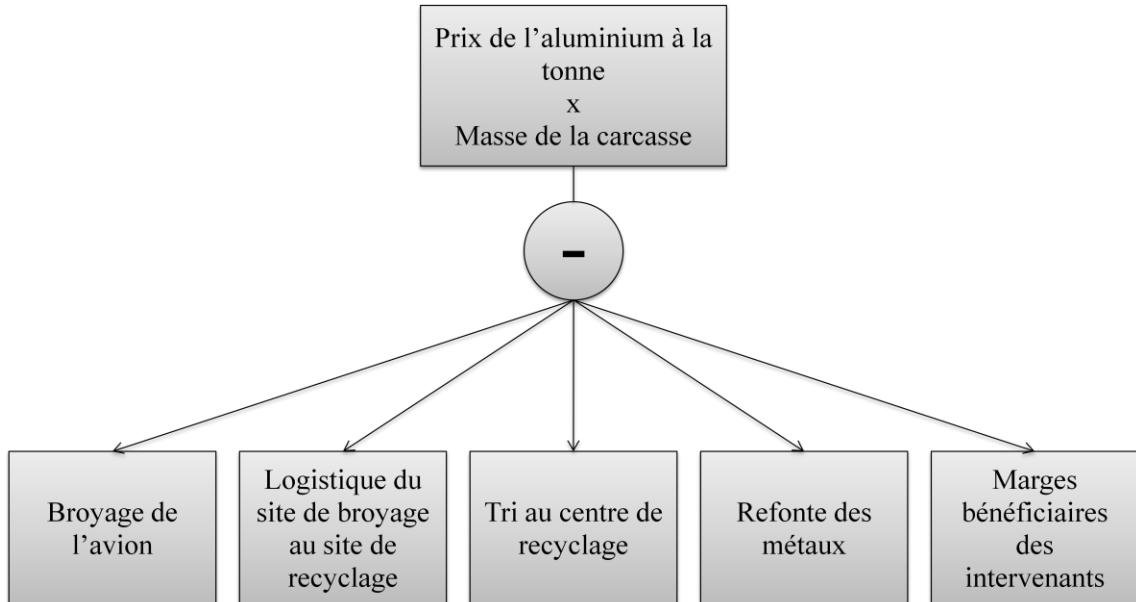


Figure 2-8 Valeur qu'il est possible de retirer de la carcasse d'un avion en fin de vie

Même en ne considérant que le prix de revente de l'aluminium (actuellement environ 2 000 \$ la tonne (London Metal Exchange, 2011)), une telle carcasse ne rapporterait qu'environ 200 000 \$. Soit plus de dix fois moins que les pièces détachées. Ainsi, les propriétaires d'avions n'attachent que peu d'importance à ce qui reste de leur appareil une fois dépouillés de leurs équipements réavionnables. Le PDG de la compagnie B a même stipulé lors d'une rencontre que la recette apportée par la seule vente d'une carcasse d'avion broyé ne suffisait pas à couvrir les coûts de traitement en fin de vie (coûts de broyage et de logistique) pour son propriétaire. À l'heure actuelle où aucune législation ne régit la fin de vie des avions, et n'oblige pas les fabricants à les récupérer, pour rendre économiquement attractif le processus de gestion en fin de vie d'un avion pour son propriétaire, celui-ci doit donc pouvoir en récupérer des pièces détachées.

Malgré tout, les entreprises de démantèlement doivent se débarrasser de cette carcasse à moindre coût, tout en minimisant l'impact environnemental et en réalisant un profit maximum. Afin de trouver le meilleur recycleur, le démanteleur réalise des appels

d'offre auprès de différentes usines. D'après le PDG de A, les recycleurs offrent généralement un prix de rachat du métal dépendant d'une estimation de la masse de chaque type de métal (aluminium, acier...) traité qu'ils pourront obtenir en sortie de leur usine. Ainsi, en fonction de la composition de son avion broyé, le démanseleur détermine le recycleur le plus offrant.

En dépit du faible attrait économique apparent du broyage du corps de l'avion, certains démanseleurs en ont fait leur activité centrale, comme la compagnie C, ce qui implique qu'il est tout à fait possible d'en tirer profit. La recette obtenue à partir de la carcasse dépend très fortement de l'efficacité de l'usine de recyclage (et donc probablement des volumes traités). Deux solutions permettant à un démanseleur de faire du broyage de la carcasse une activité rentable apparaissent:

- traiter un volume suffisant d'appareils qui lui permettrait d'investir dans des infrastructures de très haute qualité et de bénéficier des économies d'échelle
- pouvoir intégrer le recyclage des carcasses d'avion au recyclage d'autres appareils métallique en fin de vie pour bénéficier de ces mêmes économies d'échelle

Dès lors, l'implication dans l'industrie du démantèlement d'avions d'une compagnie dont le cœur de métier serait centré sur le recyclage des métaux prend tout son sens, ce qui permet d'expliquer le modèle d'affaires de C qui après avoir récupéré un avion en fin de vie, confie le traitement des pièces à une tierce compagnie et ne se charge en interne que du sort de la carcasse.

Finalement, l'augmentation du volume de métaux déjà traités par la compagnie du fait de son cœur de métier pourrait être une justification du modèle d'affaires de C, qui s'impliquerait donc dans le démantèlement d'avions afin d'élargir son business existant. On retrouve un comportement similaire à ce lui de D, qui dont l'activité de démantèlement d'avions permet de développer son métier originel en augmentant le volume de pièces détachées disponibles.

### 2.3.2.2 Pistes d'amélioration

Les pistes d'améliorations sur ce modèle d'affaires concernent principalement le progrès dans l'efficacité et la rentabilité du traitement des métaux. Aujourd'hui, comme expliqué dans le paragraphe 1.3.3 sur le recyclage de l'aluminium, l'avancement des techniques de tri des métaux rend difficile un tri à la fois performant (en vue par exemple d'une réutilisation des alliages d'aluminium aéronautiques en boucle fermée) et à un coût raisonnable. Parmi les méthodes actuellement utilisées, l'essai par étincelle (*spark testing*), l'analyse chimique, ou encore la séparation à liquide dense (*heavy media separation*) peuvent être citées. La spectroscopie d'émission sur plasma induit par laser (LIBS pour *laser-induced breakdown spectroscopy*) permet aujourd'hui d'atteindre un des meilleurs niveaux de précision (E. Chen, 2008).

Par ailleurs, une des problématiques clés qui apparaissent sur le recyclage de la carcasse concerne le degré de tri qu'il est intéressant d'atteindre pour rester économiquement attrayant. Dans sa maîtrise, Julie Latrémouille-Viau s'est intéressée à ce sujet pour un avion. Elle a développé un programme mathématique déterminant la précision de tri qui apporte le plus grand profit. Dans le Chapitre 3 : Modèle pour l'aide à la décision dans la gestion d'un parc d'avions en fin de vie de ce mémoire, un modèle mathématique permettant d'optimiser ce profit lorsque l'on a un parc de plusieurs avions à gérer est proposé.

## 2.3.3 Législation et questions environnementales

### 2.3.3.1 Justification des modèles d'affaires

Les deux modèles d'affaires justifiés précédemment, utilisés par D et C, étaient centrés sur chacune des deux grandes activités du démantèlement d'avions : le traitement des pièces et celui de la carcasse restante. Il s'est révélé que le cœur de métier des deux compagnies n'était pas le démantèlement d'avions à proprement parler, mais que celui-ci permettait d'élargir leur activité originelle (respectivement courtier en avions et pièces détachées, et recycleur de métaux).

En revanche, la position de A, B et E par rapport au démantèlement d'avions n'est pas la même, puisqu'il s'agit de leur cœur de métier. Leurs activités de maintenance de pièces ou d'offre de stationnements restent marginales, bien qu'indispensables à leur survie économique. Ces trois compagnies n'ayant pas pour but premier d'alimenter un réseau de pièces détachées ou de métaux à recycler déjà existant, il est intéressant de s'interroger sur les motivations qui les ont poussées à se lancer dans cette industrie.

Le cas de la compagnie E, un peu particulier, est traité en premier lieu dans la suite. Pour mémoire, sa création a fait suite à un projet lancé par le constructeur aéronautique Airbus, qui gère également en partie la compagnie (cf section 2.2.5 pour la description détaillée). Ainsi, l'éclaircissement des raisons poussant E à s'être lancé dans le démantèlement d'avions passe par la compréhension des motivations d'Airbus, et plus généralement des constructeurs aériens, à prendre part à cette industrie.

#### *2.3.3.1.1 Constructeurs aéronautiques : pourquoi s'impliquer dans le démantèlement d'avions?*

Comme développé dans le paragraphe 1.3.1, Airbus n'est pas le seul constructeur à s'impliquer dans le démantèlement d'avions. Son concurrent américain Boeing est également concerné par le traitement des avions en fin de vie, via l'AFRA. L'approche du constructeur européen est néanmoins différente, puisqu'il intervient directement dans la gestion d'une compagnie de démantèlement alors que Boeing est membre d'un consortium d'entreprise ayant un rapport avec les avions en fin de vie. Le québécois Bombardier quant à lui est membre du Consortium de Recherche et d'Innovation en Aérospatial au Québec (CRIAQ), et a regroupé plusieurs chercheurs universitaires de l'École Polytechnique de Montréal, de l'École de Technologie Supérieure et de l'Université 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 (CIRAIQ) pour développer une approche durable envers l'environnement dans le secteur de l'aéronautique. Pour ce faire, l'ensemble de ces personnes sont impliquées dans un

projet d'envergure d'une période de quatre ans. Ce projet vise à étudier les différentes stratégies de démantèlement d'avions et de recyclage de leurs matériaux au niveau de leur efficacité et des retombés économiques de la récupération, de la réutilisation et du recyclage des constituants de l'avion. Le projet est en soi une étude du management de la fin de la vie d'un avion. Il se sépare en trois sujets principaux : étude du démontage, du désassemblage et du démantèlement de l'avion, management de la valorisation et analyse du cycle de vie. Bombardier est également, depuis le 15 décembre 2009, le premier OEM à détenir l'accréditation AFRA.

Comme le montre l'exemple des trois plus importants dans le monde, l'intérêt des constructeurs aéronautiques pour cette activité n'est plus à démontrer. Deux raisons majeures peuvent être identifiées. D'une part, les considérations environnementales, et notamment la prise en compte de la totalité du cycle de vie des produits, sont aujourd'hui au cœur des préoccupations de l'opinion publique et des politiques gouvernementales. Avoir une image « verte », montrer l'intérêt de sa compagnie pour ces problématiques, est aujourd'hui un facteur majeur pour l'image de marque (Y.-S. Chen, 2008). Cinq raisons significatives peuvent être relevées pour justifier l'intérêt d'un marketing plus vert : la conformité aux pressions environnementales, l'obtention d'un avantage compétitif, l'amélioration de l'image de marque, la recherche de nouveaux marchés et l'augmentation de la valeur du produit (Chen, 2010). D'autre part, comme il a été développé en section 0, les constructeurs aéronautiques prennent en considération les problématiques juridiques telles que la Responsabilité Élargie des Producteurs, en vue de l'introduction possible d'une législation sur le traitement des avions en fin de vie. L'implication des constructeurs, et donc l'implémentation de la compagnie E par Airbus, se comprennent alors aisément.

### 2.3.3.1.2 *Ni courtier en pièces détachées, ni recycleur de métaux, ni constructeur aéronautique. Qui sont les autres démanteneurs?*

Il est intéressant de constater que les deux compagnies ne rentrant dans aucun des catégories citées précédemment (courtiers en pièces détachées, recycleurs de métaux, constructeurs aéronautiques), à savoir A et B, sont européennes. Or, pour l'instant, l'Europe est le continent le plus avancé en ce qui concerne les régulations environnementales (cf paragraphes 1.3.1 et section 1.1). Ainsi, c'est probablement là qu'une loi sur le traitement des avions en de vie est le plus susceptible de voir le jour. Dès lors, le nombre d'avions à traiter pourrait augmenter de façon considérable, puisque ceux-ci risquent de ne plus pouvoir légalement terminer leur vie dans des pays où les exigences sont moindres, ou simplement entreposés dans un désert. Le marché pourrait donc être important, ce qui justifie la nécessité de ces compagnies spécialisées dans le démantèlement d'avions.

### 2.3.3.2 **Pistes d'améliorations**

Les compagnies dont le cœur de métier est le traitement complet des avions en fin de vie, possèdent donc à la fois le cœur de métier de D, et celui de C. Ainsi, les améliorations peuvent se trouver dans les deux directions évoquées pour les deux premières familles de modèles d'affaires. En revanche, certains ajustements seront à effectuer, puisque les volumes traités sont différents.

## 2.4 Conclusions et pistes de recherche

Plusieurs variables influencent le point à partir duquel les sous-systèmes et les matériaux cessent d'être rentables pour l'entité qui les retire, parmi lesquels : le coût de démontage ou de désassemblage, la disponibilité des documents de suivi des pièces, les infrastructures et la technologie à disposition, ou encore le contexte législatif et les normes en vigueur. Dépendamment de ces facteurs, il apparaît que toutes les compagnies observées ne s'organisent pas de la même façon autour des deux activités centrales du démantèlement, à savoir le désassemblage des pièces réavionnables et le

découpage de la carcasse. Aucun modèle d'affaires dominant n'a pu être identifié dans l'industrie de la gestion des avions en fin de vie. Néanmoins, la façon dont les entreprises gèrent les deux types de produits (pièces détachées et ferraille) et l'activité grâce à laquelle elles font leurs bénéfices s'expliquent par le cœur de métier de la compagnie.

D'une part se trouvent les compagnies tirant profit du marché des pièces détachées. À l'image de la compagnie D, ces compagnies se concentrent sur le démontage des pièces ainsi que toutes les activités connexes nécessaires à leur remise en vol : gestion des papiers de suivi, re-certification, logistique, marketing et vente. Le traitement de la carcasse est confié à une autre entreprise. Ces compagnies sont originellement des courtiers en avions et en pièces détachées. Elles s'impliquent dans le démantèlement d'avions parce que celui-ci leur permet de développer leur cœur de métier.

D'autre part se trouvent les compagnies traitant la carcasse de l'avion, comme C. Celle-ci ne se préoccupe pas des pièces qu'elle fait retirer par une autre entreprise, mais se charge du recyclage de la cellule. Or, le cœur de métier de la maison mère de C se trouve être le recyclage industriel. Ainsi, comme dans le cas du courtier en pièces détachées, le démantèlement d'avions produit de la ferraille à recycler, et s'inscrit parfaitement dans son activité principale.

Enfin, les trois autres compagnies étudiées ont été créées pour le démantèlement d'avions, dont c'est le cœur de métier; celles-ci ne traitent pas les aéronefs en fin de vie pour élargir le champ d'application d'une autre activité. Les motivations principales qui les poussent se situent au niveau environnemental : du côté constructeur aéronautique, l'objectif de s'impliquer dans cette industrie est de se donner une image verte, tandis que pour les autres, la possible arrivée d'une législation et dans tous les cas l'augmentation de la conscience environnementale des propriétaires d'avion (pour diverses raisons évoquées plus haut) laissent penser à un marché prometteur dans un futur proche. La priorité semble être alors non pas de tirer le meilleur profit des pièces ou de la ferraille, mais de mettre l'accent sur l'aspect écologique du traitement de l'aéronef en fin de vie.

En résumé, le modèle d'affaires de l'activité de démantèlement d'avions d'une compagnie opérant dans ce secteur semble dépendre de son cœur de métier originel : courtier en pièces détachées, recyclleur de métal ou démantèlement d'avions pour activité principale ne s'organisent pas de la même façon, bien qu'offrant un service similaire à leurs clients. Par ailleurs, il est important de noter que le caractère récent de l'industrie ainsi que des problèmes de confidentialité ne permettent pas d'avoir des données sur la rentabilité économique de chacun de ces modèles d'affaires. Néanmoins, certaines personnes interrogées ont indiqué que les revenus apportés par les offres de stationnement et de maintenance, lorsque proposées, étaient considérables et fondamentaux pour la bonne santé économique de l'entreprise.

L'objectif du chapitre suivant est de proposer un modèle mathématique représentant le fonctionnement de ces compagnies, afin de tenter de l'optimiser. Améliorer l'efficacité de chacun des modèles d'affaires, et ainsi d'augmenter la possibilité de trouver un moyen de traiter les avions en fin de vie à la fois respectueux de l'environnement et économiquement rentable.

## **CHAPITRE 3 MODÈLE POUR L'AIDE À LA DÉCISION DANS LA GESTION D'UN PARC D'AVIONS EN FIN DE VIE**

Le chapitre précédent a permis de mieux comprendre le fonctionnement des compagnies opérant des sites de démantèlement, qui s'organisent autour de deux activités principales : le retrait et la gestion des pièces réavionnables, et le démantèlement de la carcasse. Cette dernière peut être divisée en deux : le démantèlement pré-broyage, et le broyage final de la carcasse (suivi du recyclage des métaux). Dans la suite du chapitre, il sera donc fait référence aux trois phases du traitement d'un appareil en fin de vie. L'objectif du chapitre suivant est de proposer un modèle mathématique représentant ces activités, de façon à en optimiser la gestion. En outre, la finalité de ce travail est de réaliser un outil d'aide à la décision pour les entreprises opérant des sites de démantèlement. L'accent est donc mis sur la fidélité avec ce qui se passe réellement sur le terrain, et pas sur la recherche d'une solution optimale théorique. Les visites et rencontres effectuées ont fourni une mine d'informations qui sont pleinement exploitées.

### **3.1 Justification du modèle**

Comme il a été rappelé ci dessus, le traitement d'un avion en fin de vie peut être décomposé en trois grandes phases. Dans un premier temps est réalisé le retrait des pièces détachées réavionnables et, dans certains cas, la prise en charge de tout ou partie du circuit de remise en service ou de revente de ces pièces. Par la suite, certaines activités sont effectuées sur la carcasse avant son broyage. L'étude des cinq compagnies opérant des sites de démantèlement aéronautique présentée dans le Chapitre 2 montre que pour cette partie, il n'y a pas de méthode unique : la profondeur du démantèlement réalisé avant destruction de la carcasse varie grandement d'une compagnie à l'autre. Dans certains cas la carcasse est broyée directement une fois les pièces de valeur retirées, tandis que dans d'autres, le démontage d'un très grand nombre de pièces est effectué avant destruction. Enfin, le tri et le recyclage des métaux obtenus après broyage de la coque constituent la dernière étape de l'élimination de l'avion.

Parmi ces trois phases, le démanseur n'a en réalité que peu de latitude de décision sur la première et la dernière. En effet, la grande majorité de la valeur d'un avion en fin de vie pour son propriétaire se situant dans les pièces détachées (environ 90%), celui-ci souhaite les récupérer. La plupart du temps, les pièces non demandées ne seront pas revalorisables par le démanseur. Dans le cas où elles le seraient, le client peut exiger qu'elles soient broyées malgré tout, afin par exemple de conserver le contrôle de l'inventaire de ces pièces sur le marché. Pour cette première étape, le travail du démanseur consiste donc à retirer une liste de pièces selon les normes en vigueur, et éventuellement à se charger du processus de remise en service (recertification des pièces, recherche d'acheteurs et logistique). En ce qui concerne la partie de recyclage des métaux broyés, celle-ci est généralement confiée à des refondeurs, car cette activité nécessite des infrastructures spécifiques, ainsi que des gros volumes de traitement afin de rentabiliser le procédé que ne suffisent pas à atteindre les quelques aéronefs en fin de vie traités par le démanseur. En revanche, le propriétaire est souvent peu regardant du traitement effectué sur la carcasse de son avion après retrait des pièces et avant broyage. La somme qu'il peut en retirer est de toute façon très faible comparée à la valeur des pièces. C'est donc dans cette phase que le démanseur dispose de la plus grande marge de manœuvre. Par ailleurs, cette activité est réalisée par toutes les compagnies opérant un site de démantèlement d'avions (cf Chapitre 1 et Figure 3-1 ci-après).

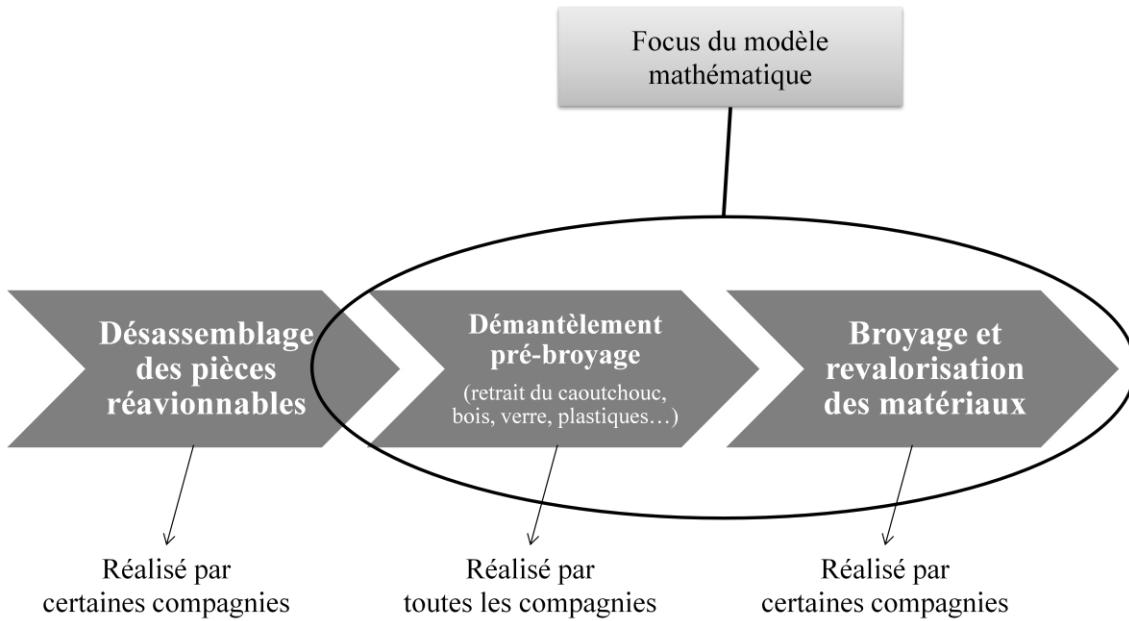


Figure 3-1 Focus du modèle mathématique dans le processus de traitement complet d'un avion en fin de vie

Ainsi, l'objectif étant de développer un outil d'aide à la décision pour ces compagnies, le modèle proposé dans le Chapitre 3 met l'accent sur cette deuxième étape, qui laisse la plus grande part de contribution et de valeur ajoutée à la compagnie.

### 3.2 Facteurs clés influençant la structure du modèle

Cette section 3.2 décrit les éléments essentiels relevés sur le terrain et au travers des entretiens avec les acteurs clés du démantèlement d'avions, ainsi que la façon dont le modèle a été construit autour de ces points.

#### 3.2.1 Absence de méthode de démantèlement unique et choix des variables de décision

Une fois que les pièces réavionnables ont été retirées, plusieurs alternatives se présentent. À un extrême, le démanteleur peut envoyer la carcasse à un ferrailleur

directement, sans réaliser aucun traitement supplémentaire. Compartiments à bagages, tapis, plastiques et câbles sont broyés avec le reste. De l'autre côté, un démantèlement méticuleux est possible, où un maximum de pièces sera retiré afin que la carcasse broyée soit constitué d'un métal le plus pur possible. Entre ces deux solutions, une infinité d'options pourraient être envisagées. Aucune n'est pour l'instant communément admise, puisqu'on a observé à peu près autant de stratégies différentes que de compagnies.

Chaque option peut être caractérisée par trois paramètres :

- D'une part, son coût et son temps de réalisation : broyer une carcasse sans effectuer aucun tri préalable est une solution rapide et peu dispendieuse, aucun coût n'est mis en jeu autre que l'équipement de découpe (souvent loué) et la logistique du transport jusqu'aux installations de recyclage. En outre, l'appareil ne passe que très peu de temps sur le site de démantèlement.
- D'autre part, son impact sur l'environnement : si elle se révèle peu chère et peu gourmande en temps, la solution précédente génère en revanche des impacts environnementaux importants. Cet aspect n'a cependant pas été étudié dans cette maîtrise, et il est donc difficile de le quantifier. Pour comprendre la tendance, on peut néanmoins se référer aux résultats du projet PAMELA, qui se veut en quelque sorte être à l'autre extrême des stratégies de démantèlement, en offrant un tri pré-broyage très poussé. D'après les résultats évoqués par les membres du projet (cf 2.2.5), avec cette méthode seuls 15% du poids de l'avion finissent à l'enfouissement contre 45% avec des techniques moins avancées. De plus, une grande partie du poids de l'avion (70% après dépollution et vidange des réservoirs) peuvent être réutilisés directement en matières premières secondaires dans l'aéronautique, ce qui engendre des impacts nettement moindres que l'utilisation de matériaux neufs
- Finalement, le troisième paramètre majeur caractérisant une stratégie de démantèlement est la valeur finale qui peut être retirée de la carcasse. Là aussi, dans le cadre de cette maîtrise, peu d'informations concernant les aspects

financiers du démantèlement ont pu être récupérées et il n'y aura donc pas de chiffres précis. En revanche, il est évident qu'un bénéfice supérieur pourra être retiré de métaux purs, comparé à un amas de mélange de métaux divers, plastiques, tapis et autres déchets.

Pour autant, il est pour l'instant très difficile d'obtenir des données sur la rentabilité économique du processus de démantèlement. Les compagnies de démantèlement disposent nécessairement de l'information mais ne la partagent pas. Ainsi, on ne sait pas s'il est finalement plus rentable d'effectuer un démantèlement méticuleux qui se révèlera cher mais aboutissant à des débris métalliques de grande valeur, ou bien de broyer directement la carcasse à un coût très bas, mais aussi en en retirant un revenu très faible.

Ces différentes stratégies sont schématisées sur la Figure 3-2. Il est à noter que trois exemples de stratégies sont proposés, mais qu'il en existe en fait théoriquement une infinité.

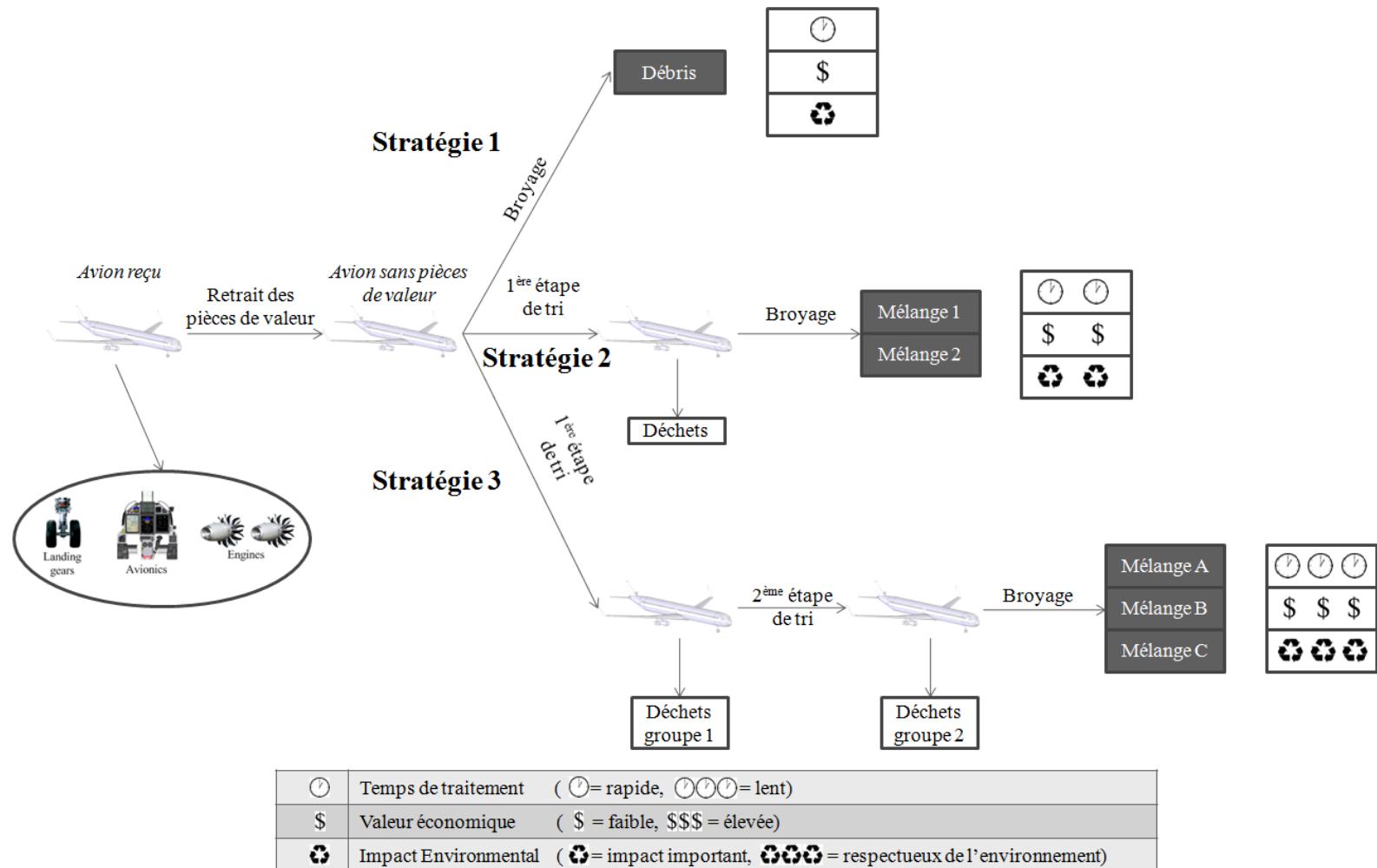


Figure 3-2 Exemples de stratégies de démantèlement

Cette absence de méthode unique de démantèlement est un facteur primordial, à prendre en considération pour la construction du modèle. Actuellement, si les entreprises n'utilisent pas toutes le même scénario de démantèlement, par contre chacune n'en utilise qu'un, qu'elle applique à tous les aéronefs qu'elle traite.

Comme mentionné plus haut, à l'heure actuelle une entreprise de démantèlement utilise un unique scénario, qu'elle met en œuvre pour tous ses clients. Le temps de réalisation, le coût, le revenu et l'impact environnemental d'un scénario dépendent fortement de la compagnie qui le réalise. En effet, ces paramètres sont fortement influencés par la disponibilité et le coût des équipements nécessaires, le savoir faire, l'expérience, les technologies utilisées par la compagnie, les coûts de main d'œuvre, ou encore les prestations proposées par les recycleurs locaux (tous n'offrent pas les mêmes prix pour des matériaux déjà triés, ce qui peut avoir une influence sur la rentabilité du tri pré-broyage pour le démanteleur). L'objectif du modèle présenté par la suite n'est pas de proposer un scénario de démantèlement optimal pour chacune des compagnies. Des travaux ont déjà été effectués sur ce sujet, comme il a notamment été mentionné en section 1.3.4, Séquencement de désassemblage. À l'inverse, un scénario donné sera utilisé comme point de départ.

Si elle utilise toujours le même schéma, une compagnie de démantèlement est pourtant capable d'en réaliser plusieurs, en partant du scénario « de base », où la carcasse est broyée immédiatement après le retrait des pièces, jusqu'au scénario le plus avancé qu'elle utilise. Ce nombre de stratégies est en théorie très grand, puisqu'on pourrait supposer que, par exemple, chaque fois qu'un siège supplémentaire est retiré, on peut considérer le nouveau scénario dans lequel l'avion serait broyé une fois ce siège supplémentaire retiré. Dans les faits, l'un des acteurs rencontrés au cours de l'étude des compagnies présentée dans le Chapitre 1 a indiqué que le démantèlement pouvait être décrit par blocs. En effet, lorsque les techniciens s'attaquent au retrait d'un groupe de pièces, une fois le matériel installé, n'en retirer qu'une partie n'a pas de bon sens. Un scénario où la moitié des compartiments à bagage seraient retirés, par exemple, ne serait donc pas pertinent. En d'autres termes, on peut ne considérer pour scénarios réalisables

que les stratégies consistent à broyer l'avion après le retrait de chaque « grand bloc ». Pour reprendre ce qui est montré sur la Figure 3-2 Exemples de stratégies de démantèlement si la stratégie 3 est celle habituellement utilisée par la compagnie, alors les autres stratégies considérées réalisables seront les stratégies 1 et 2.

Ainsi, au lieu d'utiliser une unique stratégie, la démarche du modèle développé ici est de mettre à profit cette possibilité d'en réaliser plusieurs, dans le but d'optimiser l'utilisation des ressources de la compagnie. L'idée est de permettre de combiner ces différents scénarios, offrant la possibilité d'utiliser une stratégie différente sur chacun des avions en traitement.

Les différents scénarios sont schématisés sur la Figure 3-3.

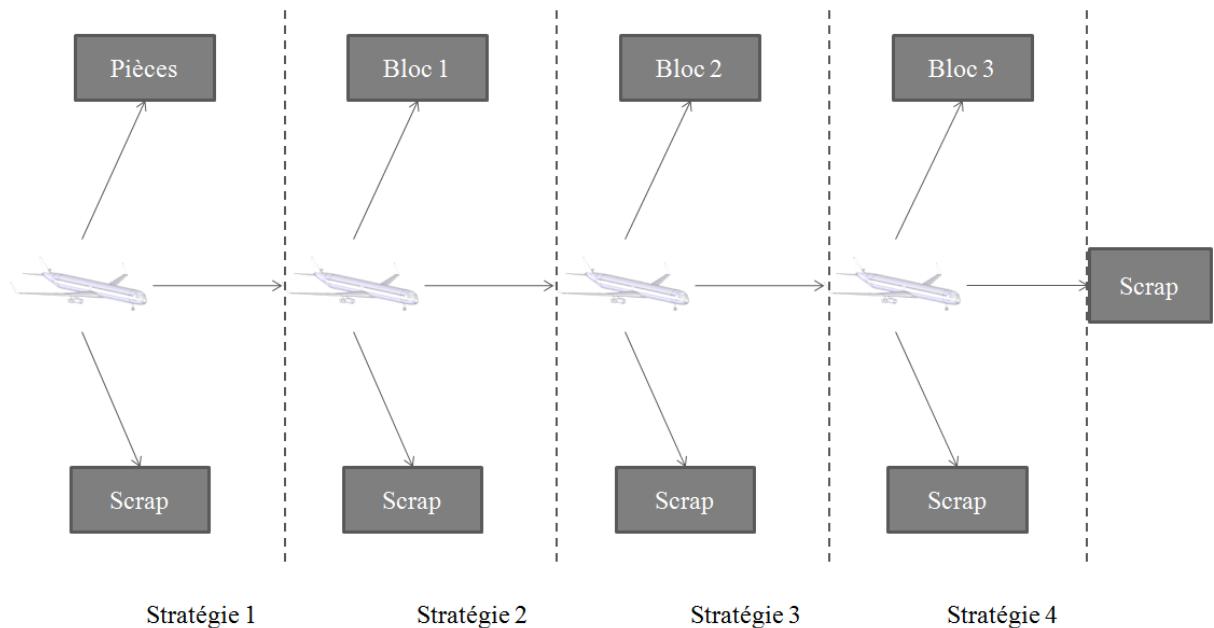


Figure 3-3 Différents scénarios utilisables par une compagnie dans le modèle

Les variables de décision du modèle émanent directement de cette idée de flexibilité dans les scénarios utilisés. Prenant en entrée les scénarios réalisables, le modèle donnera

en sortie pour chaque appareil l'état dans lequel il faut le broyer. Une bonne connaissance des implications de chaque scénario est donc indispensable. Il faut connaître, pour chaque scénario, le coût de réalisation (qui pourra se compter en heures.hommes par exemple), et le revenu supplémentaire apporté. Un futur travail de recherche intéressant serait de prendre également en considération le gain sur l'impact environnemental, mais cela n'a pas été fait ici. Afin de ne pas tenir compte des coûts et revenus engendrés dans tous les cas, on pourra ne les compter que par rapport au scénario « de base ». En d'autres termes, si un avion est broyé après le retrait de deux blocs, on comptera le bénéfice récupéré par rapport à une revente de la carcasse broyée directement après retrait des pièces. En d'autres termes, ce sont les coûts et revenus marginaux qui sont pris en compte.

Les variables de décision ayant été identifiées, le modèle a ensuite été affiné en fonction des priorités dans la gestion quotidienne d'un site de démantèlement énoncées par les acteurs rencontrés.

### **3.2.2 Priorités énoncées par les démanteleurs**

#### **3.2.2.1 Réponse impérative à la demande, choix des intervalles de temps**

Un des facteurs primordiaux évoqués par les démanteleurs est la nécessité absolue d'être en mesure de répondre à toute demande entrante. Cela implique d'être capable de libérer des espaces rapidement. C'est un facteur à prendre en compte dans le modèle. Ainsi, les scénarios de démantèlement choisis pour les avions en traitement doivent l'être de sorte qu'à chaque arrivée de nouvel appareil, un espace soit libéré, et donc un avion broyé et le scra envoyé à des recycleurs.

C'est pour cette raison que le choix a été fait de cadencer le modèle non pas par une unité de temps régulière, mais par dates d'arrivées prévues des appareils. Ainsi, le modèle fournit la façon dont la compagnie doit organiser ses ressources humaines entre deux livraisons, les étapes de démantèlement réalisées sur chaque appareil, et surtout, le ou les appareils qui seront broyés dans le but de laisser la place aux nouveaux arrivants.

### **3.2.2.2 Remise au client des pièces détachées le plus tôt possible, début de la latitude de décision**

Une deuxième priorité majeure mentionnée par les démanteneurs est l'importance de rendre au client ses pièces détachées au plus tôt. En effet, que le propriétaire de l'avion soit une institution financière ou une compagnie aérienne, les pièces sont l'élément majeur de l'appareil en fin de vie, de par leur valeur et leur possible réutilisation dans une flotte existante. Ainsi, si le client n'attache souvent que peu d'importance à la date à laquelle le dernier kg de déchet de son avion est enfoui, le retrait des pièces ne peut pas être étalé dans le temps. C'est donc le travail à réaliser en priorité dès réception de l'avion. Finalement, la liberté dans l'organisation des ressources humaines et des activités réalisées sur les avions ne commence réellement qu'une fois les pièces retirées.

### **3.2.2.3 Économies dues au broyage de plusieurs avions à la fois, insertion d'une composante de coût fixe**

Les compagnies de démantèlement peuvent posséder ou non les équipements nécessaires au broyage. Lorsque ce n'est pas le cas, ces équipements sont alors loués au cas par cas, lorsqu'un avion doit être broyé. Dès lors, il est intéressant de prendre en compte les économies pouvant être faites si l'on broie plusieurs avions d'un coup. Par ailleurs, lorsque l'avion est broyé, toute une logistique est à organiser pour se débarrasser des débris obtenus. La plupart du temps, le démanteneur fait venir un ferrailleur pour récupérer les débris. Il est alors souvent également plus économique de se débarrasser en une fois de plusieurs carcasses, qu'en plusieurs fois d'une carcasse. Ainsi, le modèle permet de prendre en compte un aspect de coût fixe pour le broyage.

Dans le cas où les frais de broyage et d'élimination des débris n'auraient pas de composante fixe (c'est-à-dire, s'il en coûte forcément deux fois plus cher de broyer deux avions que de n'en broyer qu'un, et de même pour l'élimination des débris), il sera alors possible de simplement retirer cette composante dans le modèle.

### 3.2.3 Gestion des ressources humaines

Les sites se démantèlement peuvent gérer leurs ressources humaines de deux façons : soit fonctionner par projet, c'est-à-dire embaucher de la main d'œuvre pour travailler pendant un court laps de temps (pour celles qui traitent un faible nombre d'avions), soit travailler avec des employés à plein temps. Il existe aussi des méthodes hybrides, où le site fonctionne avec une capacité nominale, qu'il adapte en employant des sous-traitants pour ajuster la main d'œuvre au travail à réaliser. C'est ce mode de gestion qui est utilisé dans le modèle. C'est en effet le plus adaptable à toutes les situations. Si l'on veut l'appliquer à une entreprise qui n'a pas de main d'œuvre en propre, il suffira de paramétriser la capacité nominale à 0. Dans ce modèle, les ressources humaines seront comptabilisées en heures.hommes.

### 3.2.4 Résumé

En résumé, l'objectif du modèle développé dans la suite est d'utiliser au mieux les ressources à disposition pour démanteler les avions, et de déterminer la meilleure stratégie de démantèlement à utiliser pour chacun des appareils de façon à libérer (au moins) une place lorsque l'avion suivant arrive, en fonction de la valeur ajoutée par la réalisation d'un scénario plutôt qu'un autre.

Chaque avion peut être représenté par un graphe, dans lequel chaque nœud représente un état accessible par l'avion.

Le fonctionnement du modèle est schématisé sur la Figure 3-4 Schématisation du modèle mathématique

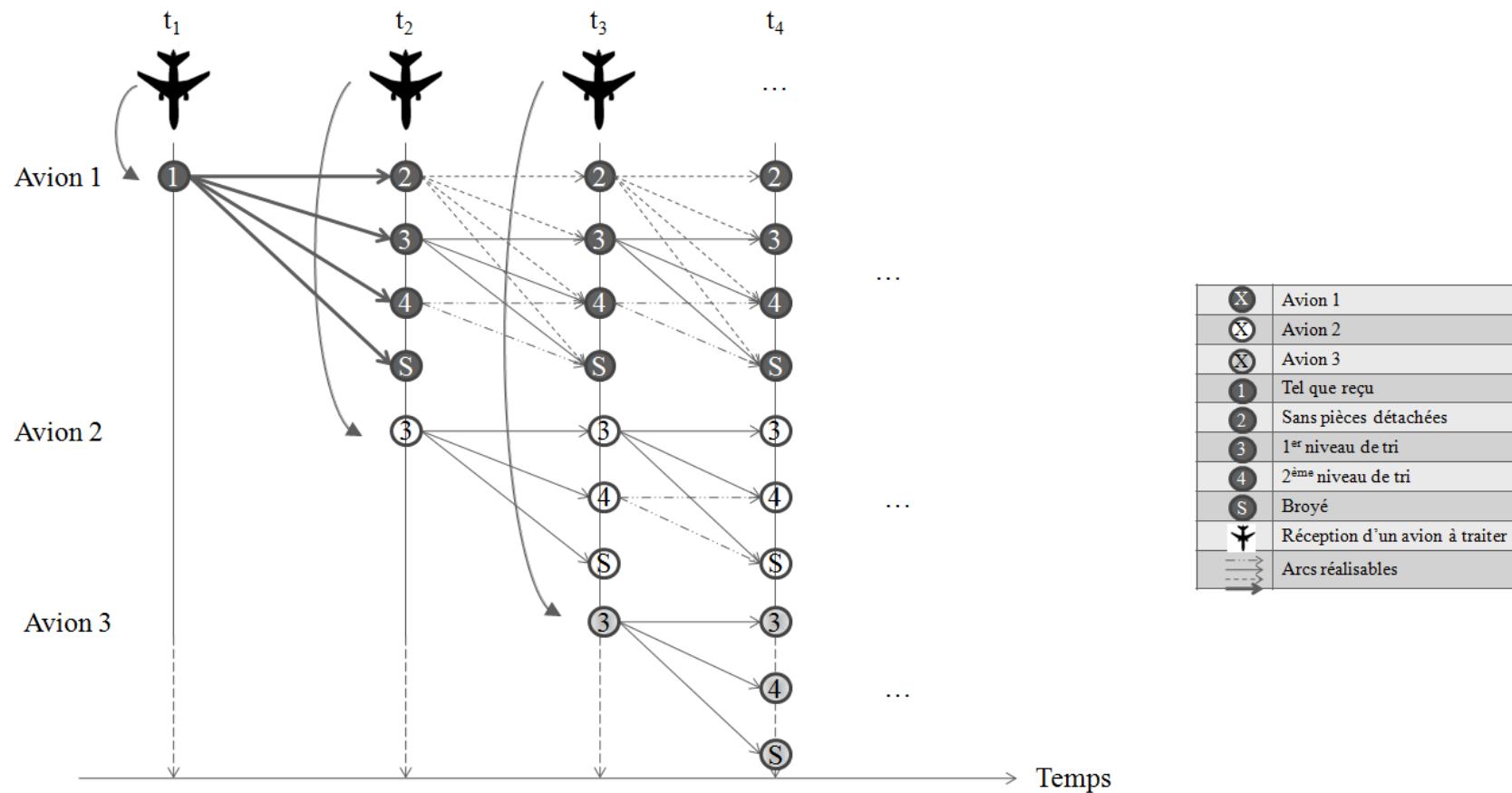


Figure 3-4 Schématisation du modèle mathématique

## 3.3 Expression mathématique

### 3.3.1 Notations et paramètres

#### 3.3.1.1 Notations

Dans toute la suite, sauf mention contraire :

- $k \in \mathbb{N}$  indexe les avions
- $t_k \in \mathbb{N}$  représente l'arrivée de l'avion  $k$  sur le site de démantèlement
- $i, j \in \mathbb{N}^2 \cup \{S\}$  représentent les états accessibles par les avions. Plus la valeur d'un état est petite, moins il est avancé dans le processus de démantèlement. Par convention, un avion reçu est dans l'état 1, un avion sans ses pièces et équipements est dans l'état 2, et un avion scrappé est dans l'état  $S$ .

#### 3.3.1.2 Paramètres

Les paramètres présentés ici sont les données, donc supposés connus a priori. Ce sont des entrées du modèle.

- $Gain_{i,k} \in \mathbb{R}$  représente le bénéfice supplémentaire apporté par la revente de la carcasse lorsque broyée dans l'état  $i$ , par rapport à sa revente broyée dans l'état 2, pour l'avion  $k$
- $Rsrc\_Cs_{k,i,j} \in \mathbb{R}$  : Besoin en ressources (heures.hommes) pour faire passer l'avion  $k$  de l'état  $i$  à l'état  $j$
- $Sc\_Rsrc\_Cs_k \in \mathbb{R}$  : Ressources humaines nécessaires pour broyer l'avion  $k$
- $E\_Rsrc\_Cost \in \mathbb{R}$  : Coût d'une unité supplémentaire de ressource humaine (une heure.homme de sous-traitance)
- $Nom\_cap_t \in \mathbb{R}$  : Capacité nominale de site de démantèlement (en heures.hommes) entre les dates  $t$  et  $t + 1$

- $Shear\_Cost \in \mathbb{R}$ : Coût fixe de location du matériel de broyage, et d'élimination des débris
- $Nb\_Spots \in \mathbb{N}$ : Nombre d'emplacements de démantèlement disponibles
- $t\_max \in \mathbb{R}$ : date de réception du dernier avion (pour le modèle)

### 3.3.2 Variables

Cette section présente les variables du modèle.

$$\boxed{Status\_change_{k,i,j,t}} = \begin{cases} 1 & \text{si l'avion } k \text{ passe de l'état } i \text{ à l'état } j \text{ entre } t \text{ et } t + 1 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (1)$$

$$\boxed{Scrap_{k,i,t}} = \begin{cases} 1 & \text{si l'avion } k \text{ est broyé dans l'état } i \text{ à } t \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (2)$$

$$\boxed{Shear_t} = \text{nombre de cisailles à faire venir entre les périodes } t \text{ et } t + 1 \quad (3)$$

$$\boxed{E\_Rsrc_t} = \text{nombre de ressources supplémentaires nécessaires entre } t \text{ et } t + 1 \quad (4)$$

$$\boxed{Presence_{k,i,t}} = \begin{cases} 1 & \text{si l'avion } k \text{ est sur le site à } t, \text{ dans l'état } i \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (5)$$

- $Status\_change_{k,i,j,t}$  est la variable indiquant le changement d'état à effectuer sur chacun des avions entre deux livraisons d'avions. On peut rester dans le même état (sauf dans l'état où l'avion est juste reçu), passer dans l'état immédiatement suivant, ou bien directement à un état plus avancé.
- $Scrap_{k,i,t}$  permet de déterminer à chaque période quel avion doit être broyé, et dans quel état.

Les variables  $Status\_change_{k,i,j,t}$  et  $Scrap_{k,i,t}$  sont les familles de variables principales. Les trois familles de variables suivantes,  $E\_Rsrc_t$ ,  $Shear_t$  et  $Presence_{k,i,t}$ , s'expriment en fonction des premières.

- $E\_Rsrc_t \in \mathbb{N}$  (Extra Resource) identifie le nombre de ressources supplémentaires nécessaires (par rapport à la capacité nominale) entre les périodes  $t$  et  $t + 1$ .
- $Shear_t$  représente le nombre de cisailles que l'on fait venir à la période  $t$ . On n'impose pas à cette variable d'être binaire, mais une solution optimale proposera 0 ou 1, puisqu'il est indiqué qu'une seule cisaille suffit à broyer autant d'avion que voulu. Ainsi, soit au moins un avion doit être broyé et  $Shear_t$  vaudra 1, soit aucun avion n'est broyé et elle vaut 0.
- $Presence_{k,i,t}$  permet de contrôler que le nombre d'avions sur site ne dépasse pas le nombre d'espaces disponibles.

### 3.3.3 Contraintes

Cette section présente les contraintes du modèle. Les équations sont d'abord présentées, elles sont ensuite expliquées juste en dessous.

$$E\_Rsrc_t \geq \sum_k \sum_i \sum_j Status\_change_{k,i,j,t} * Rsrc\_Cs_{k,i,j} + Scrap_{k,i,t} * Sc\_Rsrc\_Cs_k - Nom\_cap_t \quad (6)$$

$$\forall t, \forall i, \forall k, Shear_t \geq Scrap_{k,i,t} \quad (7)$$

$$\forall k, \forall i, \forall t, Presence_{k,i,t} \leq \sum_{j \leq i} \sum_{t_1 \leq t} Status\_change_{k,j,i,t} \quad (8)$$

$$\forall k, \forall i, \forall t, Presence_{k,i,t} \leq \sum_{t_k \leq t_1 \leq t} (1 - \sum_{j \leq i} Scrap_{k,j,t_1}) \quad (9)$$

$$\forall k, \sum_{t \leq t_k} \sum_i Scrap_{k,i,t} = 0 \quad (10)$$

$$\forall k, \sum_i \sum_t Scrap_{k,i,t} \leq 1 \quad (11)$$

$$\forall t, \forall k, \sum_{t \leq t_k} \sum_i \sum_j Status\_change_{k,i,j,t} = 0 \quad (12)$$

$$\forall t, \forall k, \sum_i \sum_j Status\_change_{k,i,j,t} \leq \sum_{t_1 \leq t} \sum_i Scrap_{k,i,t} \quad (13)$$

$$\forall t, \forall k, \sum_i \sum_{j < i} Status\_change_{k,i,j,t} = 0 \quad (14)$$

$$\forall k, \forall j, \forall t, Scrap_{k,j,t} \leq \sum_{i \leq j} \sum_{t_1 \leq t} Status\_change_{k,i,j,t} \quad (15)$$

$$\forall k, \forall i, \forall j, \forall t, Status\_change_{k,i,j,t} \leq \sum_{l \leq i} Status\_change_{k,l,i,t} \quad (16)$$

$$\forall k, Status\_change_{k,1,1,t_k} = 0 \quad (17)$$

$$\forall t, Nb\_spots - \sum_{k,i} Presence_{k,i,t} + \sum_{k,i} Scrap_{k,i,t} \geq 1 \quad (18)$$

L'équation (6) définit la variable  $E\_Rsrc_t$ . Elle exprime que le nombre de ressources supplémentaires nécessaire entre deux périodes est supérieur au nombre de ressources nécessaires diminué de la capacité nominale.

L'équation (7) définit la variable  $Shear_t$ . Elle exprime que le nombre de cisailles à obtenir entre deux périodes vaut au moins un si au moins un avion doit être broyé.

Les équations (8) et (9) définissent la variable  $Presence_{k,i,t}$ . (8) s'assure qu'un avion n'est pas présent dans l'état  $i$  s'il n'a jamais atteint cet état, (9) s'assure qu'un avion n'est pas présent s'il a été broyé.

(10) s'assure qu'un avion ne peut pas être broyé avant d'arriver sur le site.

(11) s'assure qu'un avion ne peut être broyé qu'une fois.

(12) s'assure qu'un avion ne peut pas changer d'état avant d'arriver sur le site.

(13) s'assure qu'un avion ne peut pas changer d'état une fois qu'il a été broyé.

(14) s'assure qu'un avion ne peut pas passer d'un état plus évolué vers un état moins évolué. Cette contrainte ne devrait pas être indispensable, si l'on prend la peine de définir un gain négatif pour de telles opérations.

(15) s'assure que pour être broyé dans un état  $j$ , un avion doit préalablement avoir atteint cet état.

(16) s'assure que pour passer d'un état  $i$  à un état  $j$ , un avion doit préalablement avoir atteint l'état  $i$ .

(17) s'assure qu'on retire bien les pièces détachées dès réception de l'appareil.

(18) s'assure qu'il n'y a jamais plus d'avions sur site que d'espaces disponibles.

### 3.3.3.1 Condition initiale

Pour les avions déjà sur site au lancement du modèle, ils sont notés comme arrivés au temps  $t_1$ . Par ailleurs, on établit à 0 les ressources nécessaires pour passer de l'état 1 à l'état où ils se trouvent effectivement au lancement du modèle.

Comme il sera vu dans le paragraphe 3.3.4, la fonction objectif prend en compte la valeur potentielle constituée par les avions restant sur le site à la dernière période du modèle, rendant inutile l'imposition de condition finale.

### 3.3.4 Objectif

La fonction objective du modèle s'exprime ainsi :

$$\begin{aligned}
 & \text{Max } \underbrace{\sum_k \sum_i \sum_t \text{Scrap}_{k,i,t} * \text{Gain}_{k,i} - \text{E_Rsrc}_t * \text{E_Rsrc_Cost} - \text{Shear}_t * \text{Shear_Cost}}_{\text{Profit rapporté par la vente des carcasses broyées}} \\
 & + \underbrace{\sum_k \sum_i \text{Presence}_{k,i,t\_max} * \text{Gain}_{k,i}}_{\text{valeur restante sur le site à } t\_max}
 \end{aligned} \tag{19}$$

En effet, l'objectif du modèle est en lien avec la maximisation du profit réalisé par la compagnie entre  $t_0$  et  $t\_max$ . Le but est d'arriver à exprimer la valeur ajoutée par la réalisation des différents scénarios de démantèlement. En d'autres termes, l'objectif est de maximiser le bénéfice supplémentaire apporté par la vente d'une carcasse dans un état  $i$ , par rapport à sa vente dans l'état 2, c'est-à-dire juste après le retrait des pièces. Le coût d'utilisation de ressources humaines supplémentaires, de location du matériel de broyage et d'élimination des débris est pris en compte de manière à prendre en considération les économies réalisées si plusieurs avions sont broyés d'un coup. Par ailleurs, la valeur des avions restants sur site à la dernière itération (au temps  $t\_max$ ) est également comptabilisée, supposant que les avions seront vendus dans l'état où ils se trouvent à  $t\_max$ .

## 3.4 Exploitation

Certains paramètres clés requérant un travail approfondi pour les obtenir ou les approximer, le modèle proposé ci-dessus n'a pas pu être testé avec des données réelles. Le détail de l'accessibilité des données nécessaires au modèle est présenté dans le Tableau 3-1 Accessibilité des données nécessaires au modèle afin d'expliquer au lecteur les démarches à lancer pour implémenter le modèle. Les données semblant poser le plus de difficulté sont regroupées en deux catégories. D'une part celles qui concernent la définition des différentes scénarios, ainsi que leur coût de mise en œuvre et le revenu tiré

de la revente des différents éléments obtenus en sortie; d'autre part l'évaluation du coût fixe de broyage de la carcasse, et d'élimination des débris obtenus. Par élimination, on entend principalement acheminement jusqu'au site du recycleur / refondeur.

Tableau 3-1 Accessibilité des données nécessaires au modèle

NATURE DE LA DONNÉE	PARAMÈTRE(S) CORRESPONDANT(S) DANS LE MODÈLE	ACCESSIBILITÉ / DIFFICULTÉ D'APPROXIMATION
<b>Différents scénarios</b> réalisables, avec coûts et revenus associés	$Rsrc\_Cs_{k,i,j}$ $Gain_{k,i}$	Difficile
<b>Évaluation du coût fixe de broyage</b> et d'élimination de la carcasse broyée	$Shear\_Cost$	Difficile
<b>Coût d'une unité de ressource supplémentaire</b>	$E\_Rsrc\_Cost$	Moyenne
<b>Ressources humaines</b> nécessaires pour <b>broyer</b> un avion	$Sc\_Rsrc\_Cs_k$	Moyenne
<b>Nombre d'espaces de démantèlement</b> sur le site	$Nb\_spots$	Facile
<b>Capacité nominale</b> du site en termes de ressources humaines	$Nom\_cap_t$	Facile

Ainsi, l'exploitation d'un tel modèle passe par la détermination (exacte ou approximée) de toutes ces données. Une suite logique de ce travail serait donc ensuite d'évaluer le comportement pour des cas concrets.

### 3.5 Conclusion

Bien qu'aucune conclusion ne puisse donc être tirée sur les performances du modèle avec des données factuelles, quelques caractéristiques en font malgré tout un modèle solide et pertinent.

L'accent étant mis sur l'étape de démantèlement avant broyage de la carcasse, réalisée en interne par toutes les compagnies étudiées, il peut s'adapter à tous les modèles d'affaires. Les valeurs de certains paramètres devront être configurées pour correspondre à la compagnie auquel il s'applique. Les données relatives aux scénarios réalisables par exemple seront à modifier, puisqu'elles dépendent du savoir faire, des outils à disposition, et du cœur de métier de la compagnie. Les coûts de broyage et de main d'œuvre peuvent également varier selon la localisation géographique du site.

Par ailleurs, le modèle permet une optimisation du fonctionnement de la compagnie, qu'elle puisse effectuer des changements majeurs ou non. En effet, les paramètres relatifs aux scénarios possibles peuvent être rentrés soit en ne tenant compte que des capacités et du mode de fonctionnement actuels de la compagnie, soit en effectuant des estimations si des changements sont effectués (achat de nouveau matériel, embauche de personnel ou incorporation d'un nouveau scénario par exemple). De cette façon, plusieurs orientations stratégiques peuvent être évaluées en réalisant une étude de rentabilité de projet tenant compte des investissements nécessaires et des gains réalisés.

## CONCLUSION

L'intérêt croissant de l'opinion publique pour les problématiques environnementales, la mise en place de nouvelles réglementations sur la fin de vie des produits dans divers domaines, ou encore l'importance accordée à l'image de marque, passant par une image « verte », conduisent les entreprises à se préoccuper du traitement de leurs produits en fin de vie. Si l'industrie aéronautique n'est pas encore concernée par des lois sur ces aspects, c'est-à-dire que rien ne dicte dans aucun pays ce qui doit être fait d'un avion mis au rebut, la situation devrait changer dans un futur assez proche. Les constructeurs d'avions en sont conscients, et les plus importants (parmi lesquels Airbus, Boeing et Bombardier) prennent déjà part au démantèlement de leurs appareils, par le biais de différentes actions : gestion d'une compagnie de démantèlement, implication dans un consortium d'acteurs du recyclage d'avions, établissement de programmes de certification, ou encore participation à des projets impliquant milieux académique et professionnel, sont des exemples de leur participation. Ils ne sont néanmoins pas les seuls à s'intéresser au marché que vont représenter les 6 000 à 7 000 avions en fin de vie à traiter dans les vingt prochaines années.

Des compagnies exerçant cette activité ont déjà vu le jour, cinq parmi les plus importantes d'entre elles ont été étudiées en profondeur dans ce mémoire. D'une part, il apparaît qu'elles ne s'organisent pas de la même façon dépendamment de leur cœur de métier originel, et qu'il n'y a pas de modèle d'affaires dominant. L'accent peut être mis selon la compagnie sur le désassemblage des pièces pour celles œuvrant déjà dans le courtage d'avions, sur le traitement de la carcasse pour les recycleurs de métaux, ou sur toute la chaîne de traitement en fin de vie pour celles dont le démantèlement d'avions est l'activité majeure.

Par ailleurs, du fait du caractère très récent de l'intérêt général pour le démantèlement d'avions et de la complexité du problème, les travaux réalisés sur le sujet n'ont pas encore abouti à une méthode optimale de désassemblage et de démantèlement des avions; il est apparu qu'il existe des différences majeures entre les façons d'opérer des

compagnies étudiées. Certains points communs ont néanmoins été notés. Pour mémoire, il y a deux activités principales à réaliser : désassembler les pièces valorisables, puis disposer de la carcasse restante. Il ressort de l'étude que le désassemblage des pièces laisse peu de place à l'initiative du démanteleur. En effet, le propriétaire sait dans la plupart des cas les pièces qu'il veut retirer de son appareil et fournit sa liste à la compagnie. Si la compagnie souhaite retirer des pièces supplémentaires pour les revendre par exemple, la requête ne lui est pas toujours accordée: le client peut par exemple désirer contrôler le stock des pièces disponibles sur le marché, et ainsi exiger que celles restantes sur son appareil soient détruites. En ce qui concerne le traitement de la carcasse en revanche, le propriétaire est souvent peu regardant du sort qui lui est réservé, ce qui laisse toute place à l'intervention du démanteleur. Parmi toutes les compagnies étudiées, tous les degrés de détail dans le tri ont été observés. D'un côté, une fois les pièces demandées par le client retirées, le reste de la carcasse est simplement broyé, générant un faible coût de traitement de la carcasse, mais également un faible revenu, puisque l'on obtient un mélange de métaux variés et de plastiques. À l'autre extrême, la carcasse peut être entièrement vidée de tous équipements et plastiques, et chaque pièce de tôle démontée et triée séparément afin d'obtenir des mélanges de métaux aussi purs que possible. Les coûts générés sont bien plus élevés, mais les mélanges retirés sont également de plus grande valeur. Des niveaux intermédiaires ont également été observés. Ainsi pour l'instant, il n'existe pas de méthode plus rentable que les autres communément reconnue. Celle-ci se situe entre les deux extrêmes cités précédemment, dépendamment de la structure de coûts de la compagnie, de ses capacités et des équipements et technologies disponibles.

Ainsi, les pistes d'amélioration dans la partie concernant le traitement de la carcasse sont considérables. Dans cette perspective, un modèle mathématique a été élaboré, en fonction des informations recueillies sur les modes opératoires des compagnies, et des facteurs primordiaux influençant la gestion d'un site de démantèlement déterminés à l'aide des nombreux contacts et visites effectués. Le modèle réalisé peut représenter la méthode de planification de chacune des compagnies étudiées, et pourrait s'adapter à

toute compagnie œuvrant dans le démantèlement d'avions, il suffit pour cela d'en modifier des paramètres. Une planification des tâches et du niveau de tri à effectuer dans le démantèlement pour chaque appareil est proposée, en fonction des différents coûts engagés (main d'œuvre et équipements), et des gains associés aux produits obtenus en sortie. Les principales contraintes à respecter sont les dates d'arrivées des avions, puisqu'une compagnie veut prioritairement répondre à la demande, ainsi que la nécessité d'enlever dès réception de l'appareil les pièces et équipements requis par le client, comme c'est le cas dans la réalité. L'objectif du modèle serait ainsi de constituer à terme un outil d'aide à la décision pour ces compagnies.

Cependant, il existe des limites à ce modèle. D'une part, les données nécessaires pour faire tourner le programme correspondant peuvent être difficiles à obtenir. Par exemple, la détermination des coûts et gains supplémentaires générés par la réalisation d'une étape supplémentaire de tri de la carcasse ne sont pas triviales. Ensuite, la première hypothèse sur laquelle il est fondé, à savoir que l'on connaît la date d'arrivée des prochains appareils à démanteler. Plus ce nombre est élevé, et plus le résultat sera bon. Or dans les faits, cette information n'est pas toujours aisément disponible. Pour une meilleure efficacité du programme, il faudrait que la compagnie de démantèlement ait des contrats avec des propriétaires de nombreux avions (une compagnie aérienne ou une institution financière spécialisée) afin de prévoir la mise hors service de ces appareils. Par ailleurs, le choix des intervalles de temps coïncidant avec les temps d'arrivées des avions à démanteler semble concorder avec la réalité car c'est cette nouvelle demande à traiter qui va dicter le rythme à adopter, mais comporte le risque de mener à une solution sous optimale, puisque la durée des tâches n'est pas synchronisée avec les intervalles de temps pendant lesquels elles peuvent être réalisées. Enfin, le programme propose le choix et la planification automatisés des tâches à effectuer sur les avions en fin de vie en fonction des scénarios de démantèlement réalisables par la compagnie qui les traite, tout en prenant en compte les aspects pratiques de bon sens qui guident concrètement les choix des décideurs au jour le jour. La détermination de scénarios pertinents n'est pas offerte par le modèle, ceux-ci sont supposés déjà connus par la compagnie. Par

conséquent, il serait intéressant de poursuivre ce travail par une élaboration de méthodes de détermination des scénarios pertinents pour la compagnie, en tenant compte de ses capacités, de ses équipements, de la nature et de la condition de l'appareil.

## BIBLIOGRAPHIE

- AFRA. (2007). *Bylaws of the Aircraft Fleet Recycling Association*. Consulté le 23 septembre 2010, tiré de <http://www.afraassociation.org/ByLaws.pdf>.
- AFRA. (2009). *Best Management Practices for Management of Used Aircraft Parts and Assemblies Version 2.0*. Consulté le 17 juillet 2010, tiré de [http://www.afraassociation.org/AFRAPartsBMPv2\\_2.pdf](http://www.afraassociation.org/AFRAPartsBMPv2_2.pdf).
- AFRA. (2011a). *AFRA accredited members*. Consulté le 24 janvier 2011, tiré de <http://www.afraassociation.org/#Accredited>.
- AFRA. (2011b). *AFRA Members by country*. Consulté le 24 janvier 2011, tiré de <http://www.afraassociation.org/members.cfm>.
- ASCEND. (2009). *Record number of planes grounded brings percentage of global fleet in storage closer to 9/11 peak*. Consulté le 8 mai 2010, tiré de <http://www.ascendworldwide.com/2009/02/record-number-of-planes-grounded-brings-percentage-of-global-fleet-in-storage-closer-to-911-peak.html>.
- Atasu, A., & Van Wassenhove, L. (2010). Environmental Legislation on Product Take-Back and Recovery. In *Closed-Loop Supply Chains* (pp. 23-38): Auerbach Publications. Consulté le 15 août 2010, tiré de <http://dx.doi.org/10.1201/9781420095265-c3>
- ATE&M. (2007). The end of the line - aircraft recycling initiatives. *Aircraft Technology Engineering and Maintenance Magazine*, 28-33.
- Beauclair, N. (2009). Démantèlement: un marché qui décolle. *Air et Cosmos*, 2192, 20-21.
- Boeing. (2002). *747-400: Airplane characteristics for airport planning*. Consulté le 3 novembre 2010, tiré de [http://www.boeing.com/commercial/airports/acaps/747\\_4.pdf](http://www.boeing.com/commercial/airports/acaps/747_4.pdf).
- Chen, E. (2008). *Economic and environmental evaluation of end-of-life aerospace using optimization methods* (Master thesis, Massachussets Institute of Technology). <http://hdl.handle.net/1721.1/42998>

- Chen, Y.-S. (2008). The Positive Effect of Green Intellectual Capital on Competitive Advantages of Firms. *Journal of Business Ethics*, 77(3), 271-286.
- Chen, Y.-S. (2010). The Drivers of Green Brand Equity: Green Brand Image, Green Satisfaction, and Green Trust. *Journal of Business Ethics*, 93(2), 307-319.
- Chung S.-W., & Murakami-Suzuki R. (2008). A comparative study of e-waste recycling systems in Japan, South Korea and Taiwan from the EPR perspective: implications for developing countries. In M. Kojima, (éd.), *Promoting 3Rs in Developing Countries: Lessons from the Japanese Experience*: Chiba: Institut of Developing Economies (IDE-JETRO). <http://www.ide.go.jp/English/Publish/Download/Spot/pdf/30/007.pdf>
- Das, S. K. (2008). Recycling aluminum aerospace alloys. *Advanced Materials and Processes* (166), 34-35.
- De Brito, M. P., Van der Laan, E.A., & Irion Brijan, D. (2007). Extended producer responsibility in the aviation sector. *ERIM Report Series*, 14.
- Ding, L.-P., Feng, Y.-X., Tan, J.-R., & Gao, Y.-C. (2010). A new multi-objective ant colony algorithm for solving the disassembly line balancing problem. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 48(5), 761-771.
- Duta, L., Filip, F. G., & Zamfirescu, C. (2008). Genetic Algorithms: A Decision Tool in Industrial Disassembly. *First International Conference on complexity and Intelligence of the Artificial and Natural Complex Systems, Medical Applications of the Complex Systems, Biomedical Computing, Mures, Roumanie* (pp. 55-61).
- European Commission. (2000). Directive 2000/53/EC of the European Parliament and of the Council of 18 September 2000 on end-of life vehicles - Commission Statements
- European Commission. (2009). *L'Environnement pour les Européens - Réduire les déchets des avions*. Consulté le 4 septembre 2010, tiré de [http://ec.europa.eu/environment/news/efe/eu\\_strategy/20090510\\_life\\_fr.htm](http://ec.europa.eu/environment/news/efe/eu_strategy/20090510_life_fr.htm).
- European Commission. (2011). *Environmental Data Centre on Waste - Re-use and recovery rates*. <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/waste/data/wastestreams/elvs>

European Union. (2008). Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives.

Fergusson, M. (2007). *End of Life Vehicles (ELV) Directive - An assessment of the current state of implementation by Member States*. Brussels Policy Department Economy and Science. [http://www.europarl.europa.eu/comparl/envi/pdf/externalexpertise/end\\_of\\_life\\_vehicles.pdf](http://www.europarl.europa.eu/comparl/envi/pdf/externalexpertise/end_of_life_vehicles.pdf)

Forslind, K. H. (2005). Implementing extended producer responsibility: the case of Sweden's car scrapping scheme. *Journal of Cleaner Production*, 13, 619-629.

Gerrard, J., & Kandlikar, M. (2007). Is European end-of-life vehicle legislation living up to expectations? Assessing the impact of the ELV Directive on green innovation and vehicle recovery. *Journal of Cleaner Production*, 15(1), 17-27.

Giudice, F., & Fargione, G. (2007). Disassembly planning of mechanical systems for service and recovery: a genetic algorithms based approach. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 18(3), 313-329.

Hui, W., Dong, X., & Guanghong, D. (2008). A genetic algorithm for product disassembly sequence planning. *Neurocomputing*, 71(13-15), 2720-2726.

Hunter, D., Salzman, J., & Zelke, D. (2002). International environmental law and policy. In *University casebook series* (pp. 412-413): New York: Foundation Press. [http://mcgill.worldcat.org/title/international-environmental-law-and-policy/oclc/48758367&referer=brief\\_results](http://mcgill.worldcat.org/title/international-environmental-law-and-policy/oclc/48758367&referer=brief_results)

International Aluminum Institute. (2010). *About aluminum production*. Consulté le 5 mai 2010, tiré de <http://www.world-aluminium.org/About+Aluminium/Production>.

Itzkowitch. (2008). *1ère plateforme européenne de démantèlement aéronautique* (Communiqué de presse). Consulté le 5 mai 2010, tiré de [http://www.veolia-proprete.com/veolia/ressources/documents/1/755,DP-Bartin-Aero-Recycling\\_2008\\_HD.pdf](http://www.veolia-proprete.com/veolia/ressources/documents/1/755,DP-Bartin-Aero-Recycling_2008_HD.pdf)

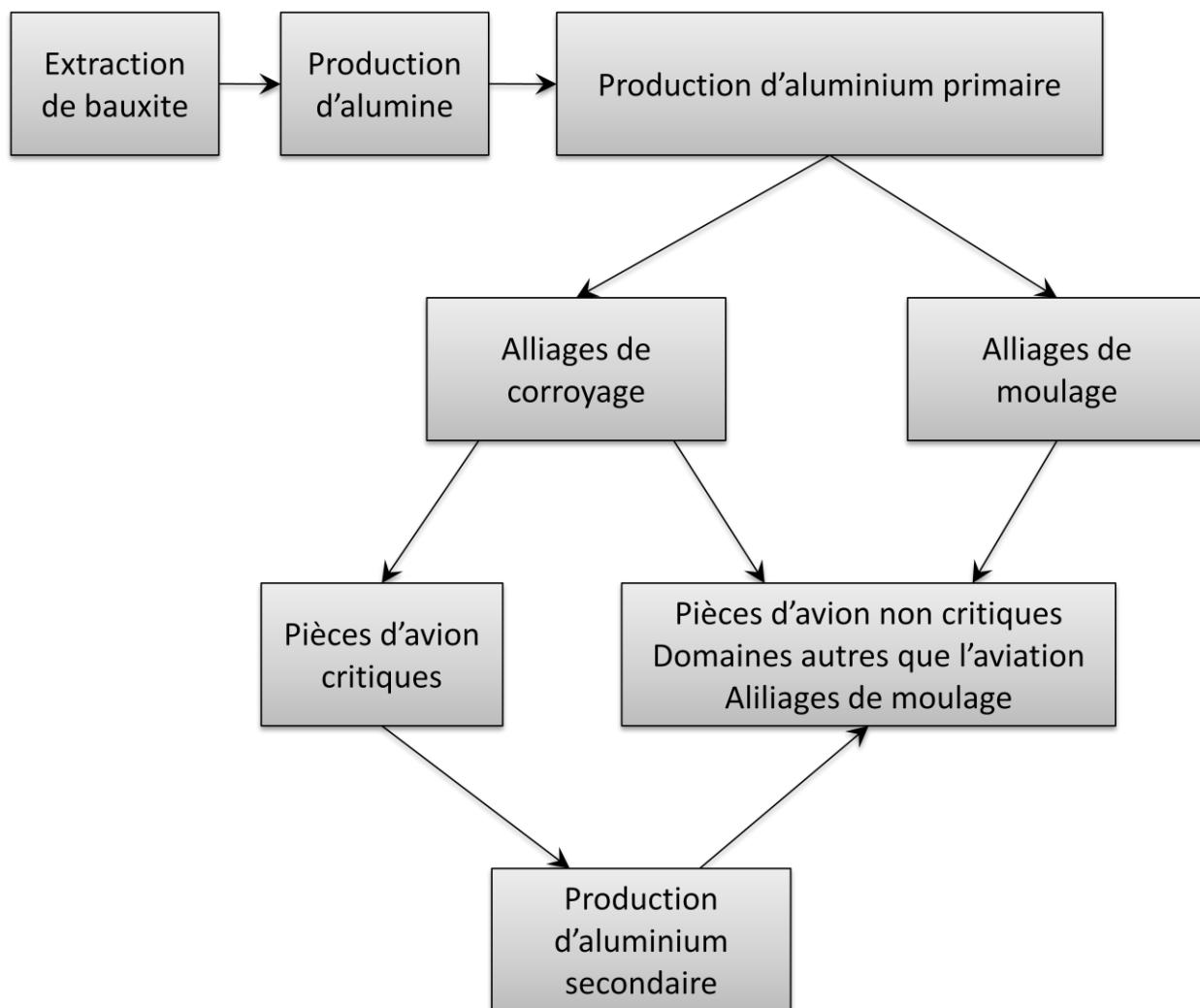
Keung, K. W., Ip, W. H., & Lee, T. C. (2001). The Solution of a Multi-Objective Tool Selection Model Using the GA Approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 18(11), 771-777.

- Kingsley-Jones, M. (2008). *Airbus's recycling master plan - Pamela* Flight International. Consulté le 26 mai 2010, tiré de <http://www.flighthglobal.com/articles/2008/05/26/224015/airbuss-recycling-master-plan-pamela.html>.
- Kongar, E., & Gupta, S. (2006). Disassembly sequencing using genetic algorithm. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 30(5), 497-506.
- Lambert, A. J. D., & Gupta, S. M. (2005). *Disassembly Modeling for Assembly, Maintenance, Reuse, and Recycling*: Taylor & Francis.
- Latrémouille, J. (2009). *Traitements en fin de vie des avions et valorisation de l'aluminium* (Maîtrise, École Polytechnique de Montréal).
- London Metal Exchange. (2011). *LME Aluminum hub page*. Consulté le 25 février 2011, tiré de <http://www.lme.com/aluminium.asp>.
- Lu, C., Huang, H. Z., Zheng, B., Fuh, J. Y. H., & Wong, Y. S. (2008). An Ant Colony Optimization Approach to Disassembly Planning. *International Conference on Apperceiving Computing and Intelligence Analysis, Chengdu, China* (pp. 81-84).
- McGovern, S. M., & Gupta, S. M. (2007). A balancing method and genetic algorithm for disassembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, 179(3), 692-708.
- OECD. (1972). Recommendation of the council on guiding principles concerning international economic aspects of environmental policies. Paris.
- Pamela Life. (2008). *Pamela Life main results*. Consulté le 7 avril 2010, tiré de <http://www.pamelalife.com/english/results>.
- Reh, L. (2006). Challenges for process industries in recycling. *China Particuology*, 4(2), 47-59.
- Riley, W. D., & Makar, H. V. (1986). Impurity effects in secondary copper alloys. *Conservation & Recycling*, 9(4), 315-323.
- 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*, 5(1/2), 82-101.

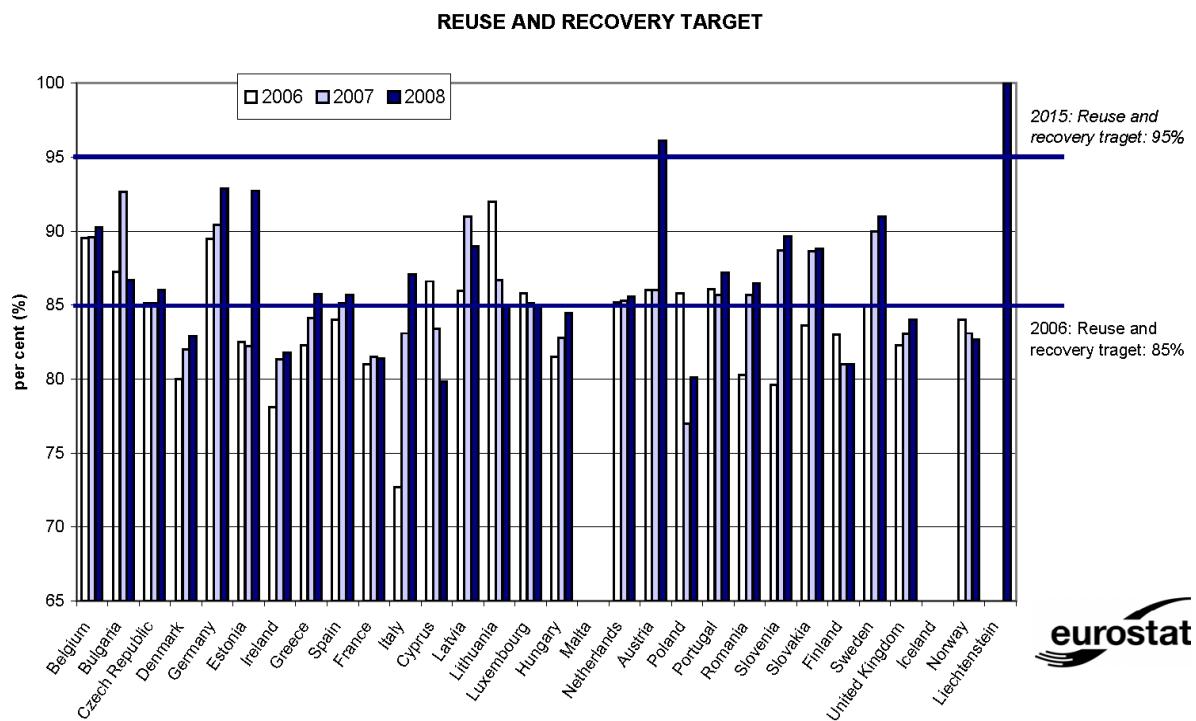
- Seo, K. K., Park, J. H., & Jang, D. S. (2001). Optimal Disassembly Sequence Using Genetic Algorithms Considering Economic and Environmental Aspects. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 18(5), 371-380.
- Sodhi, M. S., & Reimer, B. (2001). Models for recycling electronics end-of-life products. *OR Spectrum*, 23(1), 97-115.
- Suomala, P., Sievänen, M., & Paranko, J. (2002). The effects of customization on spare part business: A case study in the metal industry. *International Journal of Production Economics*, 79(1), 57-66.
- The Global Aluminum Recycling Committee. (2009). *Global Aluminum Recycling: a cornerstone of sustainable development*. <http://www.world-aluminium.org/cache/f10000181.pdf>
- Toffel, M. W. (2003). The growing strategic importance of end-of-life product management. *California Management Review*, 45(3), 102-129.
- Toffel, M. W. (2004). Strategic management of product recovery. *California Management Review*, 46(2), 120-141.
- Tripathi, M., Agrawal, S., Pandey, M. K., Shankar, R., & Tiwari, M. K. (2009). Real world disassembly modeling and sequencing problem: Optimization by Algorithm of Self-Guided Ants (ASGA). *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 25(3), 483-496.
- Union Européenne. *Synthèse de la législation de l'UE - Gestion des déchets*. Consulté le 22 août 2010, tiré de [http://europa.eu/legislation\\_summaries/environment/waste\\_management/index\\_en.htm](http://europa.eu/legislation_summaries/environment/waste_management/index_en.htm).
- Ylä-Mella, J., Pongrácz, E., & Keiski, R. L. (2004). Recovery of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) in Finland. *Waste minimization and resource use optimization conference, Oulu, Finland*. <http://www.oulu.fi/resopt/wasmin/ylamella.pdf>
- Zitter, J. (2007). *The End-of-Life decision Tool; Helping aircraft owners in their decision between selling an aircraft and disassembling the aircraft with the intention to sell the components* (Master Thesis, Delft University of Technology).



## ANNEXE A : Cheminement des composants en aluminium d'un aéronef



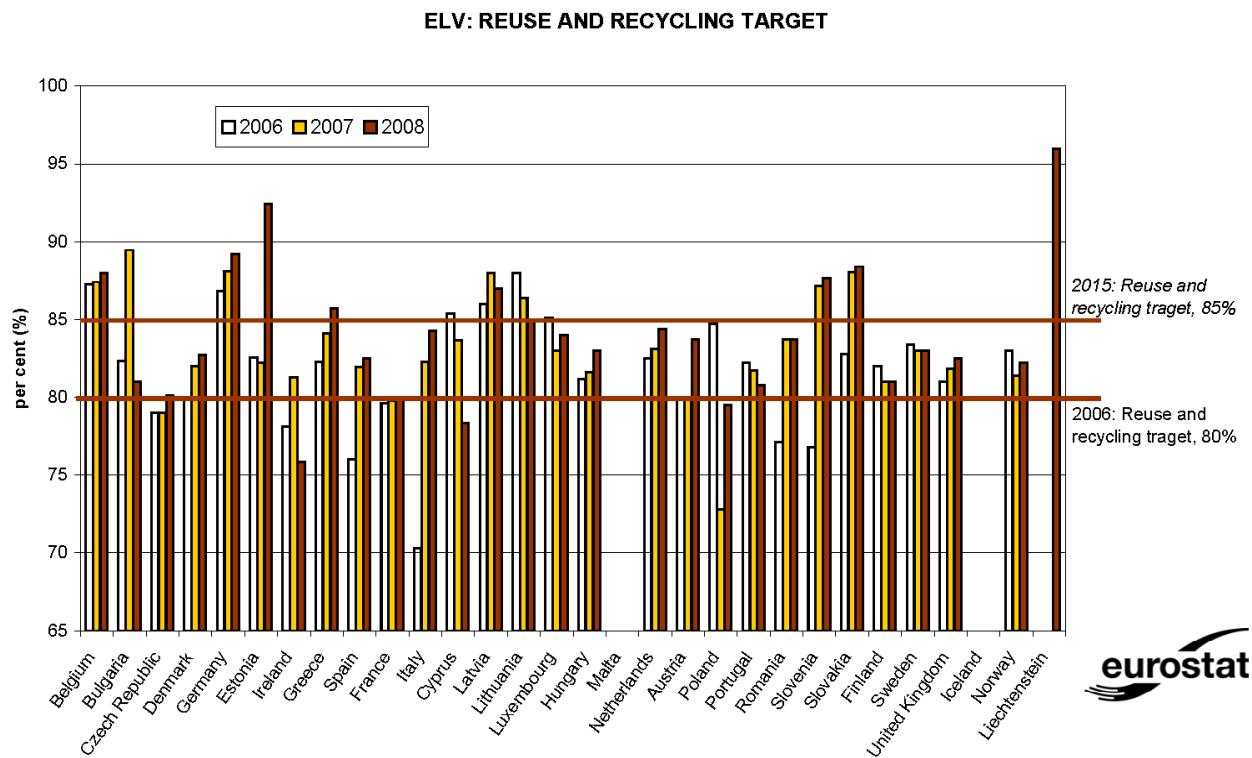
## ANNEXE B : Graphique sur réutilisation et récupération des VHU 2006-2008 (mise à jour 21 janvier 2011)



Hauptdatei\_ELV year 2008 ref 2010 11 18.xls

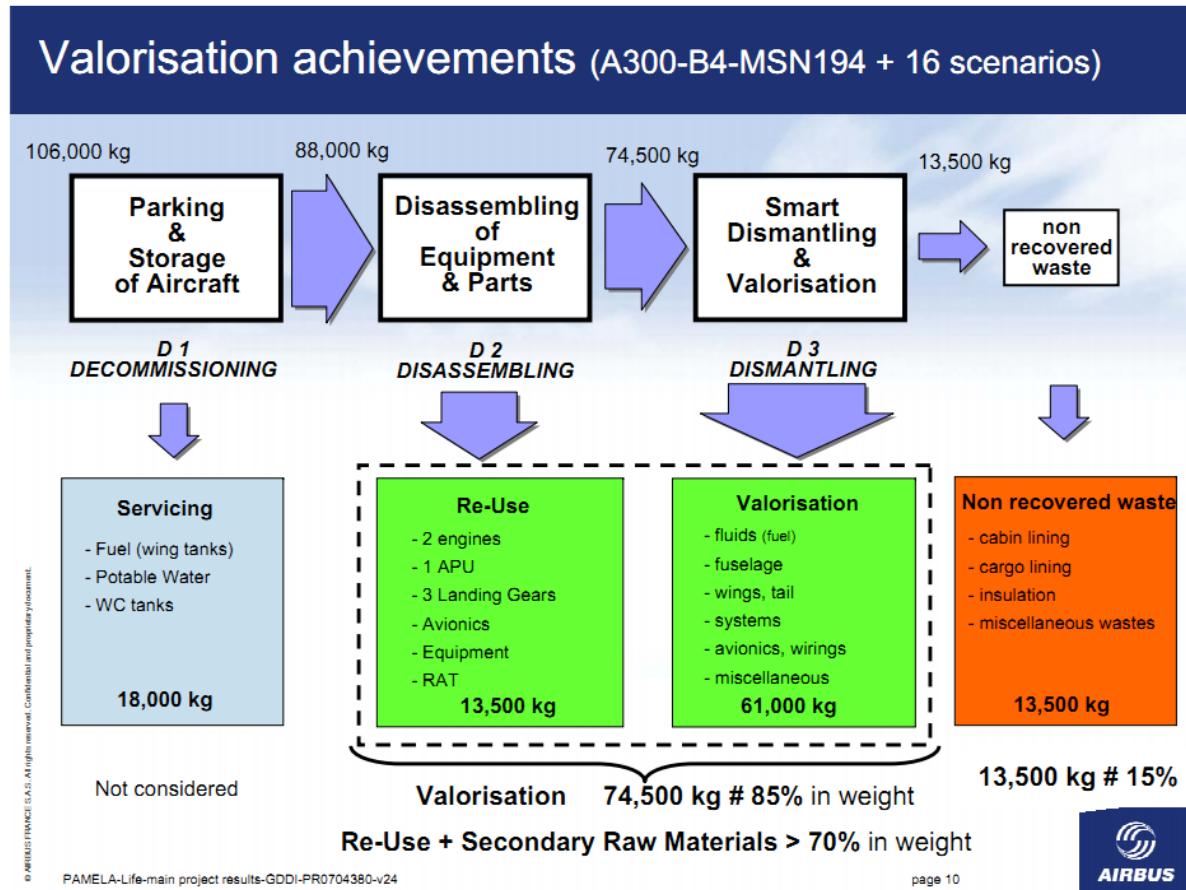
## ANNEXE C : Graphique sur réutilisation et recyclage des VHU

### 2006-2008 (mise à jour 21 janvier 2011)



Hauptdatei\_ELV year 2008 ref 2010 11 18.xls

## ANNEXE D : Principaux chiffres du projet PAMELA



Source : [www.pamelalife.com/.../results/PAMELA-Life-project\\_results-Nov08.pdf](http://www.pamelalife.com/.../results/PAMELA-Life-project_results-Nov08.pdf)

# ANNEXE E : Table des matières du guide de bonnes pratiques de l'AFRA, version 2

## **Best Management Practice for Management of Used Aircraft Parts and Assemblies**

*Published by the  
Aircraft Fleet Recycling Association*

**Version 2.0**

(issued by the AFRA Board on May 1, 2009)

### **Table of Contents**

BEST PRACTICES .....	2
ARTICLE I – OVERVIEW .....	2
ARTICLE II – DEFINITIONS AND BMP SYSTEM REQUIREMENTS .....	4
Article II a) Definitions .....	4
Article II b) BMP System Requirements .....	7
ARTICLE III - FACILITY (including infrastructure & management process).....	7
Article III a) - Location characteristics.....	7
Article III b) - Security .....	8
Article III c) - Staging Area.....	8
Article III d) - Inventory Accounting & Audits .....	9
ARTICLE IV - TRAINING .....	9
ARTICLE V – DOCUMENTATION & RECORDS.....	10
Article V a) – Asset and Transaction Records .....	10
Article V b) – Reference Manuals .....	10
Article V c) – Tagging .....	11
Article V d) – Parts .....	11
ARTICLE VI – TOOLING .....	11
ARTICLE VII – PARTS MANAGEMENT.....	12
Article VII a) – Screening, Tagging and Staging .....	12
Article VII b) – Crating .....	12
Article VII c) – Shipping .....	13
ARTICLE VIII – RECYCLING & ENVIRONMENT .....	13
APPENDIX ONE: Best Practice Advisory Guidance .....	15
Practice Guides and Minimum Standards .....	15
APPENDIX TWO: Best Practice Auditing Guidance .....	39
Audit Checklist.....	39
APPENDIX THREE: Best Practice Contracting Guidance .....	54
Contract Element Checklist .....	54