

ÉVALUATION DU POTENTIEL DE VALORISATION
DES RÉSEAUX DE CÂBLES ÉLECTRIQUES ISSUS
D'UN AÉRODYNE EN FIN DE VIE

PAR

Loredan VIOT

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE
LA MAÎTRISE EN GÉNIE DE L'ENVIRONNEMENT
M. Sc. A.

MONTRÉAL, LE 14 MARS 2017

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Loredan Viot, 2017



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY
CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Robert Hausler, directeur de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Frédéric Monette, président du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Mathias Glaus, membre du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 22 FEVRIER 2017

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je remercie mon directeur de recherche Robert Hausler pour son soutien tout au long de mon cheminement.

Merci à l'ensemble des partenaires du projet Env412 pour l'opportunité d'aborder le domaine de l'aéronautique, les échanges sur le sujet lors de nos rencontres, les visites sur site et les documents fournis.

Je remercie également mes collègues Jean-Baptiste Strehaiano et Alexandre Rancher qui ont participé à cette aventure.

Merci aux membres du CTA, notamment Yves, Paul-Antony et Antoine, pour leur aide précieuse sur le plan technique et nos conversations.

Enfin, un grand merci aux membres de la STEPPE.

ÉVALUATION DU POTENTIEL DE VALORISATION DES RÉSEAUX DE CÂBLES ÉLECTRIQUES ISSUS D'UN AÉRODYNE EN FIN DE VIE

Loredan VIOT

RÉSUMÉ

Le cuivre est un matériau très couramment utilisé, mais les gisements naturels concentrés diminuent et son recyclage devient incontournable. Dans le cadre de l'évaluation de la gestion de fin de vie des aérodynes, la prise en compte des matériaux, tel que le cuivre, devient donc pertinente.

Habituellement, les appareils sont découpés grossièrement pour séparer les différents matériaux, principalement l'aluminium et donc seule une fraction du câblage électrique est récupérée. Une opération spécifique de retrait du câblage avant le découpage de l'appareil pourrait améliorer les taux de recyclage du cuivre et diminuer la quantité d'impureté dans la fraction aluminium.

Le travail réalisé comporte deux volets : d'une part, l'évaluation du gisement potentiel de cuivre contenu dans le câblage électrique d'un avion en fin de vie et, d'autre part, sa caractérisation en vue d'un traitement thermique.

L'évaluation de cette opération a été réalisée sur un appareil réel dans le cadre du développement d'une plate-forme de démantèlement. Les principaux objectifs étaient d'évaluer le gisement de cuivre contenu dans les câbles électriques, les possibilités de séparation des matériaux qui les composent par voies mécanique et thermique et leur potentiel énergétique.

Les résultats obtenus sont encourageants. Le gisement en cuivre contenu dans le câblage représente 1 à 2 % du poids de l'appareil étudié. Après broyage des câbles, les fractions métallique et plastique sont désunies et donc séparables. La simulation d'un traitement thermique a également montré un bon niveau de séparation des fractions avec 98,5 % d'enlèvement de la fraction plastique et une valeur énergétique moyenne des câbles de 4 MJ/kg. Le choix d'une voie ou d'une autre est donc possible. Mener ce raisonnement sur l'ensemble des matériaux permettrait de sélectionner les meilleures techniques applicables.

Mots-clés : cuivre, fin de vie, pouvoir calorifique, énergie

EVALUATION OF THE VALORISATION OF ELECTRICAL CABLE FROM AN AERODYNE AT END OF LIFE

Loredan VIOT

ABSTRACT

Copper is a very commonly used material, however natural concentrated deposits are decreasing and recycling seems unavoidable. In the evaluation of end-of-life management of aerodynes, consideration of materials, such as copper, is important.

The work carried out has two aspects: firstly, the evaluation of the potential copper deposit which is contained in the electrical wiring of an end-of-life aircraft and, secondly, its characterization for heat treatment.

Usually, the devices are roughly cut to separate the different materials, and mainly, in order to salvage the aluminum. Only a fraction of the electrical wiring is recovered. The evaluation of a specific wiring removal operation before the cutting device could improve the recycling rates of copper and reduce the amount of impurity in the aluminum fraction.

The evaluation was carried out on a real aircraft as part of the development of a dismantling platform. The main objectives were to evaluate the copper deposit contained in the electric cables, the separation possibilities of the materials by mechanical and thermal ways and their energy potential.

The obtained results are encouraging. The copper deposit contained in the wiring represents 1 to 2 % of the weight of the aircraft studied. After grinding, the metallic and plastic fractions are disunited and therefore separable. The simulation of a heat treatment also showed a good level of separation of the fractions with 98,5 % removal of plastic part and a cable average energy value of 4 MJ/kg. The choice of one or the other is therefore possible. Conducting this reasoning on all the materials would allow selecting the best applicable techniques.

Keywords: cooper, end-of-life, heat of combustion, energy

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 ÉTAT DES CONNAISSANCES	3
1.1 Contexte autour du cuivre	3
1.1.1 Sources de cuivre	3
1.1.2 Aspects environnementaux	5
1.1.3 Contexte économique.....	5
1.1.4 Contexte réglementaire	7
1.2 Domaine aéronautique	8
1.2.1 Flotte actuelle.....	8
1.2.2 Câblage électrique.....	9
1.2.3 Gestion des câbles électriques	11
1.2.4 Techniques de recyclage	12
1.3 Classement et valeur potentielle	13
1.4 Données techniques	14
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE	17
2.1 Évaluation du gisement.....	17
2.1.1 Quantification	17
2.1.1.1 Zonage de l'appareil	18
2.1.1.2 Prélèvement du câblage	19
2.1.2 Composition.....	20
2.1.3 Identification	21
2.2 Caractérisation des composants	23
2.2.1 Essais de broyage.....	23
2.2.2 Pouvoir calorifique.....	25
2.2.3 Perte en masse à 550°C.....	26
CHAPITRE 3 RÉSULTATS ET ANALYSE.....	29
3.1 Évaluation du gisement.....	29
3.1.1 Quantification	29
3.1.2 Composition.....	36
3.1.3 Identification	39
3.2 Caractérisation des composants	40
3.2.1 Essais de broyage.....	40
3.2.2 Pouvoir calorifique.....	42
3.2.3 Perte en masse à 550°C.....	43
CHAPITRE 4 DISCUSSION ET PERSPECTIVES	45
4.1 Gisement de câbles	45
4.1.1 Qualité des gisements	45

4.1.2	Potentiel énergétique.....	47
4.2	Optimisation du démantèlement	48
4.2.1	Écoconception.....	48
4.2.2	Gestion de l'information	49
4.3	Perspectives.....	50
4.3.1	Perspectives opérationnelles	50
4.3.2	Poursuite des recherches	51
	CONCLUSION.....	53
	ANNEXE I MESURES DES FRACTIONS FIXES ET VOLATILES À 550°C	55
	LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	57

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 3.1	Fractions analysées au niveau du cockpit (A).....30
Tableau 3.2	Fractions analysées au niveau de l'APU (B)31
Tableau 3.3	Fractions analysées au niveau de la cabine (C)32
Tableau 3.4	Quantités et répartition du câblage34
Tableau 3.5	Gisement global38
Tableau 3.6	Résultats de broyage41
Tableau 3.7	Résultats des tests calorifiques.....42

LISTE DES FIGURES

		Page
Figure 1.1	Historique du cours du cuivre	6
Figure 1.2	Exemple de disposition de câbles électriques	10
Figure 1.3	Gabarit standard américain AWG.....	11
Figure 2.1	Zones considérées	19
Figure 3.1	Exemple d'un faisceau issu de la cabine.....	32
Figure 3.2	Ailes - zones et dimensions.....	33
Figure 3.3	Répartition du gisement de câbles mesurés dans les zones	35
Figure 3.4	Exemples de câbles électriques.....	36
Figure 3.5	Composition des câbles simples	37
Figure 3.6	Composition des câbles multiples et complexes.....	37
Figure 3.7	Distribution des gabarits	39
Figure 3.8	Fractions massiques à 550°C	44
Figure 4.1	Exemples de positionnement de fixations.....	49

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ALENA	Accord de Libre-Échange Nord-Américain
AMM	Aircraft Maintenance Manual
APU	Auxiliary Power Unit / <i>groupe auxiliaire de puissance</i>
ASTM	American Society for Testing and Materials
AWG	American Wire Gauge / <i>standard américain de gabarit de câble</i>
CCME	Conseil Canadien des Ministres de l'Environnement
CNESST	Commission des Normes, de l'Équité, de la Santé et de la Sécurité du Travail
CRIAQ	Consortium de Recherche et d'Innovation en Aérospatiale au Québec
CRJ	Canadair Regional Jet
CTA	Centre Technologique en Aéronautique
EEL	Electrical Equipment List / <i>liste des équipements électriques</i>
EPA	Environmental Protection Agency
ETFE	Éthylène tétrafluoroéthylène
EWL	Extended Wire List / <i>liste exhaustive des câbles électriques</i>
INERIS	Institut National de l'Environnement Industriel et des risques
IPC	Illustrated Parts Catalogue
ISRI	Institute of Scrap Recycling Industries Inc.
LCPE	Loi Canadienne sur la Protection de l'Environnement
LME	London Metal Exchange
MDDELCC	Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (anciennement MDDEP)
MDDEP	Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs (devenu MDDELCC)

XVIII

METPCB	Ministère de l'Environnement, des Terres et des Parcs de la Colombie-Britannique
OCDE	Organisation de Coopération et de Développement Économique
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
PCI	Pouvoir Calorifique Inférieur
PCS	Pouvoir Calorifique Supérieur
PTFE	Polytétrafluoroéthylène
PVC	Polychlorure de vinyle
PVDF	Polyfluorure de vinyldène
RBA	Résidus de Broyage Automobile
STEPPE	STation Expérimentale Des Procédés Pilotes en Environnement
VHU	Véhicules Hors d'Usage
WDM	Wiring Diagram Manual / <i>manuel de câblage</i>

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

UNITÉS DE BASE

°	degré (angle)
µg	microgramme
mg	milligramme
g	gramme
kg	kilogramme
L	litre
m	mètre
%	pourcentage

ÉNERGIES

J	joule
MJ	mégajoule

CALORIFIQUES

°C	degré Celsius (température)
----	-----------------------------

MÉCANIQUES

tr/min	tour par minute
kPa	kilopascal
Pa	pascal

INTRODUCTION

Actuellement, la démarche de gestion des aérodynes en fin de vie consiste dans un premier temps à sécuriser l'appareil, donc à retirer les matières potentiellement dangereuses, pour ensuite récupérer les équipements et composants qui présentent encore une valeur sur le marché. Il ne reste alors plus que les éléments structurels et les équipements endommagés ou désuets. Cette carcasse est alors découpée grossièrement pour en séparer les matériaux, principalement l'aluminium qui est présent majoritairement.

Avant les années 80, les avions commerciaux étaient principalement constitués d'alliages d'aluminium. Les matériaux composites représentaient alors moins de 10 % en masse de la composition des avions, mais leur proportion a rapidement augmenté pour atteindre 50 % sur certains appareils (787, A350) en 2015. Sur les avions d'ancienne génération (20 à 30 ans) actuellement recyclés, ce sont donc principalement les alliages d'aluminium qui intéressent les acteurs du recyclage.

Les câbles électriques, présents dans tous les appareils et en constante augmentation, représentent également une valeur en tant que matière. Les câbles électriques constituent un bon exemple d'assemblage de plusieurs matériaux mélangés. La partie conductrice des câbles est en cuivre, elle est recouverte d'un isolant et d'une gaine en matières plastiques ignifuges. Le traitement des câbles électriques est donc complexe et une étape de séparation des matériaux est bien souvent nécessaire avant un traitement spécifique pour chacun. Le cuivre très utilisé et en demande dans divers domaines est recyclable. De plus, actuellement les gisements naturels s'amenuisent, il est donc intéressant de le récupérer plutôt que de l'envoyer à l'enfouissement.

Le présent projet réalisé sur la plate-forme d'essais de démantèlement de St-Hubert, complété par des mesures en laboratoire, visait à déterminer le potentiel de valorisation des câbles électriques d'un avion de Bombardier modèle CRJ-100ER. Les principaux objectifs étaient d'évaluer le gisement de cuivre contenu dans les câbles électriques, les possibilités de

séparation des matériaux qui les composent et le potentiel énergétique de la fraction non métallique.

Ce travail est présenté comme suit, un premier chapitre sur l'état des connaissances énonce le contexte du cuivre, le domaine aéronautique et les procédés actuels. Le second chapitre présente la méthodologie suivie pour évaluer le gisement et le caractériser. Les résultats obtenus sont présentés au troisième chapitre, avant un retour critique dans la discussion au dernier chapitre suivi d'une conclusion et de recommandations.

CHAPITRE 1

ÉTAT DES CONNAISSANCES

Cette première partie présente tout d'abord le contexte du cuivre, puis son usage dans le domaine aéronautique. Les pratiques actuelles de gestion des appareils sont ensuite abordées.

1.1 Contexte autour du cuivre

Le cuivre est l'un des plus anciens métaux utilisés par l'Homme. D'ailleurs, l'âge du cuivre, autour de -3 000 à -1 500 ans, et l'âge du bronze (alliage composé de cuivre et d'étain), à partir de -1 800 ans, doivent leur nom à l'utilisation massive de ces matériaux. En 1886, la statue de la Liberté représentait la plus grande structure en cuivre jamais réalisée, composée de plus de 80 tonnes de feuilles de cuivre (Moreno, 2004).

Comme abordé ci-après, le cuivre peut avoir deux origines : naturelle ou recyclée. Il joue différents rôles dans le domaine environnemental et possède également une valeur économique en tant que matière première ou recyclée. Enfin, en tant que matière résiduelle, il est soumis aux réglementations, notamment internationales, pour limiter les risques sur l'environnement et la santé humaine.

1.1.1 Sources de cuivre

Le cuivre est un métal non ferreux qui se trouve naturellement dans le sol sous forme de minerais. Les gisements concentrés de cuivre ont été extraits depuis le début de son exploitation et il ne reste, aujourd'hui, que des sites dont la teneur moyenne est en dessous de 2 % (Calvo *et Al.*, 2016, Vignes, 2017).

La température de fusion du cuivre pur est donnée à 1 084°C, mais elle varie selon l'eutectique (Millet, 2010). Son élaboration à partir de minerais se fait en plusieurs étapes : d'abord une concentration par flottation pour atteindre 25 à 40 % de cuivre, puis une

purification pour former la matte liquide contenant 40 à 60 % de cuivre et par la suite le blister contenant 98 à 99,5 % de cuivre (INERIS, 2014). Enfin, l'affinage permet d'obtenir la pureté nominale de 99,9 % pour les applications industrielles. L'affinage peut se faire de deux façons : thermiquement, par refonte, ou électrolytiquement (Blazy *et Al.*, 2001).

Très largement utilisé, le cuivre est le troisième élément minéral le plus recyclé après le fer et l'aluminium (UNEP, 2010). En 2014, 30 à 35 % du cuivre utilisé provenait du recyclage (ICSG, 2016, Vignes, 2017). Selon l'Organisation de Coopération et de Développement Économique (OCDE), globalement le recyclage présente trois avantages écologiques. Il permet d'économiser des matières premières et donc de réduire le besoin en ressources naturelles non renouvelables. Il permet également de diminuer les quantités de matière enfouies et donc de réduire l'impact potentiel sur l'environnement. Enfin, il permet une économie d'énergie de 40 à 85 % (OCDE, 1995).

Concernant le cuivre, la demande énergétique pour la production d'un kilo de cuivre à partir de minerai est aujourd'hui de l'ordre de 105 à 110 MJ, dépendamment de sa teneur (Norgate *et Al.*, 2007). En comparaison, cette demande n'est que de 20 à 25 MJ/kg pour le cuivre recyclé (Blazy *et Al.*, 2002), soit quatre à cinq fois moins. Martchek (2000) estime, quant à lui, un potentiel de réduction d'énergie de 70 %. Cette réduction de la demande énergétique représente donc une économie au niveau de la production de cuivre. Cette économie peut également s'exprimer, en fonction de la source d'énergie, en équivalence de dioxyde de carbone (CO₂) non rejeté, un aspect qui est très utilisé aujourd'hui du point de vue de l'image environnementale et des impacts sur les changements climatiques.

Les ressources naturelles de ce métal s'épuisent (UNEP, 2013) et les teneurs des mines diminuent. C'est notamment le cas d'Escondida au Chili, la plus grande mine de cuivre au monde qui a fourni 6 % de la production mondiale en 2014 (BHP Billiton, 2014). En 2007, sa teneur était de 1,7 %, pour n'être plus que de 0,5 % en 2015 (Calvo *et Al.*, 2016). Si ce n'est pas déjà le cas, il va devenir incontournable de récupérer et de recycler le cuivre dans une plus grande proportion.

1.1.2 Aspects environnementaux

Le cuivre a de nombreuses applications et il est largement utilisé en électrique et électronique, en plomberie et chauffage, pour les pièces de monnaie, en construction (toitures), en équipements dans l'industrie chimique et pharmaceutique, comme catalyseur, jusqu'aux ustensiles et équipements de cuisine (OCDE, 1995, CCME, 1999).

Le cuivre fait partie des oligo-éléments essentiels à la vie (CalEPA, 2008, Picot, 2011). En faible concentration, il entre dans la composition de certaines protéines et intervient dans des réactions enzymatiques (Davis, 1987). Santé Canada, qui s'appuie sur les recommandations de l'Organisation mondiale de la Santé (OMS), préconise une consommation d'environ 2 mg par jour pour les adultes ou 30 µg/kg de poids corporel par jour (OMS, 1973, Santé Canada, 1992). En excès, au-delà de 15 mg/d (Santé Canada, 1992), il devient toxique. Il peut également servir d'élément sanitaire antimicrobien sur lequel les microorganismes ne peuvent se développer (Gregor, 2011), d'où son utilisation dans les pièces de monnaie, les ustensiles de cuisine et les conduites d'eau.

Il est couramment utilisé comme pesticide, appelé bouillie bordelaise (mélange de chaux et de sulfate de cuivre) (CalEPA, 2008). Parallèlement, le Conseil canadien des ministres de l'environnement (CCME) recommande une concentration maximale dans le sol de 150 mg/kg pour l'agriculture (CCME, 1991). La concentration moyenne de cuivre dans le sol canadien est estimée à 20 mg/kg, variant de 2 à 100 mg/kg, d'après le Ministère de l'environnement, des terres et des parcs de la Colombie-Britannique (METPCB, 1992). Les sols superficiels proches de fonderies de cuivre sont plus concentrés, dépassant les 1 000 mg/kg, à cause des retombées atmosphériques (Hutchinson et Whitby, 1974, Hazlett et coll., 1983, Kuo et coll., 1983, CCME, 1999).

1.1.3 Contexte économique

Le cuivre fait partie des matières premières cotées en bourse, d'où sa volatilité. Le principal marché mondial des métaux non ferreux est le *London Metal Exchange* (LME), où se font

environ 80 % des échanges. D'après les informations tirées du LME, le cours du cuivre a fortement fluctué ces dernières années comme illustré à la Figure 1.1. Au cours des dix dernières années, il a atteint une valeur de près de 3 000 US \$/t à la fin 2008, pour remonter et connaître un pic à 9 867 US \$/t en février 2011, avant de redescendre vers 4 500 US \$/t. Début 2017, il se situait autour de 6 000 US \$/t.

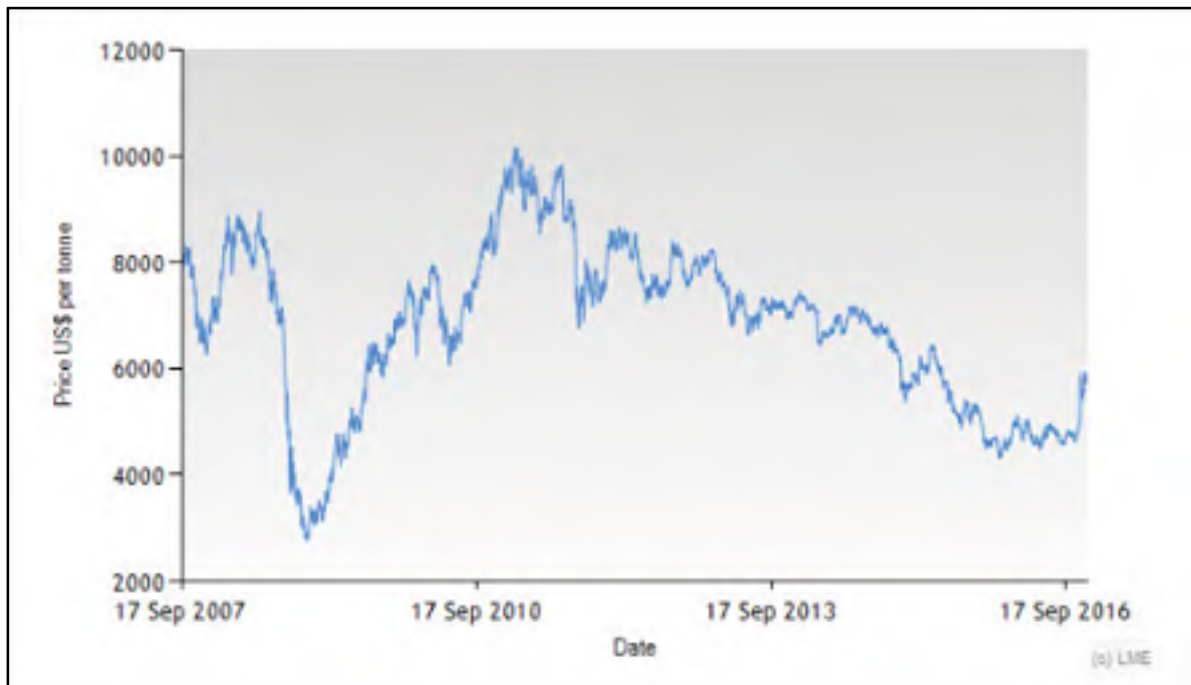


Figure 1.1 Historique du cours du cuivre
Tirée de LME, 2017

Paradoxalement à sa valeur, aujourd'hui tout le cuivre résiduel n'est pas récupéré et une partie se dirige encore vers l'enfouissement. Selon Hougé (2004), sans compter le transport, en 2002 les coûts d'enfouissement en Amérique du Nord se situaient entre 30 et 120 \$¹ par tonne. Aux États-Unis, le coût moyen était de 84 \$¹ la tonne, alors qu'au Québec le coût moyen était de 41 \$¹ la tonne (Hougé, 2004). Cette particularité québécoise concurrence fortement les voies de gestion alternatives visant à valoriser les matières résiduelles plutôt que de les stocker (enfouissement).

¹ Tarifs convertis en dollar canadien au taux du 4 mai 2004 (\$CAD/US \$ = 1,3941) (Hougé, 2004).

1.1.4 Contexte réglementaire

Dans la plupart des pays développés, les matières résiduelles, ou déchets, sont encadrés par différents textes visant à contrôler leurs déplacements, notamment pour les matières dangereuses. Ils servent également à limiter le transfert de ces matières des pays développés et organisés vers des pays en voie de développement, où le contrôle et la réglementation sont plus tolérants, voire inexistantes (OCDE, 2002). Au niveau international, la convention de Bâle porte sur le contrôle des mouvements transfrontières de déchets dangereux, ainsi que sur leur élimination et leur valorisation (Basel Convention, 1989).

Le cuivre solide, en tant que tel, n'entre pas dans la classification des matières dangereuses, bien qu'une vigilance existe concernant les poudres et les poussières potentiellement combustibles (CNESST, 2016). Par contre, lorsque les avions arrivent en fin de vie et sont déclarés comme tels, ils contiennent des matières dangereuses, ne serait-ce que leur carburant (CNESST, 2016).

Au Canada, c'est la Loi canadienne sur la protection de l'environnement (LCPE) de 1999 qui encadre une grande partie des textes et règlements applicables. Le Règlement sur l'exportation et l'importation de déchets dangereux et de matières recyclables dangereuses (DORS/2005-149), notamment, vise, d'une part, à protéger l'environnement du Canada ainsi que la santé humaine et, d'autre part, permet de veiller au bon respect des obligations et engagements internationaux (Gouvernement du Canada, 2005).

En Europe, c'est la directive n° 2008/98/CE qui présente les grandes lignes relatives à la gestion des déchets. Elle vise également à protéger l'environnement et la santé humaine (Conseil Européen, 2008). Aux États-Unis, l'acteur majeur au niveau fédéral est l'*Environmental Protection Agency* (EPA) qui gère depuis 1970 la réglementation et la protection de l'environnement.

En parallèle des lois et règlements, des accords entre plusieurs parties influencent la gestion des matières. Ainsi, depuis 1994, le Canada est lié aux États-Unis et au Mexique par l'accord de libre-échange nord-américain (ALENA). De plus, un accord bilatéral, entre le Canada et les États-Unis, concernant les déplacements transfrontaliers de déchets dangereux a été signé en 1986 (Gouvernement Canada, 2013).

1.2 Domaine aéronautique

Les aérodynes se divisent en deux catégories, ceux à voilure fixe (avions) et ceux à voilure tournante (hélicoptère). Leur utilisation peut ensuite être civile ou militaire. L'exploitation civile comprend les déplacements de passagers et celui des marchandises; les appareils sont les mêmes, seul l'aménagement intérieur change.

1.2.1 Flotte actuelle

Actuellement, le marché des avions est en croissance. Les deux principaux constructeurs, Airbus et Boeing, prévoient que la flotte mondiale doublera d'ici vingt ans. En effet, Airbus a revu ses prévisions à la hausse entre 2013 et 2016 et estime que, d'ici 2035, la flotte mondiale (passagers \geq 100 sièges et fret $>$ 10 tonnes) devrait doubler. Elle passera de 19 580 appareils début 2016 à 39 820 en 2035, et ce, avec la livraison de 33 070 appareils neufs et le remplacement de 12 830 appareils en fin de vie, soit 66 % de la flotte actuelle (Airbus, 2016). Son concurrent, Boeing, confirme cette perspective et estime que la flotte (passagers et fret) passera de 22 510 appareils en 2015 à 45 240 en 2035. Selon lui, au cours de cette période, 39 620 nouveaux appareils seront livrés et 16 890 appareils seront retirés, soit 75 % de la flotte actuelle (Boeing, 2016). Bombardier appuie également cette tendance et prévoit une augmentation d'environ 50 % sur dix ans, passant de 16 185 appareils en 2015 à 22 485 en 2025. Cette augmentation se fera avec la livraison de 8 300 appareils neufs, mais un plus faible retrait, seulement 2 000 d'appareils, soit 12 % de la flotte actuelle (Bombardier, 2016).

Deux grandes familles se distinguent parmi ces avions : les appareils régionaux et les longs courriers. La gamme des Canadair Regional Jet (CRJ) est monocouloir et fait partie de la

famille des appareils régionaux qui comprend les appareils de moins de 100 sièges. Les CRJ comportent de 50 sièges (CRJ-100 et 200) à 104 sièges (CRJ 1000). Au 31 janvier 2010, Bombardier avait livré plus de 1 040 appareils CRJ (Bombardier, 2010). Au-dessus de 100 sièges, Airbus considérait en 2013 que 78 % de la flotte aérienne commerciale mondiale était représentée par des appareils monocouloirs avec près de 12 600 appareils (Airbus, 2013). Cette tendance se confirme, puisque, dans sa projection de 2016, Airbus prévoit que 71 % des nouveaux appareils seront monocouloirs (Airbus, 2016).

Selon les chiffres d'Airbus et de Boeing, il ressort que, dans les vingt prochaines années, il devrait y avoir en moyenne 675 à 850 appareils à traiter par année, puis, à l'approche de 2035, ce seront les 40 000 à 45 000 appareils en service, majoritairement monocouloirs, dont il faudra gérer la fin de vie.

1.2.2 Câblage électrique

Le câblage électrique a deux fonctions : d'une part, il achemine l'énergie électrique aux équipements et appareils pour réaliser une action, et, d'autre part, il transporte l'information pour permettre la communication et les contrôles dans le système. Pour l'énergie, les câbles doivent supporter l'intensité du courant qui les traverse et avoir un gabarit en conséquence (FAA, 2013). Pour l'information, les câbles transportent un signal de faible courant modulé, ils ont donc un faible gabarit. Dans un avion, la répartition du câblage électrique n'est pas homogène. La partie énergie provient des moteurs ou des batteries, elle passe par les contrôles et les transformateurs pour alimenter ensuite les commandes et les équipements. La partie contrôle relie tous les éléments et elle fait le lien entre les informations reçues et traitées qui sont transmises aux différents systèmes (FAA, 2013). Un exemple de disposition du câblage électrique est illustré à la Figure 1.2.

La plupart des câbles sont composés d'un ou de plusieurs conducteurs, d'un isolant et d'une gaine protectrice. Le conducteur métallique est la partie principale d'un câble, celle qui transporte le courant. Les principaux métaux utilisés dans les câbles électriques sont

l'aluminium, en raison de son faible poids, et le cuivre, pour sa grande conductivité. Toutefois, ces métaux ne sont pas toujours utilisés purs et des traitements peuvent leur être appliqués, notamment des revêtements d'étain ou de nickel (FAA, 2013).



Figure 1.2 Exemple de disposition de câbles électriques

Les câbles sont désignés selon le standard américain, soit l'*American Wire Gauge* (AWG), comme illustré à la Figure 1.3. L'indication de ce système n'est pas forcément intuitive, puisque l'ordre des valeurs données aux câbles est l'inverse de leurs sections. Plus la valeur est faible, plus la section ou le gabarit est grand. La logique derrière ce système est de considérer le nombre d'opérations pour la constitution d'un fil à partir d'une barre brute. Ce système calcule le diamètre selon la formule 1.1, tirée de l'ASTM B258-14 (ASTM International, 2014) :

$$d_n = 0,127 \times 92^{\left(\frac{36-n}{39}\right)} \quad (1.1)$$

Avec :

d_n = diamètre du conducteur en mm

n = numéro AWG

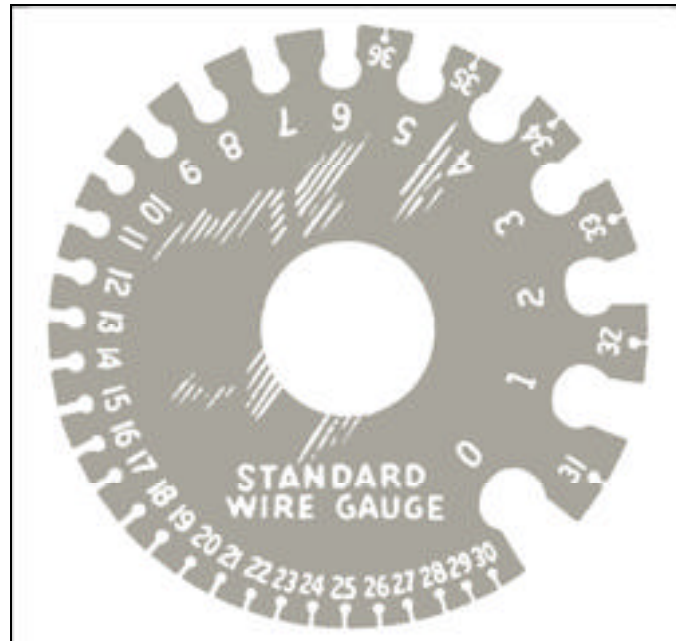


Figure 1.3 Gabarit standard américain AWG
Image reproduite avec la permission de Pearson Scott Foresman, 2007

L'isolant et la gaine sont composés de matière plastique. Historiquement, les principaux matériaux utilisés étaient le polychlorure de vinyle (PVC), la fibre de verre, le nylon (polyamides), les polyalcènes et le polyfluorure de vinylidène (PVDF). Par la suite, de nouveaux matériaux sont apparus, tels que l'éthylène tétrafluoroéthylène (ETFE) et le Téflon ou polytétrafluoroéthylène (PTFE), ainsi que d'autres composés de mica ou de fluoropolymère (Cinibulk, 2001, FAA, 2013).

1.2.3 Gestion des câbles électriques

Pour le secteur de l'automobile, la gestion des véhicules hors d'usage (VHU) est déjà bien développée et réglementée. Leur recyclage comprend trois étapes : un premier démantèlement pour récupérer les pièces réutilisables et évacuer les matières dangereuses résiduelles, puis un pressage pour conditionner les véhicules en vue de leur stockage et manipulation ultérieure et, enfin, un déchiquetage, pour pouvoir séparer et trier les matériaux restants (MDDELCC, 2015). Le poids moyen de cuivre par véhicule est de 15 à 20 kg (RECORD, 2014).

Dans le bâtiment et la construction, pour les déchets de démolition et matières résiduelles de chantier, des procédures se mettent en place et des plans de démantèlement avec des objectifs apparaissent. Le Ministère du développement durable, de l'environnement et des parcs (MDDEP) vise le recyclage de 80 % des résidus de démolition (MDDEP, 2011). D'après la fonderie Horne, une maison type de 70 m² renferme entre 70 et 90 kg de cuivre (Glencore, [s.d.]), et ce, sans considérer les éventuelles couvertures de toitures faites en cuivre.

Dans l'aéronautique, des centres de recyclage ont ouvert ces dernières années, mais les informations les concernant sont peu nombreuses, surtout en ce qui concerne les taux de recyclage. De plus, leur rentabilité semble encore mitigée. Les opérations sont calquées sur le modèle des VHU, c'est-à-dire que les appareils sont sécurisés, les pièces et les équipements de valeur sont récupérés, puis la carcasse est découpée et broyée.

1.2.4 Techniques de recyclage

Concernant le câblage électrique, Asmatulu *et al.* (2013) constatent, dans leur état de l'art du recyclage d'avion, qu'une fois retiré de l'appareil, le câblage est plus aisé à recycler. Les câbles de grandes sections peuvent être broyés, puis les matériaux peuvent être séparés par gravité, par courant électrique ou par moyen optique. Ils abordent également la complexité de traiter les câbles de petites sections et ils préconisent un traitement thermique pour obtenir la fraction métallique, tout en récupérant la chaleur produite comme source complémentaire d'énergie (Asmatulu *et al.*, 2013).

S'il est difficilement séparable par des moyens mécaniques, le métal en mélange peut être traité par fusions successives pour former des lingots qui sont ensuite vendus comme matière brute ou bien envoyés pour affinage (OCDE, 1995). Toutes les installations n'utilisent pas les mêmes procédés et ne peuvent donc pas forcément traiter les mêmes matériaux. Le choix du traitement dépend donc des matériaux présents et de leur concentration. C'est aussi selon les disponibilités de traitement que les matières résiduelles peuvent être recyclées ou valorisées.

Selon L'OCDE (1995), la filière de recyclage du cuivre comporte deux opérations principales, la fusion et l'affinage. La fusion est faite dans des fours à haute température (haut-fourneau) dans des conditions contrôlées pour produire un métal apte à l'affinage. L'affinage permet ensuite d'éliminer les impuretés et d'atteindre la pureté désirée. Il peut être réalisé dans un four ou par électrolyse (Blazy *et Al.*, 2001).

La fusion comprend trois étapes, la première permet d'amener la concentration en cuivre de 30 à 80 %, l'étape suivante permet d'atteindre 95 % de cuivre et, enfin, la coulée de l'anode qui atteint près de 99 % de cuivre. C'est donc la teneur en cuivre des éléments à recycler qui détermine à quelle étape de la fusion ceux-ci peuvent être introduits. L'ensemble des procédés doit être équipé de filtres pour collecter les fumées, les vapeurs et les poussières émises.

L'affinage se fait principalement par électrolyse entre l'anode issue de la fusion et une cathode. Le cuivre de l'anode, via un bain électrolytique composé d'acide sulfurique, se dépose sur la cathode. Les impuretés tombent au fond du bain (OCDE, 1995).

Les câbles qui se présentent individuellement, comme ceux pour la puissance, peuvent être dénudés mécaniquement et la séparation plastique-métal peut se faire facilement. En revanche, les câbles en faisceaux devraient être d'abord dissociés pour être dénudés. Cette action est complexe à réaliser mécaniquement; la méthode par broyage s'avère alors plus efficace.

1.3 Classement et valeur potentielle

La valeur des matériaux pour le recyclage dépend à la fois des marchés (offre et demande), mais aussi de leur niveau d'adéquation avec les spécifications industrielles (taille, qualité, pureté, conditionnement...) (OCDE, 1995). Ses spécifications permettent d'homogénéiser les catégories de matière d'un pays à l'autre en fixant les limites minimales de teneur en métaux et maximales d'impuretés. Certaines catégories ne doivent pas inclure de revêtements ou

substances étrangères, d'autres ne doivent pas avoir trop de traitement de surface (plombé, étamé, brasé...), ou encore ne pas contenir trop d'huile, de fer ou de composés non métalliques (OCDE, 1995). De plus, elles doivent être dépourvues de substances représentant un risque pour les installations et la santé humaine.

Selon l'*Institute of Scrap Recycling Industries Inc.* (ISRI, 2016), quatre catégories s'appliquent au cuivre :

- le cuivre n°1, le plus pur et encore brillant, concerne le cuivre non traité, non peint, non soudé;
- le cuivre n°2 concerne le cuivre usagé, peint, soudé ou avec des résidus d'isolant calcinés;
- les feuilles de cuivre concernent le cuivre utilisé en toiture et gouttières;
- le cuivre isolé concerne le cuivre recouvert d'isolant plastique ou non conducteur.

La valeur est donc conditionnelle à l'état des éléments et il apparaît que la valeur des éléments en vrac est peu élevée. En comparaison, le cuivre issu des mines serait financièrement exploitable avec du minerai à partir d'un taux de 0,29 % de cuivre (Bokovay, 2006).

1.4 Données techniques

Le CRJ-100ER étudié est un appareil dont la masse totale est de 12 565 kg, il comporte deux moteurs pour une masse totale de 2 132 kg, soit 17 % du poids de l'appareil (mesures effectuées sur le terrain). En plus des moteurs, lors de la première étape de démantèlement et de valorisation, près de 450 pièces peuvent être retirées pour une masse de 1 165 kg, soit 9 % du poids de l'appareil. Les appareils de cette génération sont principalement constitués d'alliages d'aluminium. Ces alliages sont nommés selon un code à 4 chiffres. Pour le CRJ, les principaux sont le 2024 et le 7075. Ils comportent chacun une fraction de cuivre, 4,5 % pour le 2024 et 1,6 % pour le 7075 (FAA, 2008).

Parmi les documents techniques d'un appareil, le *Wiring Diagram Manual* (WDM) porte sur la partie des équipements et des câbles électriques. La partie *Extended Wire List* (EWL) expose la liste exhaustive des 30 690 câbles existants pour les Canadair Regional Jet (CRJ) désignés sous le nom CL-600-2B19, qui correspond aux séries 100, 200 et 440 des CRJ. Ce document présente, pour chaque câble, le ou les groupes de numéros de série concernés, son code d'identification, le code du schéma qui l'illustre et les codes des équipements et branchements auxquels il est rattaché.

Bien que les appareils puissent être aménagés différemment et subir des modifications ou des mises à jour, plusieurs appareils peuvent avoir des câbles identiques. Les appareils concernés sont donc regroupés sous un code à trois chiffres (de 001 à 033), utilisé selon chaque câble. La correspondance qui permet d'identifier dans quel groupe se situe un appareil particulier est donnée par l'*ATA/Page Effectivity List*, qui indique le code correspondant pour chaque numéro de série.

La codification des câbles indique le numéro du système² (1, 2 ou 3), la fonction du circuit, son numéro dans ce circuit, le segment², le gabarit (AWG), la phase² (A, B ou C), le code couleur² et le lien à la masse².

Par exemple, Boeing a travaillé sur l'arborescence de ses documents techniques pour faciliter le travail des opérateurs lors des activités de maintenance ou de réparation. La création d'un *Dynamic Wiring Diagrams* pour le Boeing 787 Dreamliner permet d'accéder plus rapidement et facilement aux informations nécessaires (Dobrowski, 2008).

² si applicable.

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE

Avant le choix d'une filière de valorisation, la connaissance du gisement est nécessaire. Ensuite, une caractérisation aide à déterminer le comportement du gisement au cours des différentes étapes, de la récupération au traitement en passant par un éventuel conditionnement. Dans le cas de câbles électriques, l'étape de séparation des composants influence les possibilités de traitement. Cette séparation peut se faire mécaniquement ou thermiquement. La méthode suivie est présentée dans cette partie.

Pour l'évaluation des possibilités de traitement de ces câbles, plusieurs informations ont été nécessaires. La quantité de câbles présente dans l'appareil, leur distribution et leur agencement selon le gabarit ont permis d'évaluer le gisement potentiel de matières issu du traitement de ces avions en fin de vie. Ensuite, leur caractérisation a porté sur la séparabilité mécanique des composants (en fonction des différents gabarits) qui a été déterminée par leur comportement au broyage. Puis, le potentiel énergétique a été évalué par leur pouvoir calorifique et enfin, la séparabilité thermique a été déterminée par la mesure de quantité de cendres résiduelles.

2.1 Évaluation du gisement

L'évaluation du gisement s'est faite par croisement des données techniques sur l'identification des câbles issue du *Wiring Diagram Manual* (WDM) qui dresse la liste exhaustive des câbles présents à bord de chaque modèle d'appareil, avec des mesures expérimentales de masses faites sur les échantillons prélevés de l'appareil étudié.

2.1.1 Quantification

Comme ce peut être le cas pour des appareils en fin de vie, le CRJ utilisé dans le cadre de la présente étude a précédemment servi pour la récupération de pièces fonctionnelles, qui

peuvent profiter à d'autres appareils toujours en service. Lors de cette opération, certains composants ont été retirés en emportant une petite partie du câblage connexe. Cette quantité manquante a été considérée comme négligeable dans l'estimation des masses présentes dans l'appareil.

2.1.1.1 Zonage de l'appareil

Pour quantifier l'ensemble des câbles de l'appareil, un zonage en sections homogènes a permis de décomposer l'appareil et de le traiter selon les différentes parties. Le zonage choisi comporte quatre zones représentées sur la Figure 2.1 et définies ci-après.

A - Cockpit : comprend uniquement la partie avant du fuselage, soit celle du poste de pilotage et de l'espace en dessous. Cette zone restreinte est dense en câbles.

B - APU : située à l'arrière, elle porte par commodité le nom de la source de puissance auxiliaire (APU) qui s'y trouve. Cette zone n'est pas pressurisée en vol et concentre les sources de puissance de l'appareil.

C - Cabine : située entre le cockpit et l'APU, dans la partie tubulaire du fuselage. Cette zone comprend la partie cabine (passagers), l'espace avionique (équipements électriques et électroniques) en dessous et l'espace cargo (bagages). Elle se caractérise par des faisceaux de câble de grandes longueurs.

D - Reste : comprend les parties restantes, les ailes et les stabilisateurs qui ne sont pas non plus pressurisés en vol et qui contiennent relativement peu de câbles.

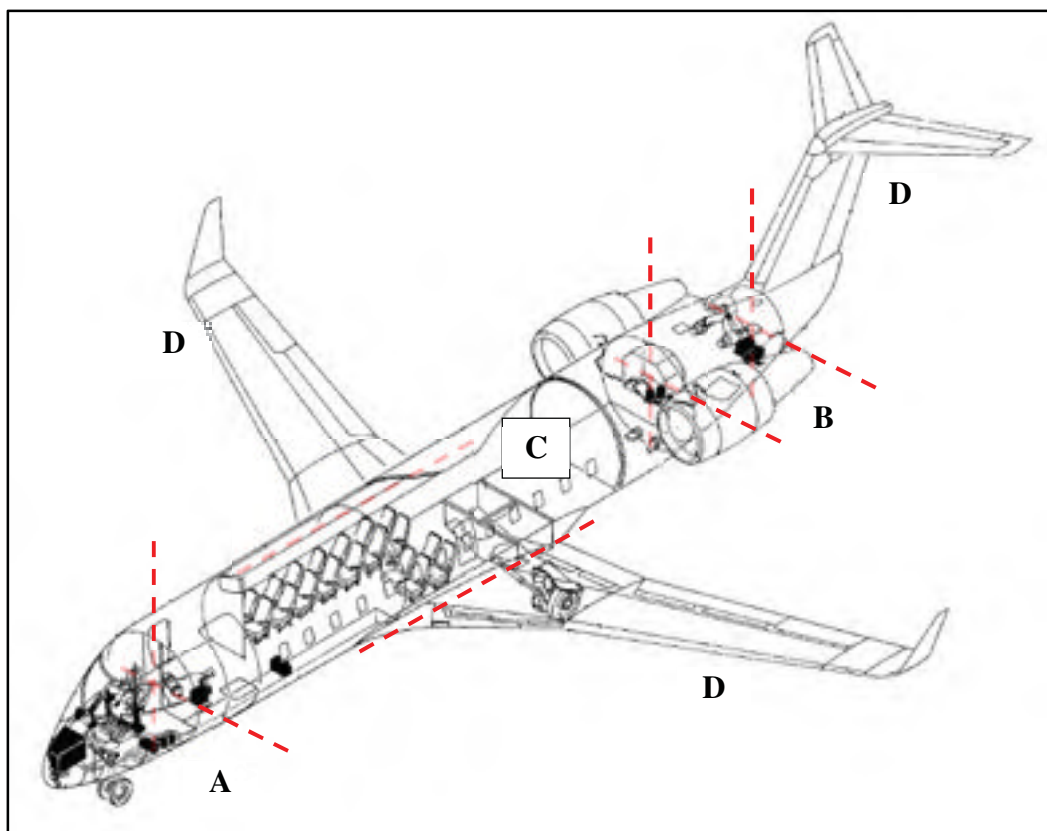


Figure 2.1 Zones considérées
Adaptée de *Illustrated Parts Catalog*, 2009

Alors que les gros porteurs ont deux à quatre moteurs situés au niveau des ailes, la gamme des jets régionaux, comme les Canadair Regional Jet (CRJ) de Bombardier, comporte deux moteurs situés à l'arrière, au niveau de la queue. Leur câblage passe donc par la zone du moteur auxiliaire, l'*Auxiliary Power Unit* (APU) et, de ce fait, sur ces appareils, il y a beaucoup moins de câbles au niveau des ailes. Cette zone a donc été évaluée simplement d'après la documentation technique fournie par le partenaire industriel. La majeure partie des câbles à traiter se trouvait donc au niveau du fuselage (tube), soit du cockpit à l'APU.

2.1.1.2 Prélèvement du câblage

Pour déterminer le gisement, le prélèvement dans chaque zone d'une partie représentative du câblage électrique a permis d'en estimer par extrapolation la quantité globale. En considérant

que le câblage était également réparti de chaque côté de l'appareil, seule la moitié tribord a principalement été prélevée. Cette méthode a permis de réduire les interventions sur l'appareil. Selon la disposition des câbles dans les zones, différentes approches ont été utilisées pour quantifier le gisement. Les câbles seuls ont été analysés simplement, les autres en pelote ont été découpés en faisceaux à la manière d'un élagage. Ces faisceaux étaient donc formés d'un ensemble de câbles orientés dans le même sens et reliés entre eux.

Pour l'analyse de ces faisceaux, lorsqu'ils étaient homogènes sur leur longueur, une fraction était analysée puis rapportée au total et les masses mesurées de chaque gabarit étaient extrapolées à la masse totale du faisceau. Lorsqu'au contraire, les faisceaux étaient hétérogènes à cause de nœuds ou d'embranchements multiples, c'est l'ensemble du faisceau qui a été analysé. Enfin, pour certaines parties considérées comme uniformes sur de grandes longueurs, seule une fraction a été analysée, puis extrapolée à l'aide des longueurs estimées.

Pour chaque prélèvement, deux méthodes pouvaient s'appliquer, soit par démontage systématique non destructif, soit par découpage des faisceaux en petites sections de part et d'autre des fixations. Ces deux méthodes ont été expérimentées.

Les prélèvements ont fourni les masses globales de câbles mélangés et l'analyse détaillée d'une fraction représentative a permis d'en estimer la composition et de caractériser chaque composant.

2.1.2 Composition

Comme indiqué dans le WDM, les gabarits de câble vont de AWG 0 à 22, mais leur masse et les fractions massiques de leurs constituants n'y sont pas mentionnées. Les ratios isolant, gaine et conducteur ne sont pas proportionnels d'un gabarit à l'autre. La connaissance de la composition des câbles renseigne sur les taux de matériaux (métalliques, plastiques ou autres) récupérables. Elle indique, par conséquent, quels câbles peuvent être les plus intéressants à recycler, notamment pour le cuivre qu'ils contiennent.

La méthode utilisée consistait à prélever des échantillons de chaque gabarit et type de câble, d'en mesurer des longueurs et de les peser. Cette étape a permis d'obtenir leur masse linéaire. Ensuite, les échantillons de câble ont été dénudés manuellement, puis les constituants (gaine extérieure, tresse de protection, isolant et conducteur) ont été pesés séparément pour déterminer leur fraction massique respective. La composition des conducteurs a également été notée, c'est-à-dire le nombre de brins métalliques et la mesure de leur diamètre moyen avec un pied à coulisse numérique ($\pm 0,01$ mm).

Par rapport au conducteur métallique en cuivre, l'isolant et la gaine (en matière plastique) sont relativement légers. Afin d'améliorer la précision des mesures, principalement sur les petits gabarits, l'analyse a été effectuée en laboratoire avec des longueurs suffisantes (entre 500 et 800 mm ± 1 mm) et une balance analytique de précision ($\pm 0,01$ mg), modèle AT261 DeltaRange de chez Mettler-Toledo, afin de réduire les incertitudes.

La connaissance des fractions massiques a permis, par la suite, de déduire les quantités des composants directement à partir d'une masse donnée de câbles. Cette information a facilité la détermination expérimentale du gisement.

2.1.3 Identification

L'identification a été utilisée comme information théorique de départ. Elle renseigne sur les câbles initialement présents dans un appareil avant toute intervention de démantèlement. Selon le degré de traitement et d'exploitation de ces données, il est possible d'exprimer cette information par fonction de système, phase ou gabarit, voire même, par équipement ou zone de l'appareil.

Dans le WDM, les informations de l'*Extended Wire List* (EWL), fournissent la liste exhaustive des câbles pour tous les appareils d'un modèle donné, ici les CRJ-100/200/400. Dans le cas du CRJ-100 considéré, cela représente près de 30 700 câbles répartis sur 140 fonctions. À partir des documents sous format PDF, la démarche était donc de traiter ces

données en les restructurant afin de pouvoir réaliser des filtres en vue de faire ressortir les informations souhaitées, telles que les câbles correspondants à l'appareil étudié et les gabarits.

Le premier tri consistait à distinguer les câbles présents dans l'appareil étudié, selon son numéro de série : 7267, de manière à avoir une indication sur la composition d'un cas réel. Le tri suivant a été fait selon les différents gabarits AWG des câbles, information indiquée directement dans leur codification et qui a permis de dresser une représentation de leur distribution. Cela donnait aussi une indication sur le choix des moyens à utiliser pour traiter ces câbles.

Aucun renseignement explicite sur la masse des câbles et des composants n'était indiqué dans les documents disponibles. Bien qu'une indication était donnée sur les équipements et connecteurs reliés à chaque câble, la déduction des longueurs de câbles aurait nécessité de croiser ces informations avec l'*Electrical Equipment List* (EEL) et d'utiliser, lorsque disponible, le positionnement approximatif de ces éléments dans l'appareil. Dans cette approche, la disposition des câbles a été considérée comme étant en ligne droite d'un point à l'autre. Le résultat est donc minoré par rapport à la réalité. Cette approche a été utilisée pour l'estimation du câblage au niveau des ailes.

L'identification des câbles présents dans un appareil est intéressante puisqu'elle présente un portrait en termes de répartition des câbles en fonction de leur gabarit. Cette donnée peut être vue comme un inventaire du câblage, soit le nombre de câbles pour chaque gabarit. Par contre, elle ne donne pas d'information précise sur les quantités réelles de câbles. En effet, un gabarit de câble moins représenté peut très bien être de plus grande longueur totale qu'un autre plus représenté mais seulement en petites longueurs. Par conséquent, la quantité représentative de la présence réelle des câbles peut être faite en précisant leur longueur et/ou leur masse.

Le recours aux longueurs s'est fait principalement pour l'estimation du câblage au niveau des ailes. En effet, les longueurs étant plus délicates à prendre et à déterminer expérimentalement, ce sont les masses, plus fiables, qui ont été mesurées pour compléter les données et obtenir une estimation de la quantité de câbles.

2.2 Caractérisation des composants

Les câbles se présentent sous forme de faisceaux maintenus par de nombreuses attaches plastiques, des bandes adhésives, des enveloppes plastiques et, éventuellement, des pinces métalliques si les câbles sont démontés et non coupés. Comme présentée dans l'état des connaissances, une étape de broyage est souvent utilisée pour désolidariser des éléments avant de pouvoir les séparer. D'un autre côté, le recyclage des métaux passe par leur refonte. Dans le cas du cuivre, il faut dépasser les 1 000°C et, à cette température, les éléments plastiques sont dégradés.

Devant le besoin énergétique tant pour la séparation que pour le recyclage, la voie de traitement thermique est donc une option intéressante pour les constituants non métalliques des faisceaux de câbles. En effet, la valorisation thermique des matières résiduelles est une solution de remplacement à l'enfouissement et constitue une possible source de production d'énergie. Or, tout traitement thermique forme des sous-produits solides qui ne présentent plus qu'une faible valeur en tant que matière. Ces aspects ont donc été choisis pour caractériser les éléments du câblage électrique, à commencer par la séparation mécanique par broyage.

2.2.1 Essais de broyage

Les résultats du broyage renseignent sur le comportement de composants selon les paramètres utilisés (tamis, rotor, vitesse). La taille des particules en sortie de broyeur dépend principalement du tamis. Les particules inférieures à la taille de sa maille passent au travers, les autres sont retenues et continuent à être broyées. Le choix de l'utilisation d'un rotor à coupe parallèle ou à six disques est fonction du matériau traité. Il ne change pas

significativement l'aspect des particules (coupées ou déchiquetées) en sortie de broyeur, mais permet plutôt de prolonger la durée de vie de la machine et des outils de coupe. Quant au choix de la vitesse de rotation, elle influence principalement sur la durée du broyage. Cet aspect est utile dans le cas de matériaux sensibles ou qui réagissent à l'échauffement, ce qui pourrait être le cas des matières plastiques.

Dans le cas de matériaux ductiles (comme les plastiques), le rotor à coupe parallèle associé à une vitesse modérée à élevée (2 000 à 3 000 tr/min) est recommandé. Dans le cas de matériaux plus durs, comme les conducteurs métalliques des câbles, le rotor à six disques associé à une vitesse lente à modérée (700 à 1 500 tr/min) est recommandé.

L'objectif de l'étape de broyage visait à vérifier le comportement des composants, principalement la possibilité de séparation ultérieure des éléments des faisceaux de câbles. Les essais ont été réalisés avec un broyeur à couteaux de laboratoire, modèle SM300 de Reitsch. Pour les essais de matériaux en mélange (câbles complets), le rotor à six disques a été préféré. Bien que capable de broyer du matériel informatique comme des cartes mères d'ordinateur, cet équipement n'est pas destiné à broyer des pièces métalliques. Les attaches en acier (*clamp*) et la visserie ont donc été retirées avant broyage.

À l'échelle de laboratoire, les câbles testés ont été préparés en lots de morceaux de 100 à 200 mm, selon le gabarit. Ils ont été introduits manuellement, plus ou moins rapidement selon leur gabarit, en surveillant le comportement de l'équipement pour ne pas le surcharger. Deux vitesses, 700 et 1 400 tr/min, ont été testées. Les essais ont été réalisés avec le rotor à six disques et avec les tamis disponibles (6; 1,5; 0,5 et 0,25 mm). Les essais ont commencé avec le tamis de 6 mm.

En cas de présence dans le broyat de morceaux avec des éléments toujours imbriqués (métal et plastique), un broyage successif est effectué avec un tamis inférieur et ainsi de suite jusqu'à ce que tous les composants soient dissociés. Les éléments broyés ont ensuite servi pour les mesures de pouvoir calorifique.

2.2.2 Pouvoir calorifique

La valeur de pouvoir calorifique renseigne sur la capacité énergétique d'un élément en milieu oxydant (contenant O₂), c'est-à-dire l'énergie produite, sous forme de chaleur, lors d'une combustion complète. Elle s'exprime en joule par unité de masse, le plus souvent en kJ/kg ou en MJ/kg. Selon les conditions, deux types de pouvoir calorifique sont utilisés, le pouvoir calorifique supérieur (PCS) et le pouvoir calorifique inférieur (PCI).

Lors d'une combustion, les principaux éléments dégagés sont du dioxyde de carbone (CO₂) et de la vapeur d'eau (H₂O). Cette eau peut être présente au départ dans le matériau et elle constitue son humidité, mais elle peut aussi se former à partir de matériaux secs, s'ils contiennent de l'hydrogène (H). Le PCS inclut l'énergie de changement d'état de l'eau; il est utilisé pour des procédés équipés de condensateurs ou en laboratoire, comme c'était le cas dans cette étude. Le PCI, moins élevé que le PCS, ne prend pas en compte l'énergie perdue par vaporisation de l'eau (chaleur latente). Il est plus couramment utilisé dans des systèmes sans condensation de vapeur.

Les essais réalisés en laboratoire concernaient donc le PCS et ont été effectués avec un calorimètre, modèle Cal2k-Éco, de Digital Data Systems Ltd. La méthode suivie est une méthode sèche, développée par la compagnie, dont le principe s'appuie sur la méthode humide classique D 240 de l'*American Society for Testing and Materials* (ASTM).

Chaque matériau composant les faisceaux de câbles a été mesuré par échantillonnage des résidus de broyage précédents. La bombe calorimétrique de volume 220 mL peut accueillir 0,2 à 2,0 g de matière. Elle est ensuite pressurisée à 3 000 kPa à l'oxygène pur. Les pesées ont été faites avec une balance analytique de précision ($\pm 0,1$ mg), modèle AT261 DeltaRange de Mettler-Toledo.

Le PCS exprime l'énergie totale que peut dégager un matériau ou un mélange de matériaux. En conditions réelles, une partie de cette énergie est consommée par la fraction d'eau pour

son changement d'état de liquide à gaz (chaleur latente). Sans système à condensation, cette vapeur (énergie) est évacuée avec les fumées. Les résultats obtenus sont donc les valeurs les plus favorables.

La méthode suivie utilisait des masses faibles (< 2,0 g) et ne permettait pas de mesurer ensuite correctement la fraction de cendre (sous-produit solide) qui en résultait. Afin d'évaluer cette quantité, la méthode gravimétrique de mesure des fractions fixe et volatile à 550°C a été utilisée sur les échantillons prélevés.

2.2.3 Perte en masse à 550°C

Cette étape vise à évaluer la possibilité de séparation thermique des constituants de câbles électriques. Classiquement, la mesure de perte de masse à 550°C vise à évaluer les fractions fixe et volatile de la portion sèche d'un produit. Dans le cas de produits humides (boue, bois, sol, etc...), cette mesure se fait après une étape de séchage à 103-105°C. Ici, les éléments ont été considérés comme déjà secs. Un essai préliminaire a montré que le conducteur métallique ne subit aucune modification massique à 550°C. La valeur s'exprime en pourcentage (%) qui peut être ramené à une masse totale ou partielle selon la grandeur considérée.

Les essais ont été réalisés sur des échantillons à l'aide d'un four à moufle, modèle LEF-203P de LabTech, réglé à 550°C. Les pesées ont été faites avec une balance analytique de précision ($\pm 0,01$ mg), modèle AT261 DeltaRange de Mettler-Toledo.

Le principe de cette méthode gravimétrique consistait à comparer la masse avant et après passage au four. Le conducteur métallique ne subissant pas de perte de matière à cette température, toute variation de masse était attribuée à la dégradation de la gaine et de l'isolant. Après passage au four, l'échantillon a été refroidi à température ambiante dans un dessiccateur pour éviter d'éventuelles interférences avec l'humidité ambiante avant la pesée finale.

À l'aide des précédents résultats de pesée et du détail des quantités de conducteur, d'isolant et de gaine pour chaque calibre, il a été possible d'en déduire la fraction volatile et surtout la quantité de cendres résiduelles. Ces résidus sont considérés comme des impuretés dans le cas de fonte de câbles entiers (c.-à-d. incluant leur gaine).

Les résultats de l'évaluation du gisement (identification, composition et quantification) et de sa caractérisation (essais de broyage, mesure du pouvoir calorifique et mesure de perte de masse à 550°C) sont présentés au chapitre suivant.

CHAPITRE 3

RÉSULTATS ET ANALYSE

L'appareil sur lequel a été faite l'évaluation est d'abord passé par une étape de récupération des pièces potentiellement valables. Cette étape a consisté à récupérer les moteurs, une grande partie de l'instrumentation, des batteries et des sous-systèmes utilisables sur d'autres avions de la gamme CRJ. À partir de la méthodologie présentée précédemment, les résultats suivants viennent de l'exploitation de la documentation et des mesures expérimentales de ce qui restait sur la carcasse de l'appareil. Les paramètres analysés sont l'évaluation du gisement de câbles avec ses fractions métallique (conducteur) et plastique (gaine et isolant) et leur caractérisation.

3.1 Évaluation du gisement

L'évaluation du gisement a été faite selon deux approches : par l'identification des câbles potentiellement présents d'après la documentation, qui renseigne principalement sur la répartition numérique des gabarits de câble, et par l'analyse de leur composition et de leur quantification mesurées expérimentalement, qui détermine le gisement massique présent.

3.1.1 Quantification

La quantification des câbles dans les différentes zones a été effectuée d'après des prélèvements de câblage, principalement sur la partie tribord. Pour retirer le câblage de l'appareil, il s'est avéré qu'il était plus pratique, du point de vue des manipulations, de découper les câbles en petits segments plutôt que de défaire leurs fixations et de les sortir en faisceaux complets de grandes longueurs. En effet, en raison des multiples attaches sur la structure et des interconnexions entre les faisceaux, le retrait non destructif d'un faisceau de câbles est une opération complexe qui pourrait s'apparenter à retirer une branche de lierre sans l'abimer d'un grillage. La réutilisation des câbles tels quels paraît donc délicate.

Cockpit (A)

Le cockpit était une zone exiguë. Bien que la plupart des équipements de vol aient été retirés, le câblage était dissimulé derrière des panneaux et donc difficile d'accès. Le câblage a été décomposé en plusieurs morceaux, les plus hétéroclites ont été entièrement mesurés, les autres, plus simples, ont été évalués d'après la composition d'une fraction de leur longueur. L'aperçu des relevés pour le cockpit est présenté au Tableau 3.1.

Tableau 3.1 Fractions analysées au niveau du cockpit (A)

Faisceau	Masse totale (g)	Masse échantillonnée (g)	Fraction échantillonnée (%)
A	9 804	9 804	100
B	3 409	649	19
C	1 501	1 501	100
D	2 356	2 356	100
E	18 489	18 489	100
F	10 866	10 866	100
Somme tribord	46 425		
Somme zone A	92 849	43 665	47

APU (B)

L'APU était relativement accessible, surtout une fois le moteur auxiliaire retiré, comme c'était le cas ici. Le câblage était directement apparent et a donc pu être récupéré en totalité. Cette zone est la seule dans laquelle se trouvaient les câbles de puissance de gros gabarit AWG 0. Ces câbles étant indépendants des autres et ils ont été mesurés séparément. Il en a été de même pour les câbles AWG 4 et une partie des câbles de couleur AWG 8 et des câbles coaxiaux. Parmi les faisceaux restants, une fraction a été analysée et les résultats ont été rapportés à l'ensemble. L'aperçu des relevés pour la cabine est présenté au Tableau 3.2.

Tableau 3.2 Fractions analysées au niveau de l'APU (B)

Faisceaux	Masse totale (g)	Masse échantillonnée (g)	Fraction échantillonnée (%)
G	5 183	5 183	100
H	1 664	2 664	100
I	21 450	8 857	41
J	1 280	1 280	100
K	1 202	1 202	100
Somme zone B	31 779	19 186	60

Cabine (C)

À des fins de manutention, les ailes ont été séparées du fuselage et celui-ci a été découpé transversalement en son milieu, entre les cadres FS499 et FS513 (partie pleine, sans hublot). La cabine (C) était donc accessible et l'ensemble des éléments (sièges, coffres, panneaux, isolant et planché) a pu être retiré facilement. Au niveau de la découpe se trouvait, sous le plancher, la *wing box*, partie extrêmement rigide qui fait la liaison entre les ailes et le fuselage. Elle sert également de réservoir de carburant. Le câblage de la cabine passait donc ici dans l'épaisseur du plancher en faisceaux droits.

Une première prise d'échantillons de 15 à 20 cm sur toute la section de la découpe a permis de confirmer la relative symétrie dans la disposition des câbles d'un bord à l'autre. Le tronçon allant de l'avant de la *wing box* à la cloison pressurisée arrière (*bulkhead*), séparant l'espace cargo de la zone APU, a été estimé en considérant que le faisceau (R) était continu, à partir des échantillons de câbles prélevés et en utilisant la longueur du tronçon. Dans le reste de la cabine, le câblage était principalement disposé sous le plancher au niveau du compartiment avionique. Il a été traité de la même manière que pour le cockpit, c'est-à-dire en prélevant sur une seule moitié, côté tribord. L'aperçu des relevés pour la cabine est présenté au Tableau 3.3 et un exemple de faisceau est illustré à la Figure 3.1.

Tableau 3.3 Fractions analysées au niveau de la cabine (C)

Faisceaux	Masse totale (g)	Masse échantillonnée (g)	Fraction échantillonnée (%)
O	20 178	1 852	9
P	305	305	100
Q	2 306	2 306	100
R ¹	85 418	1 449	2
S ¹	11 620	393	3
T	5 537	5 537	100
U	4 556	4 556	100
V	1 099	1 099	100
Somme tribord ²	82 500		
Somme zone	165 000	17 497	11

¹ Faisceau analysé via les longueurs, pleine section (tribord et bâbord)
² Extrapolation selon les faisceaux tribords et pleine section



Figure 3.1 Exemple d'un faisceau issu de la cabine

Ailes et reste de l'appareil (D)

Enfin, comme mentionnés précédemment, de par leur agencement, les modèles CRJ présentent peu de câbles au niveau des ailes, de même qu'au niveau des stabilisateurs vertical et horizontal. Aucune intervention n'a été faite sur cette zone (D) et les quantités de ces parties, principalement les ailes, ont été estimées d'après la documentation.

Comme indiqué à la Figure 3.2, les distances données au niveau des ailes dans les documents sont transversales à l'appareil. Or, l'angle de flèche α , soit l'angle formé entre une ligne de l'aile (ex : bord d'attaque ou médiane) et le plan transversal à l'appareil, est donné pour cet appareil à $\alpha = 24,76^\circ$. Les longueurs déterminées ont donc été majorées de $1/\cos \alpha$ pour tenir compte de l'angle de l'aile. Le travail a été fait sur une aile, puis multiplié par deux pour obtenir la quantité totale présente au niveau des ailes.

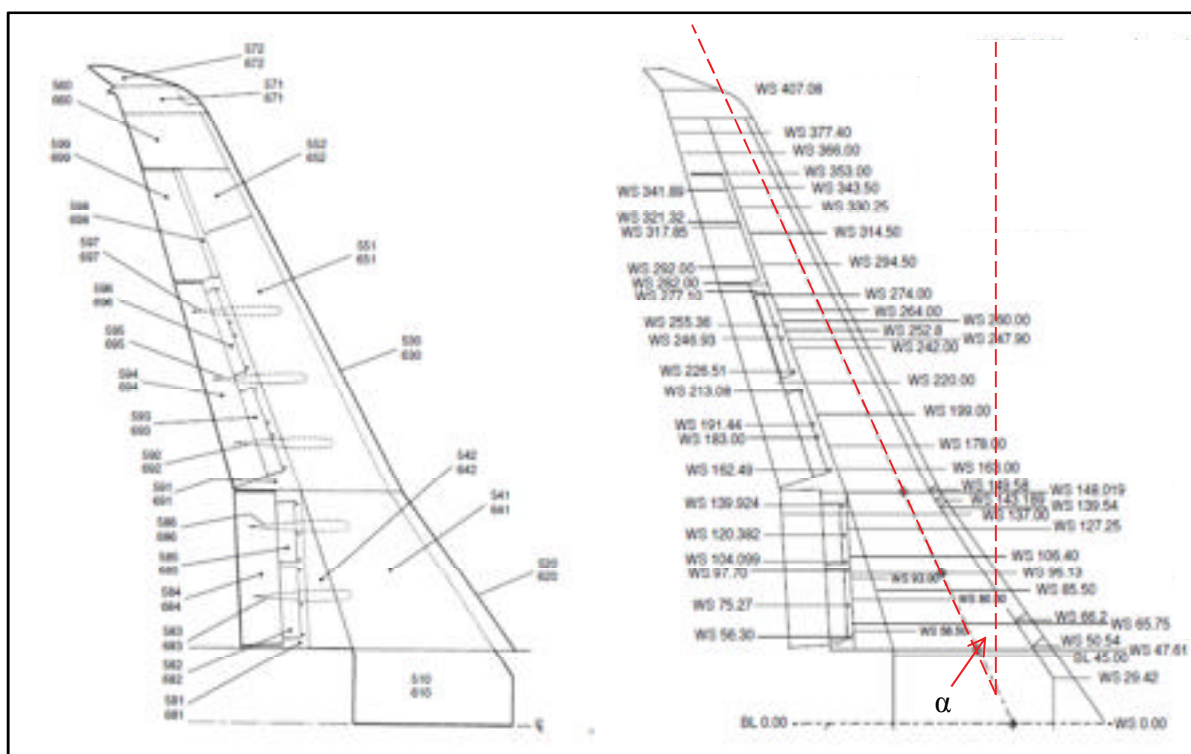


Figure 3.2 Ailes - zones et dimensions

Adaptée de l'*Aircraft Maintenance Manual*, 2009 et de l'*Illustrated Parts Catalog*, 2009

Les résultats tirés par extrapolation des pesées des éléments recueillis au niveau des différentes zones identifiées sont présentés au Tableau 3.4.

Tableau 3.4 Quantités et répartition du câblage

Gabarit		Zones (masses en g)				Total (g)	Ratio (%)
AWG	mm	A Cockpit	B APU	C Cabine	D Reste		
22	0,644	42 217	10 043	83 732	7 055	143 047	48,1
20	0,812	14 637	7 898	22 342	635	45 511	15,3
18	1,024	1 335	70	1 348	0	2 754	0,9
16	1,291	2 759	455	5 014	28	8 257	2,8
14	1,628	2 179	547	1 516	0	4 243	1,4
12	2,053	3 990	1 074	8 870	0	13 934	4,7
10	2,588	4 363	0	418	0	4 781	1,6
8	3,264	11 690	2 544	1 723	0	15 958	5,4
6	4,115	248	0	0	0	248	0,1
4	5,189	8 796	2 664	33 232	0	44 692	15,0
2	6,544	0	0	0	0	0	0,0
0	8,251	0	5 183	0	0	5 183	1,7
Coaxial		635	1 299	6 803	0	8 738	2,9
Total (g)		92 849	31 779	165 000	7 718	297 346	
Ratio (%)		31,2	10,7	55,5	2,6		

Remarque : les câbles constitués de plusieurs conducteurs et les câbles complexes ont ici été intégrés aux câbles simples.

La distribution massique montre une prédominance des petits gabarits AWG 22 (48,1 %) et AWG 20 (15,3 %). C'est le gabarit AWG 4 qui arrive ensuite (15,0 %), puis le reste des gabarits (21,6 %). À ce stade, il apparaît que les moyens pour traiter ces câbles doivent être adaptés aux petits gabarits (AWG 22 et 20), mais doivent également résister au plus gros (AWG 0).

Concernant les câbles de ce gabarit AWG 0, ils sont présents seulement dans la zone APU. Utilisés pour la puissance, ils se présentent seuls et il apparaît donc aisé de les récupérer séparément. De plus, leur forte section (8,251 mm) les rend très rigides et ils pourraient donc être facilement dénudés mécaniquement. Aucun câble de gabarit AWG 2 n'était présent, il est possible qu'ils soient utilisés dans un équipement déjà retiré, leur quantité n'a donc pas été évaluée.

Il ressort que, sur un gisement de câbles évalué à près de 300 kg, la plus grande partie du câblage, plus de 55 % (165 kg), provient de la zone cabine (C), qui était aussi la plus grande zone. Vient ensuite la zone cockpit (A), avec 31 % du câblage (93 kg), puis la zone APU (B), avec un peu moins de 11 % (32 kg) et enfin, comme attendu, la zone reste (D), avec moins de 3 % (8 kg) du câblage, essentiellement au niveau des ailes (Figure 3.3). Cela donne une représentation des zones à privilégier et celles pouvant être négligées, comme les ailes et les stabilisateurs.

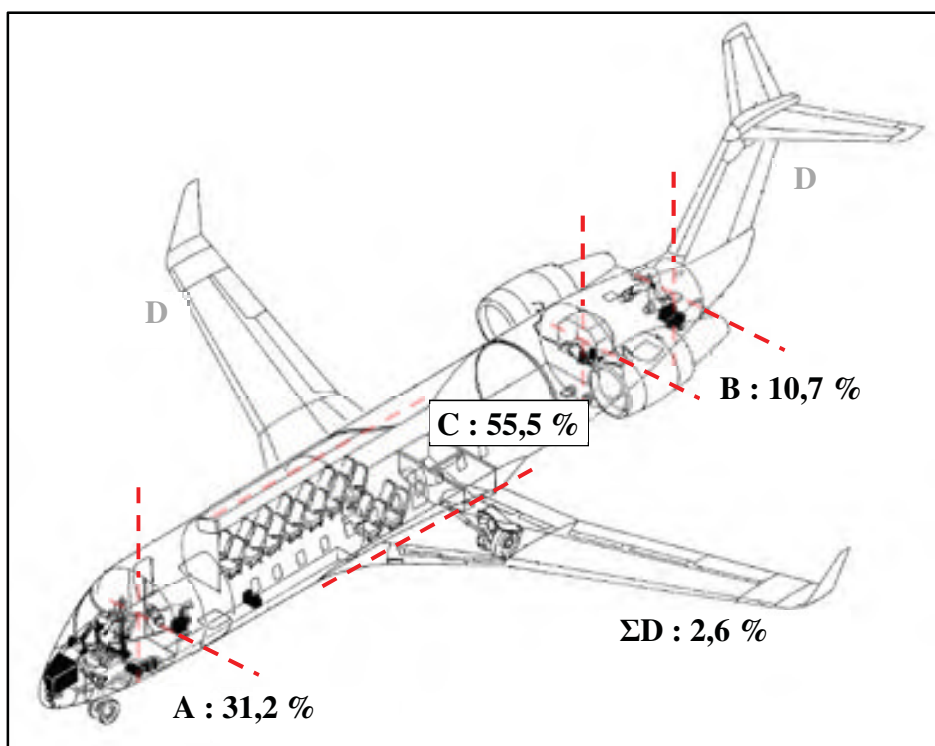


Figure 3.3 Répartition du gisement de câbles mesurés dans les zones
Adaptée de *Illustrated Parts Catalog*, 2009

3.1.2 Composition

Plusieurs types de câbles étaient présents. Les principaux, illustrés à la Figure 3.4, étaient les câbles simples (un seul conducteur) et les câbles multiples (plusieurs conducteurs). Les câbles simples sont composés minimalement d'un conducteur, d'un isolant et d'une gaine extérieure. Les câbles multiples sont composés de plusieurs conducteurs, chacun entouré d'un isolant et le tout contenu dans une gaine extérieure. Selon leur utilisation, ces deux types de câble peuvent être munis d'une tresse de protection/blindage supplémentaire entre l'isolant et la gaine.

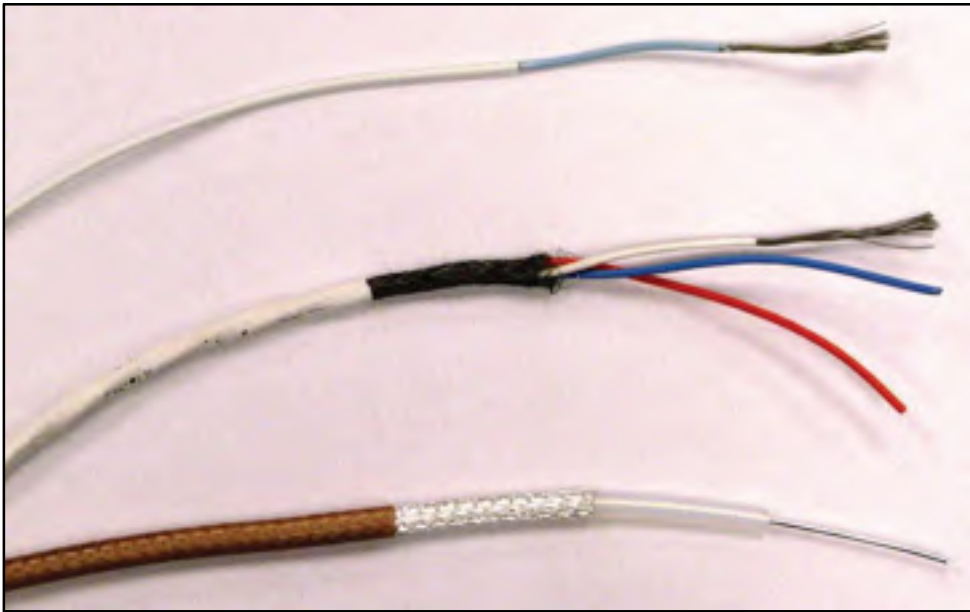


Figure 3.4 Exemples de câbles électriques

Bien que des câbles de gabarit AWG 2 (29 au total) étaient référencés dans la documentation, au niveau du cockpit, il s'est avéré qu'il n'y avait pas ou plus de câbles de ce gabarit dans l'avion étudié. Sa composition a donc été faite à partir d'un câble de même gabarit disponible sur la plate-forme d'essais de démantèlement, mais par la suite, les résultats ne prendront pas en compte ces câbles. Les compositions des câbles sont présentées aux Figure 3.5 et Figure 3.6 et le détail des conducteurs est présenté avec les résultats de broyage en partie 3.2.1 au Tableau 3.6.

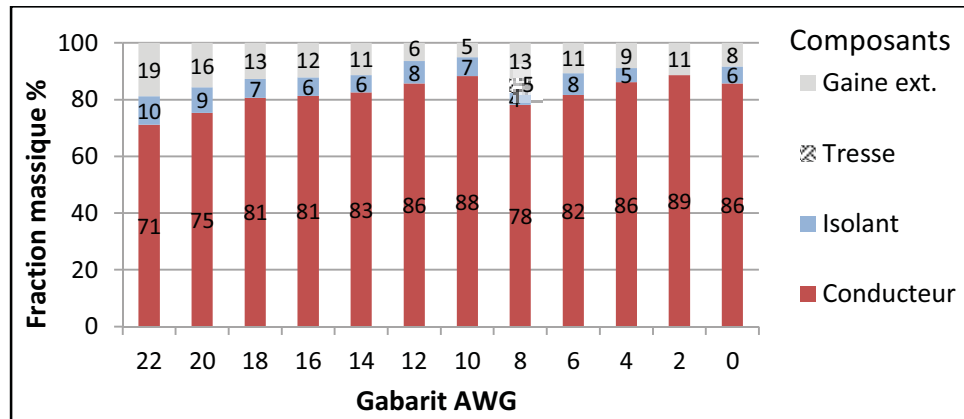


Figure 3.5 Composition des câbles simples

Pour les câbles simples, le conducteur en cuivre, représente une fraction massique minimale de 71 % (Figure 3.5). Ce sont les câbles de petite section, gabarits AWG 22 et 20, qui présentent les plus faibles fractions de conducteur : 71 à 75 %. Au contraire, les plus intéressants pour le cuivre sont les câbles de gabarit AWG 10 et 2, avec respectivement 88 et 89 % de conducteur. Par ailleurs, il apparaît clairement que les câbles composés de plusieurs conducteurs contiennent, en proportion, moins de cuivre que leurs équivalents en câble simple (Figure 3.6). Par exemple, un câble composé de deux conducteurs AWG 22 ne contient que 41 % de cuivre, alors que le simple en contient 71 %. Suite à ces informations, c'est la quantification qui exprime le mieux le gisement présent dans l'appareil.

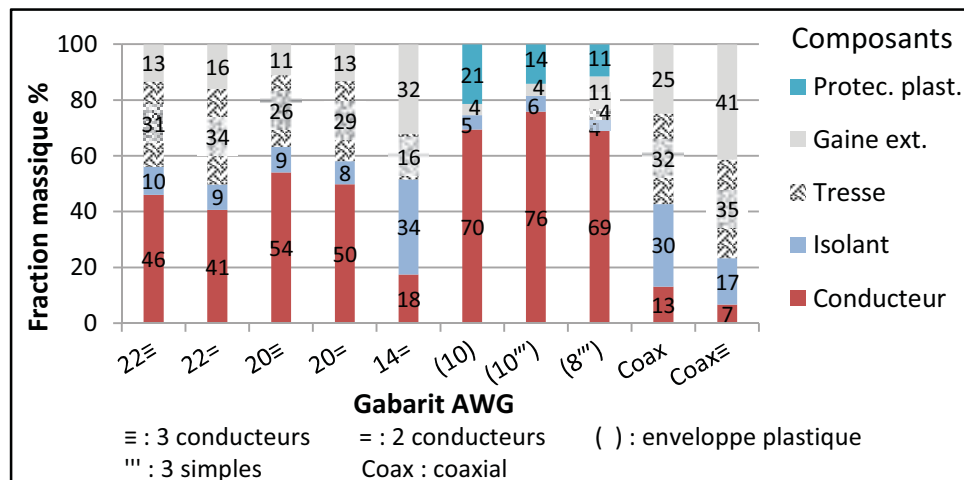


Figure 3.6 Composition des câbles multiples et complexes

En tenant compte des taux de cuivre respectifs de chaque gabarit et des masses déterminées précédemment, la masse globale de cuivre calculée est de l'ordre de 200 kg, soit 2/3 (67,2 %) du gisement de câbles (Tableau 3.5).

Tableau 3.5 Gisement global

Gabarit		Masse de câbles (g)	Taux de cuivre (%)	Masse de cuivre (g)
AWG	mm			
22	0,644	72 772	71,2	51 782
22 = et ≡		70 274	43,4	30 522
20	0,812	37 938	75,3	28 567
20 = et ≡		7 573	52,0	3 937
18	1,024	2 754	80,6	2 220
16	1,291	8 257	81,3	6 716
14	1,628	4 243	82,5	3 502
12	2,053	13 934	85,7	11 935
10	2,588	4 781	88,4	4 224
8	3,264	15 958	78,1	12 463
6	4,115	248	81,7	203
4	5,189	44 692	86,2	38 508
0	8,251	5 183	85,7	4 443
Coaxial		7 553	6,8	511
Coaxial ≡		1 185	13,2	156
Total		297 346		199 690
Moyenne			≈ 67,2	

En confrontation avec la méthode expérimentale, la concordance des résultats a été faite par l'analyse de la documentation et l'identification des câbles.

3.1.3 Identification

D'après le traitement des données techniques de l'*Extended Wire List* (EWL), il apparaît que sur près de 30 700 câbles référencés, l'appareil étudié en comptait 24 180. Ce nombre peut être considéré comme un ordre de grandeur de la valeur moyenne pour ce type d'appareil. Les différences d'un appareil à l'autre viennent de leur configuration et des options dont ils sont équipés.

Il ressort de l'identification que la grande majorité des câbles, soit plus de 94 %, est constituée de petits gabarits, avec un peu plus de 71 % (17 282) en gabarit AWG 22, suivi du gabarit AWG 20 avec près de 23 % (5 546) (Figure 3.7), alors qu'ils ne représentent que 48 et 15 % en masse (Tableau 3.4). Le gabarit AWG 4 qui pèse aussi pour 15 % du gisement est contenu dans un faible nombre de câbles (31). Cela s'explique par les différences de longueurs, mais surtout par les écarts de masse entre les gabarits.

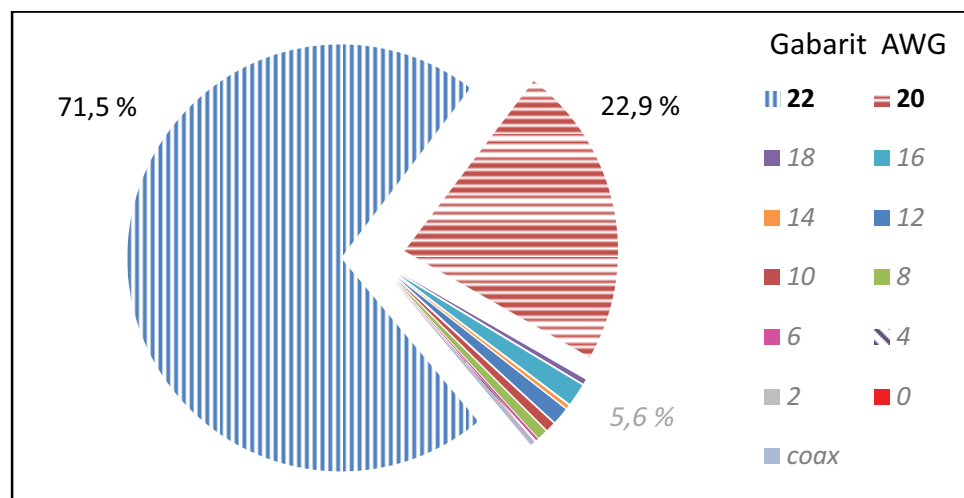


Figure 3.7 Distribution des gabarits

Bien que théoriques, ces résultats confirment l'observation précédente, à savoir que les moyens pour traiter ces câbles doivent être adaptés aux petits gabarits (AWG 22 et 20), mais doivent également résister au plus gros (AWG 0). Suite à ces résultats, il est intéressant de caractériser le gisement et ses différents composants (conducteur, isolant et gaine).

3.2 Caractérisation des composants

Face à la demande énergétique associée au recyclage du cuivre, la caractérisation choisie passe par le comportement au broyage, pour déterminer les possibilités de séparation mécanique des composants, à la mesure du pouvoir calorifique, pour évaluer le potentiel énergétique disponible et aux quantités de sous-produits solides restants après traitement thermique à 550°C, en cas de séparation thermique des composants.

3.2.1 Essais de broyage

Le détail de la composition des conducteurs des câbles est présenté dans cette partie, puisqu'en lien direct avec leur comportement au broyage. Les câbles électriques d'avion doivent être souples pour suivre les éléments de structure sur lesquels ils sont installés. Leurs conducteurs sont donc multibrins, comme indiqué au Tableau 3.6.

Il apparaît que différents diamètres de brins sont utilisés, mais aussi que plusieurs gabarits partagent le même type de brin, simplement en quantité différente. Par exemple, le plus grand gabarit AWG 0 est constitué de brins d'un diamètre d'environ 0,24 mm, comme les gabarits AWG 8 et 18. D'un point de vue conducteur métallique, le broyage d'un câble AWG 0 s'apparente donc au broyage simultané de 54 câbles AWG 18, tout comme un câble AWG 8 serait équivalent à 7 câbles AWG 18. Les diamètres de brins mesurés sont compris entre 0,15 et 0,42 mm.

Les essais de broyage réalisés en laboratoire ont montré que pour les câbles de faibles gabarits (AWG 22 à 16), des amalgames de métal et de matières plastiques restent présents après broyage avec un tamis de 6 mm. Les broyages suivants avec un tamis de 1,5 mm ont montré que ces amalgames se sont désagrégés. Une séparation et un tri des différentes fractions de matériaux sont donc envisageables après seulement deux broyages successifs. La variation de la vitesse de rotation du rotor n'a montré aucune incidence sur l'aspect des résidus de broyage. En effet, la taille des particules et la présence d'amalgames étaient similaires pour les vitesses de 700 et 1 400 tr/min permises par l'équipement.

Tableau 3.6 Résultats de broyage

Gabarit		Nombre de brins	Ø moy. brin (mm)	Ø moy.câble (mm)	Tamis 1 6 mm	Tamis 2 1,5 mm
AWG	mm					
22	0,644	19	0,15	1,22	X	V
20	0,812	19	0,19	1,46	X	V
18	1,024	19	0,24	1,70	X	V
16	1,291	19	0,28	1,92	X	V
14	1,628	19	0,34	2,32	V	-
12	2,053	37	0,31	2,77	V	-
10	2,588	37	0,39	3,30	V	-
8	3,264	133	0,24	5,00	V	-
6	4,115	133	0,34	6,00	V*	-
4	5,189	133	0,42	8,00	V*	-
0	8,251	1 026	0,24	12,45	V*	-
Coaxial		1	-	4,32	V	-
<i>Incertitude</i>			$\pm 0,01$	$\pm 0,02$		
X : non validé (présence d'amalgames)			V : validé (sans amalgame)			
- : non mesuré			* : théorique			

Pour les gabarits supérieurs à AWG 16, le conducteur se désunit de la gaine et de l'isolant au premier broyage avec un tamis de 6 mm. Les bons résultats obtenus avec les gabarits AWG 14 à 8 laissent penser que les gabarits supérieurs auraient le même comportement. De plus, leur diamètre extérieur moyen étant supérieur ou égal au tamis, il est logique de penser que leurs constituants seront séparables dès le premier broyage, d'où la mention théorique indiquée au Tableau 3.6.

Le cuivre trié peut donc être recyclé et les composants plastiques (isolant et gaine) peuvent être valorisés thermiquement. Le potentiel énergétique est déterminé par la mesure du pouvoir calorifique.

3.2.2 Pouvoir calorifique

Les valeurs présentées au Tableau 3.7 concernent le pouvoir calorifique supérieur (PCS), ce sont donc les valeurs moyennes les plus favorables. Ces mesures ont été effectuées sur les broyats obtenus précédemment. Dans ce test, le conducteur métallique n'apporte pas d'énergie et il en est de même pour les tresses de protection/blindage. Ces valeurs ont été validées par des mesures complémentaires sur des câbles coupés manuellement en tranches afin de respecter les fractions des divers composants.

Tableau 3.7 Résultats des tests calorifiques

Câble complet Gabarit		PCS moyen (MJ/kg) ($\pm 5\%$)	Masse de câbles (kg)	Énergie (MJ) ($\pm 5\%$)
AWG	mm			
22	0,644	4,96	72,8	361
22 = et \equiv		3,89	70,3	273
20	0,812	4,47	37,9	169
20 = et \equiv		3,58	7,6	27
18	1,024	3,84	2,8	11
16	1,291	3,75	8,3	31
14	1,628	3,61	4,2	15
12	2,053	3,22	13,9	45
10	2,588	2,91	4,8	14
8	3,264	3,49	16	56
6	4,115	3,70	0,2	1
4	5,189	3,18	44,7	142
0	8,251	3,22	5,2	17
Coaxial		2,72	8,7	24
Total			297,4	1 186
Moyenne		$\approx 3,99$		
Gaine seule		13,56		
Isolant seul		13,16		

Malgré la diversité des matériaux utilisés pour la protection et l'isolation des câbles électriques, les tests ont montré des résultats positifs. Sur la fraction non métallique (gaine et isolant) mélangée récupérée après broyage d'un câble fin (AWG 22), le pouvoir calorifique est d'environ 13 MJ/kg. En effet, les mesures faites séparément sur la gaine et l'isolant montrent des valeurs proches (13,56 et 13,16 MJ/kg), voire même identiques en tenant compte de l'incertitude moyenne de 5 % estimée d'après les triplicatas réalisés.

Bien que les câbles simples présentent une part de conducteur métallique supérieure aux câbles multiples, donc une part de plastique énergétique plus faible, leur pouvoir calorifique est tout de même supérieur. Cela peut s'expliquer par la présence de la tresse métallique de blindage/protection supplémentaire sur les câbles multiples, qui, tout comme le conducteur, n'apporte pas d'énergie. En effet, la fraction massique plastique énergétique est plus importante sur les câbles simples dépourvus de tresse de renfort, 25 à 29 % contre 20 à 25 % pour les câbles avec tresse (Figure 3.5 et Figure 3.6).

L'énergie potentielle globale est de l'ordre de 1 200 MJ, ce qui, pour environ 300 kg de matière, donne un pouvoir calorifique moyen du câblage de 4 MJ/kg, soit la quantité d'énergie provenant de la fraction plastique (env. 13 MJ/kg) diluée avec la fraction métallique. La quantité restante de solide après un traitement thermique est déterminée par les essais à 550°C.

3.2.3 Perte en masse à 550°C

Les essais réalisés sur les composants de câble (gaine et isolant) à 550°C correspondent à une simulation de ce qui se passerait lors d'une valorisation thermique. Ils visent à évaluer la perte en fumée (partie volatile) et le résiduel solide (partie fixe). En cas de traitement thermique de câbles entiers, ils fournissent une bonne indication du potentiel de séparation des composants. Le taux de cendre est considéré comme le taux d'impureté dans la fraction métallique.

Le détail des résultats est présenté en ANNEXE I et leur synthèse est présentée à la Figure 3.8. Globalement, les résultats montrent qu'à cette température, sur la fraction plastique initiale de 23,1 %, il ne reste plus que 1,5 % en masse de résidus solides (cendres). Par conséquent, 98,5 % de la masse de matériaux plastiques seraient éliminés avec les gaz en cas de combustion de câbles électriques non séparés. Les cendres restantes représentent donc moins de 0,4 % d'impuretés dans la fraction métallique restante, ce qui représente un moyen de séparation des matériaux intéressant.

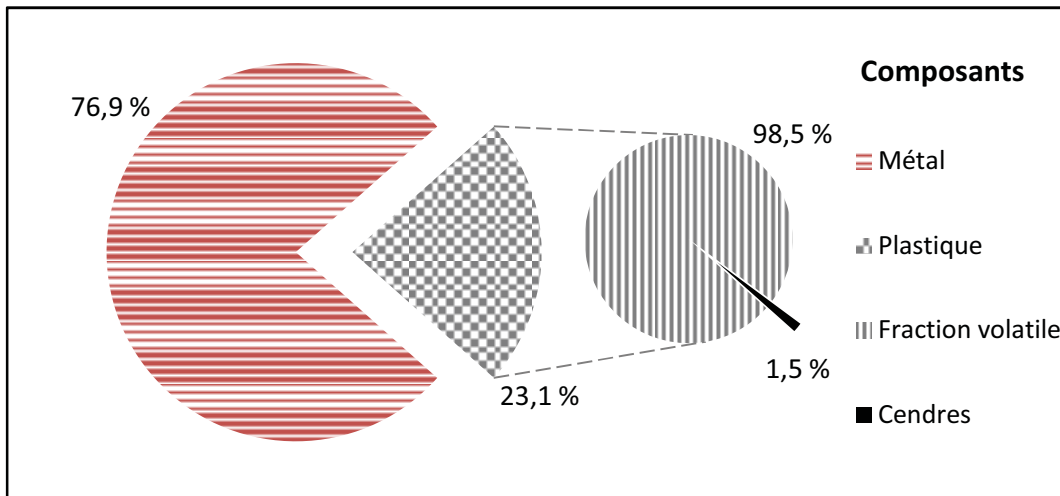


Figure 3.8 Fractions massiques à 550°C

CHAPITRE 4

DISCUSSION ET PERSPECTIVES

Les résultats présentés précédemment ont été déterminés à partir de mesures expérimentales en laboratoire. Leur qualité est discutée dans le présent chapitre, et ce, dans une perspective d'exploitation ultérieure.

4.1 Gisement de câbles

Les gisements de câbles et de leurs composants ont été déterminés au travers de certaines hypothèses (ex. symétrie longitudinale des câbles dans l'appareil) et par des extrapolations de mesures effectuées sur des fractions de câbles analysées. Leur précision quantitative reste donc relative et pourrait par conséquent varier du simple au double. Néanmoins, leur qualité et leur potentiel énergétique sont pertinents.

4.1.1 Qualité des gisements

Les essais non destructifs du câblage par démontage, en vue de conserver l'intégrité des câbles, ont montré qu'il était possible de retirer des faisceaux de câbles de l'appareil. Cependant, il paraît peu probable de les réutiliser en aéronautique. En effet, de par leur taille, disposition et identification spécifiques, ces câbles ne pourraient être réutilisés que sur le même modèle d'appareil et demanderaient un contrôle rigoureux de leur qualité. De plus, la tendance actuelle est à l'amélioration et la mise à jour des technologies pour répondre à la demande croissante des systèmes électriques embarqués. Effectivement, la multiplication de l'électronique et des systèmes de divertissement demande des taux de transfert toujours plus élevés et la quantité de données transférée augmente rapidement. De ce fait, les câbles issus des anciennes générations d'avions sont destinés à être recyclés vers d'autres filières industrielles. Dans ce contexte, les câbles ou faisceaux de câbles peuvent être retirés des appareils avec des méthodes plus rapides sans attention particulière au maintien de leur intégrité.

Les principaux alliages d'aluminium (2024 et 7075) dont est constitué l'appareil contiennent une fraction de cuivre de 2 à 4 %. En estimant raisonnablement que ces alliages représentent 50 à 60 % du poids de l'appareil (12 565 kg), la masse de cuivre qu'ils contiennent est de 150 à 250 kg. Le gisement de cuivre issu du câblage est d'environ 200 kg, soit 1,6 % du poids total de l'appareil. Ces deux gisements sont chacun du même ordre de grandeur que les meilleurs taux moyens de cuivre actuels dans les mines (env. 2 %). Cependant, contrairement au gisement des alliages d'aluminium dont le cuivre reste diffus, le gisement provenant des câbles est considéré comme étant le plus intéressant, puisqu'une fois extrait de l'appareil son taux est très concentré et atteint 67 %, avec 200 kg de cuivre pour 300 kg de câbles.

Par ailleurs, ces données concernent les appareils arrivant actuellement en fin de vie. Ils appartiennent à la génération des années 70-80 et sont majoritairement composés d'aluminium. Il est évident qu'avec le développement des technologies (arrivée du multimédia via l'électronique) et des matériaux (fibre optique et composites), la composition des appareils évolue et donc le gisement de cuivre est susceptible de changer. Parmi les tendances, l'arrivée du divertissement personnel (écrans individuels) à bord des appareils augmente la quantité de câbles. Une autre évolution est l'augmentation de l'emploi de matériaux composites pour la structure de nouveaux appareils afin de diminuer leur masse, ce qui, à câblage équivalent, augmente également la fraction massique du cuivre issu des câbles. D'un autre côté, le développement de la fibre optique et de la communication par ondes, en remplacement des câbles électriques servant à l'information, diminue le nombre de câbles en cuivres dans l'appareil. Il est donc pertinent de garder à jour l'information pour une bonne gestion du recyclage des appareils.

En revanche, une question subsiste. Bien que le gisement que représentent les câbles soit intéressant à l'échelle d'un appareil, le nombre d'appareils en fin de vie est-il suffisant pour justifier une activité de récupération du point de vue du cuivre ? Les différents centres de démantèlement d'avion devront se partager les appareils à traiter ou élargir leur activité à d'autres véhicules et devenir multiservices.

4.1.2 Potentiel énergétique

Le pouvoir calorifique présenté était le pouvoir calorifique supérieur, donc la valeur théorique la plus favorable. En réalité, l'énergie utilisable serait légèrement inférieure, due aux pertes par vaporisation de l'eau formée par l'oxydation des matériaux contenant de l'hydrogène et également au rendement du système de combustion, de l'ordre de 80 %. Les tests de pouvoir calorifique ont montré des résultats positifs. La fraction plastique (gaine et isolant) des câbles possède un pouvoir calorifique d'environ 13 MJ/kg. Donc, nonobstant la présence d'additifs retardateurs de flamme ou autre ignifugation, cette valeur se compare à celle du bois qui se situe entre 10 et 20 MJ/kg, selon son niveau d'humidité.

En cas de traitement thermique de câbles entiers, donc avec la fraction métallique, l'énergie globale apportée par la fraction plastique reste la même, mais elle est diluée avec la masse inerte de métal et diminue à 4 MJ/kg. Cette valeur paraît moins intéressante, mais dans ce cas, elle doit être comparée avec l'énergie et les moyens mécaniques à mettre en œuvre autrement pour séparer et valoriser les matériaux.

D'un point de vue logistique, plusieurs scénarios sont possibles après le démantèlement du câblage. Un premier scénario serait de transporter directement le câblage jusqu'à la fonderie où il serait valorisé thermiquement, pour en récupérer l'énergie. Cette étape permettrait de préchauffer le cuivre avant l'étape de refonte. Dans ce cas, peu de moyens mécaniques seraient mis en œuvre au niveau du site de démantèlement, mais cela nécessiterait davantage de moyens et de surveillance à la fonderie au niveau de la gestion des émissions gazeuses générées.

Un autre scénario consisterait à séparer mécaniquement les matériaux du câblage sur le site de démantèlement, avant d'envoyer le cuivre à la refonte et les plastiques à la valorisation (thermique ou matière). Dans ce cas, plus de moyens seraient nécessaires au niveau du démantèlement, mais par la suite le traitement des matériaux séparés se ferait selon des filières spécifiques sans demander leur modification.

4.2 Optimisation du démantèlement

Plusieurs éléments peuvent permettre d'améliorer le démantèlement d'un appareil, d'un côté la prise en compte de cet aspect au niveau de la conception et de l'autre la transmission de l'information aux acteurs du démantèlement pour faciliter sa mise en œuvre.

4.2.1 Écoconception

Dans le contexte de la mise en valeur des matériaux issus du démantèlement d'un appareil en fin de vie, le cuivre présente un intérêt. Il a été démontré qu'il est techniquement possible de séparer le cuivre de sa gaine et de l'isolant. Cependant, une des étapes déterminantes réside dans la capacité à retirer les câbles électriques de l'appareil en minimisant les opérations à réaliser pour en limiter les coûts.

Pour le retrait des câbles, l'opération pourrait avoir lieu en parallèle à l'étape de récupération des pièces et équipements de valeur. Un opérateur travaillant sur le retrait d'une pièce pourrait, par la même occasion, retirer tout ou une partie du câblage situé dans sa zone d'intervention. Une partie du démantèlement du câblage serait ainsi pris en charge par l'activité de valorisation des pièces, ce qui aiderait à soutenir l'activité de recyclage.

Dans une perspective d'écoconception, il s'agirait de faciliter l'accès aux points d'ancrage et d'attache pour minimiser les temps d'opération pour retirer les câbles. La sécurité reste évidemment un paramètre indiscutable, mais de ce qui a pu être observé au cours des interventions sur l'appareil, le choix du positionnement de certaines attaches n'a pas été planifié pour le démantèlement. En effet, comme illustré à la Figure 4.1, certaines attaches métalliques, de par leur positionnement au niveau d'un montant, se retrouvent dans l'axe d'un cadre de structure, ce qui gêne leur accès. Elles auraient pu simplement être placées de l'autre côté de ce montant pour être plus facilement accessibles. Ce genre d'observation et de retour permet d'améliorer la conception des futurs appareils pour simplifier leur démantèlement.

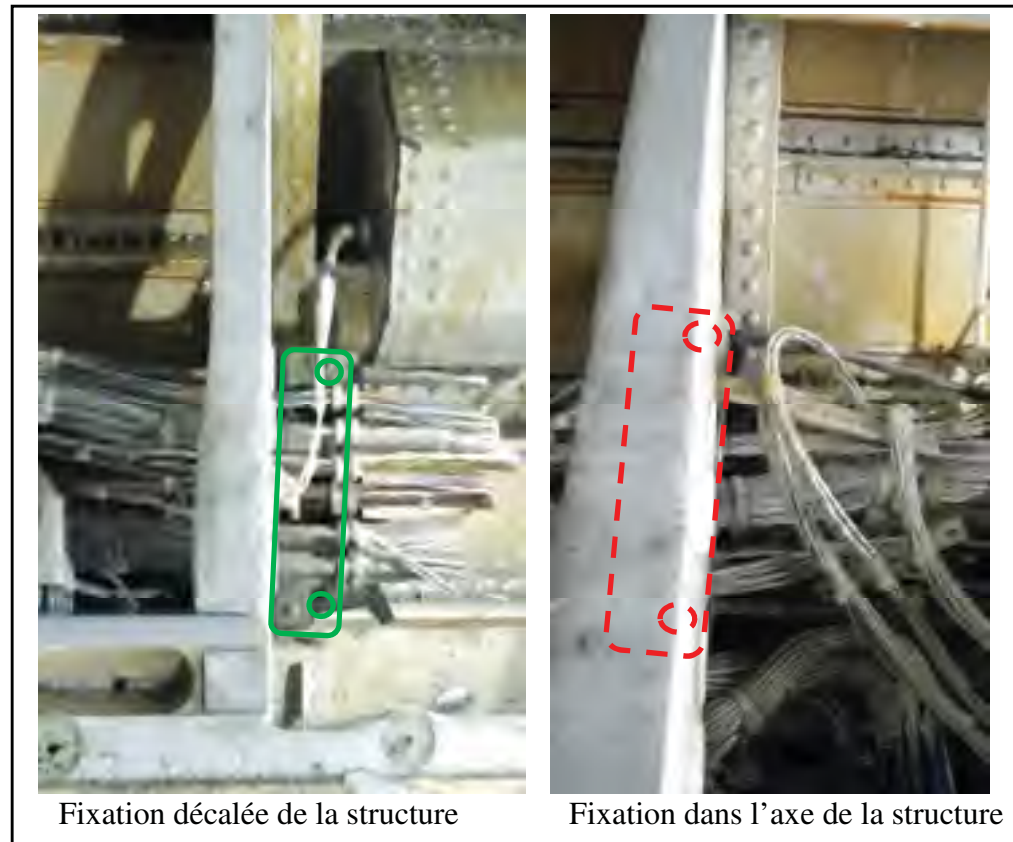


Figure 4.1 Exemples de positionnement de fixations

4.2.2 Gestion de l'information

Un bon travail de gestion de l'information permet la conservation des données, mais également leur exploitation optimale. Comme énoncé dans l'état des connaissances, les documents techniques traditionnels, c'est-à-dire simplement consultables et imprimables, ne permettent pas d'obtenir rapidement l'information complète recherchée en raison de la grande quantité de données présentes. L'emploi d'outils informatique de gestion de l'information permettrait d'améliorer grandement l'utilisation de l'information. Le travail de tri des données, effectué au cours de cette étude, montre effectivement l'utilité d'un tel processus dans l'estimation des gisements.

L'étape suivante pourrait être l'ajout de données complémentaires sur la constitution des éléments. Dans le cas d'un câble électrique, sa longueur totale ou bien de point à point, sa

masse linéaire et même une indication de la composition chimique des constituants (conducteur, isolant, tresse et gaine) pourraient être répertoriées.

Malgré une utilité appréciable pour la gestion de fin de vie des équipements, ce type d'information, dépendamment de sa valeur dans le domaine aéronautique, reste sensible et risqué sur le plan de la protection de l'innovation et du développement technique face à la concurrence. Il peut tout de même sembler logique de penser que l'information concernant des appareils et équipements de plusieurs dizaines d'années perde en valeur et qu'elle puisse donc être transmise aux filières de recyclage avec moins de risque. Cette action pourrait même être bénéfique en termes d'image sur la communication du niveau de recyclabilité des appareils.

4.3 Perspectives

Les résultats de cette étude fournissent des données sur le cuivre issu d'avions en fin de vie qui peuvent aider dans le choix de la gestion de ces appareils. Ces données posent des bases pour le développement de plates-formes de démantèlement et des pistes de recherche ultérieure.

4.3.1 Perspectives opérationnelles

Concernant l'implantation d'une plate-forme de démantèlement, malgré la perspective encourageante d'une augmentation d'appareils à traiter, sa rentabilité dépend en partie d'une masse critique de câbles suffisante pour soutenir son fonctionnement. Si cette masse n'est pas atteinte, il faudrait envisager d'élargir l'activité de la plate-forme à d'autres secteurs également concernés par les câbles électriques. Il pourrait s'agir du secteur automobile ou naval, voire même de celui de la construction. Autrement, ces secteurs pourraient se diversifier et prendre eux-mêmes en charge les appareils aéronautiques dans leurs centres de démantèlement déjà en activités. Cette approche de diversification de l'approvisionnement d'une activité permet d'en augmenter la résilience en offrant des alternatives en cas d'éventuelles perturbations dans un secteur ou un autre.

Un autre élément qui influence l'implantation d'une plate-forme de démantèlement est la détermination de son emplacement. Plusieurs possibilités apparaissent : à proximité d'aéroports capables de recevoir les appareils, ou bien à proximité de centres de traitement et de valorisation des matériaux, ou encore le long du circuit du cuivre (extraction, transformation et utilisation) pour limiter le transport. En effet, la prise en compte du transport, aussi bien celui des appareils avant démantèlement que celui des matériaux issus du démantèlement, influence le choix de l'implantation d'une plate-forme de démantèlement.

4.3.2 Poursuite des recherches

Comme expliqués en méthodologie, les essais ont été réalisés avec du matériel de laboratoire en prenant des précautions particulières, notamment avec un broyeur. Ces premiers résultats demandent à être validés par des essais à grandeur de pilote industriel pour confirmer le comportement des câbles. Il s'agirait, par exemple, de prendre en compte les attaches et la visserie métalliques dans les étapes de broyage.

Comme soulevée précédemment, une attention particulière doit être portée sur les émissions gazeuses générées au cours des traitements thermiques, tant du point de vue des poussières, que des gaz potentiellement nocifs et toxiques. Les mesures de ces rejets sont, en soi, un axe de recherche à part entière.

CONCLUSION

La gestion de fin de vie de constructions complexes, comme les avions, constitue un défi en termes de traitement des matières résiduelles. Le cuivre contenu dans le câblage électrique est un matériau très couramment utilisé dont les gisements naturels s'amenuisent. Ce matériau étant recyclable, il est donc intéressant de le récupérer plutôt que de l'entreposer dans des sites d'enfouissement. Cependant, de par leur constitution (métal et plastique), le traitement de ces câbles n'est pas simple et bien souvent une étape de séparation des matériaux est nécessaire.

Le présent projet a évalué le potentiel de valorisation du cuivre contenu dans le câblage électrique d'un avion de Bombardier modèle CRJ-100ER. Cette évaluation comprend la quantification et la composition du gisement de câbles, ainsi que les possibilités de séparation des matériaux par voie mécanique et par voie thermique, avec la mesure du potentiel énergétique des câbles et de leurs constituants.

L'évaluation du gisement a été effectuée par l'intermédiaire de recoupements de données techniques et de l'analyse d'échantillons représentatifs de câbles prélevés dans l'appareil. Les résultats ont ensuite été extrapolés à l'ensemble de l'appareil. La séparation mécanique, obtenue par des essais de broyage en laboratoire, a été validée lors de la désunion complète du conducteur en cuivre de son isolant et de sa gaine. La séparation thermique, réalisée en laboratoire au travers d'une simulation de traitement à 550°C, a été appréciée par mesure gravimétrique de la fraction de cendre restante. Le potentiel énergétique a été mesuré à partir du pouvoir calorifique supérieur mesuré en laboratoire.

Les résultats obtenus au cours de ce travail présentent un gisement de câbles dans l'appareil de près de 300 kg. Ce gisement est composé à 67 % de cuivre, avec environ 200 kg de cuivre soit 1 à 2 % de la masse totale de l'appareil. Les essais de broyage avec un tamis de 6 mm démontrent qu'il reste quelques amalgames de matériaux imbriqués dans les câbles de petits gabarits (AWG 22 à 16). En revanche, les fractions métallique et plastique sont entièrement

désunies suite au broyage avec un tamis de 1,5 mm. Cette option de broyage confirme la faisabilité d'une séparation mécanique en vue de la récupération du cuivre. La simulation d'un traitement thermique a également montré un bon niveau de séparation avec 98,5 % d'enlèvement de la fraction plastique. La mesure du pouvoir calorifique établit que la valeur énergétique moyenne des câbles entiers est d'environ 4 MJ/kg et que celle de la fraction plastique est d'environ 13 MJ/kg.

L'étape de séparation a été validée de manière mécanique et thermique. Le choix d'une voie ou d'une autre pour la valorisation des câbles est donc possible. En menant ce raisonnement sur l'ensemble des matériaux de l'appareil, cela permettrait de voir les interactions et similitudes possibles et de sélectionner les meilleures techniques applicables. De plus, il serait bon de compléter ce projet par l'évaluation des impacts des traitements secondaires, comme les émissions lors de la valorisation thermique, ainsi que la mise en œuvre et la consommation d'énergie lors d'une étape de broyage. Enfin, d'un point de vue environnemental, le bilan entre le gain et son implication nécessaire, accompagné des économies réalisées (matière, énergie) complètent l'information afin de prendre une décision pour l'implantation d'une plate-forme de démantèlement en pleine connaissance de cause.

ANNEXE I

MESURES DES FRACTIONS FIXES ET VOLATILES À 550°C

Les résultats présentés au Tableau-A-I-1 reprennent les fractions des composants déterminées expérimentalement et incluent les mesures faites lors du passage au four à 550°C.

Tableau-A-I-1 Quantités (g) et ratios des composants

Gabarit AWG	Gisement	Cuivre	Tresse métal	Isolant	Gaine	Cendre	Gaz	Restant
22	72 772	51 782	0	7 283	13 707	305	20 686	52 087
22 = et ≡	70 274	30 522	22 861	6 661	10 231	245	16 646	53 628
20	37 938	28 567	0	3 429	5 943	136	9 235	28 703
20 = et ≡	7 573	3 937	2 061	664	911	23	1 552	6 021
18	2 754	2 220	0	183	351	8	526	2 228
16	8 257	6 716	0	536	1 005	22	1 518	6 739
14	4 243	3 502	0	257	484	11	730	3 513
12	13 934	11 935	0	1 110	888	29	1 970	11 964
10	4 781	4 224	0	315	242	8	549	4 232
8	15 958	12 463	774	694	2 027	39	2 681	13 276
6	248	203	0	19	27	1	45	204
4	44 692	38 508	0	2 223	3 961	90	6 095	38 598
0	5 183	4 443	0	311	428	11	729	4 454
Coax.	8 738	872	2 959	2 019	2 888	71	4 835	3 902
Total	297 346	199 895	28 655	25 703	43 092	998	67 797	229 548
		67,2%	9,6%	8,6%	14,5%	0,3%	22,8%	77,2%
		228 550		68 796				
		76,9%		23,1%		1,5%	98,5%	

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Airbus. 2013. *Global Market Forecast, Future Journeys 2013 - 2032*. Blagnac. p. 63.
- Airbus. 2016. *Global Market Forecast, Mapping Demand 2016 - 2035*. Blagnac. p. 124.
- Aircraft Maintenance Manual (Bombardier). 2009, section 06-20-00, p. 12.
- Asmatulu E., M. Overcash, J. Twomey. 2013. « Recycling of Aircraft: State of the Art in 2011 ». In *Journal of Industrial Engineering*, vol. 2013, p. 8.
- ASTM International. 2014. *Standard Specification for Standard Nominal Diameters and Cross-Sectional Areas of AWG Sizes of Solid Round Wires Used as Electrical Conductors*, dernière version révisée de l'original 1951. ASTM B258-14. West Conshohocken, PA, United States : ASTM International, 5 p.
- Basel Convention. 1989. *Convention de Bâle sur le contrôle des mouvements transfrontières de déchets dangereux et de leur élimination*. Secretariat of Basel Convention. En ligne. 123 p. <http://www.basel.int/Portals/4/Basel%20Convention/docs/text/BaselConventionText-f.pdf>. Consulté le 13 décembre 2016.
- BHP Billiton. 2014. *Sustainability Report 2014. BHP Billiton Chile*. 55 p.
- Blazy, Pierre , Jdid, El-Aid. 2001. « Pyrométallurgie et électroraffinage du cuivre ». In *Techniques de l'ingénieur Métallurgie extractive et recyclage des métaux de transition*, vol. M2241. 20 p.
- Blazy, Pierre , Jdid, El-Aid. 2002. « Recyclage du cuivre et environnement ». In *Techniques de l'ingénieur Métallurgie extractive et recyclage des métaux de transition*, vol. M2243. 5 p.
- Boeing. 2016. *Current Market Outlook 2016-2035*. Seattle, 54 p.
- Bokovay, Goeff. 2006. « Cuivre ». In *L'encyclopédie Canadienne*, p. 3.
- Bombardier. 2010. *Bombardier devient le premier équipementier d'origine à obtenir l'homologation de l'Aircraft Fleet Recycling Association (AFRA)*. En ligne. Montréal : < <http://www.bombardier.com/fr/media/nouvelles/detail.842-bombardier-becomes-first-oem-to-earn-accreditation-from-aircraft-fleet-recycling-association-afra.bombardiercom.html?filter-bu=all&f-year=2010&f-month=1&f-type=all&show-by-page=50&%20page=1> >. Consulté le 13 décembre 2016.
- Bombardier. 2016. *Bombardier business aircraft - market forecast 2016-2025.*, 38 p.

- CalEPA. 2008. *Public health goal for copper in drinking water: Copper*. California Environmental Protection Agency, Office of Environmental Health Hazard Assessment; Pesticide and Environmental Toxicology Branch. Oakland, California, 67 p.
- Calvo, Guiomar, Gavin Mudd, Alicia Valero et Antonio Valero. 2016. « Decreasing ore grades in global metallic mining: a theoretical issue or a global reality? ». In *MDPI*. p. 14.
- CCME. 1991. *Critères provisoires canadiens de qualité environnementale pour les lieux contaminés*. Le Conseil, 21 p.
- CCME. 1999. *Recommandations canadiennes pour la qualité des sols : Environnement et santé humaine - cuivre*. Winnipeg: Le Conseil, 8 p.
- Cinibulk, Walter. 2001. « Aircraft electrical wire: wire manufacturers perspective ». In *FAA Principal Inspectors and Engineers*. Seattle, Nov. 5-8, p. 15.
- CNESST. 2016. Fiche SIMDUT : Cuivre. En ligne. < http://www.csst.qc.ca/prevention/reptox/Pages/fiche-simdut.aspx?no_produit=3558 >. Consulté le 5 février 2017.
- CNESST. 2016. Fiche SIMDUT : Kérosène. En ligne. < http://www.csst.qc.ca/prevention/reptox/Pages/fiche-simdut.aspx?no_produit=37143 >. Consulté le 5 février 2017.
- Conseil Européen. 2008. Directive 2008/98/CE. *Journal officiel*. 28 p.
- Davis, George K., Walter Mertz. 1987. « Copper ». In *Trace Elements in Human and Animal Nutrition*, sous la dir. de Mertz, W., 5th Edition. Vol. 2, p. 301-364. Orlando, Fla: Academic Press.
- Dobrowski, Dennis. 2008. « Dynamic Wiring Diagrams: Maintenance Efficiency on the 787 ». *Aeromagazine*, n° 30, p. 6-11.
- FAA. 2008. « Chapter 5 : Aircraft Materials, Processes, and Hardware ». In *Aviation Maintenance Technician Handbook - General*. FAA-H-8083-30. p. 5.1-5.84. Oklahoma City, OK. U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, Airmen Testing Standards Branch.
- FAA. 2013. « Chapter 9 : Aircraft Electrical System ». In *Aviation Maintenance Technician Handbook - Airframe*. FAA-H-8083-31, Vol. 1. p. 9.1-9.106. Oklahoma City, OK. U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, Airmen Testing Standards Branch.

- Glencore. [s.d.]. *Le cuivre : un élément essentiel de notre quotidien*. En ligne. < <http://www.fonderiehorne.ca/FR/aproposdenous/Pages/elementessentiel.aspx>. > Consulté le 13 décembre 2016.
- Gouvernement du Canada. 2005. À jour au 17 janvier 2017. *Règlement sur l'exportation et l'importation de déchets dangereux et de matières recyclables dangereuses DORS/2005-149*. 121 p.
- Gregor Grass, Rensing Christopher, Solioz Marc. 2011. « Metallic Copper as an Antimicrobial Surface ». *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 77, n° 5, p. 1541-1547.
- Hazlett P.W., G.K. Rutherford, G.W. Van Loon. 1983. « Metal Contaminants in Surface Soils and Vegetation as a Result of Nickel/Copper Smelting at Coniston, Ontario, Canada ». *Reclamation Revegetation resources*, vol. 2, n°2. P. 123-137.
- Houngé, Samuel. 2004. *Étude économique du projet de redevance à l'élimination des matières résiduelles*. Québec : Ministère de l'Environnement, 91 p.
- Hutchinson, T.C. et L.M. Whitby. 1974. « Heavy-metal pollution in the Sudbury mining and smelting region of Canada: I, Soils and vegetation contamination by nickel, copper, and other metals ». *Environmental Conservation*, vol. 1. p. 123-132.
- ICSG. 2016. *The World Copper Factbook 2016*. 64 p.
- Illustrated Parts Catalog (Bombardier). 2009. Introduction, p. 35.
- Illustrated Parts Catalog (Bombardier). 2009. Section 25-00-00-05, p. 2.
- INERIS. 2014. *Données technico-économiques sur les substances chimiques en France : cuivre, composés et alliages*. DRC-14-136881-02236A, 91 p.
- ISRI. 2016. *Scrap specifications circular*. Washington, DC, 58 p.
- Kuo S., P.E. Heilman, A.S. Baker. 1983. « Distribution and Forms of Copper, Zinc, Cadmium, Iron, and Manganese in Soils Near A Copper Smelter ». *Soil Science*, vol. 135. p. 101-109.
- LME. 2017. Historical price graph for Copper. En ligne. < <http://www.lme.com/en-gb/metals/non-ferrous/copper/#> > Figure 1.1 Historique du cours du cuivre. Consulté le 20 février 2017.
- Martchek, K. J. 2000. « The importance of recycling to the environmental profile of metal products ». In *Fourth International Symposium on Recycling of Metals and Engineered Materials* (Pittsburgh, PA, oct. 2000), sous la dir. de D.L. Stewart, R

- Stephens and J.C. Daley p. 10. Pittsburgh, PA: The Minerals, Metals & Materials Society (TMS).
- MDDELCC. 2015. *Guide de bonnes pratiques pour la gestion des véhicules hors d'usage*. Québec, 56 p.
- MDDEP. 2011. *Politique québécoise des matières résiduelles : Plan d'action 2011-2015*, Québec, 34 p.
- METPCB. 1992. *Toxicology of copper and chromium for contaminated sites. no réf. 107-10/grf92-1*. Division pour la protection de l'environnement, Victoria, CB.
- Millet Pierre. 2010. *Diagrammes de phases. Support de cours*. Société Francophone de Biomatériaux Dentaires. 16 p.
- Moreno, Barry. 2004. *The Statue of Liberty*. Arcadia Publishing, 128 p.
- Norgate, T.E., S. Jahanshahi, W.J. Rankin. 2007. Assessing the environmental impact of metal production processes. In *Journal of Cleaner Production* 15. p. 838-848.
- OCDE. 1995. *Recyclage des déchets de cuivre, plomb et zinc*. Paris, 31 p.
- OCDE. 2002. *Décision du conseil concernant la révision de la décision C(92)39/final sur le contrôle des mouvements transfrontières de déchets destinés à des opérations de valorisation. C(2001)107/final*. 44 p.
- OMS. 1973. *Les oligo-éléments en nutrition humaine*. Coll. « rapports techniques », N° 532. Genève : OMS, 71 p.
- Pearson Scott Foresman. 2007. Wire gauge. En ligne < https://commons.wikimedia.org/wiki/File:PSF_G-380007.png>. Consulté le 20 février 2017.
- Picot, André. 2011. « La destinée du cuivre dans l'organisme humain entre bénéfiques et risques ». In *Le cuivre : des bénéfiques aux risques*. p. 12-35. Paris : ATC.
- RECORD. 2014. Valorisation énergétique des résidus de broyage des Véhicules Hors d'Usage, procédés et analyse technico-économique. Situation en France et en Europe. n°12-0235/1A. 123 p.
- Santé Canada. 1992. *Le cuivre*. Coll. « Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada : document technique ». Santé Canada, 7 p.
- UNEP, 2010. *Metal Stocks In Society Scientific Synthesis*. A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel. Thomas E. Graedel. 52 p.

- UNEP. 2013. *Environmental Risks and Challenges of Anthropogenic Metals Flows and Cycles*. A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel. van der Voet, E.; Salminen, R.; Eckelman, M.; Mudd, G.; Norgate, T.; Hirsch, R.. 234 p.
- Vignes, Jean-Louis. 2017. Données industrielles, économiques, géographiques sur les principaux produits chimiques, métaux et matériaux ; Cuivre, alliages de cuivre, Société chimique de France, 10^{ème} édition, 2015-2017.