

**Titre:** Modélisation des tâches pour la récupération de pièces réutilisables  
Title: sur un avion en fin de vie

**Auteur:** Aurore Camelot  
Author:

**Date:** 2012

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

**Référence:** Camelot, A. (2012). Modélisation des tâches pour la récupération de pièces réutilisables sur un avion en fin de vie [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/1012/>  
Citation:

## Document en libre accès dans PolyPublie

Open Access document in PolyPublie

**URL de PolyPublie:** <https://publications.polymtl.ca/1012/>  
PolyPublie URL:

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

**Programme:** Génie mécanique  
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

MODÉLISATION DES TÂCHES POUR LA RÉCUPÉRATION DE PIÈCES  
RÉUTILISABLES SUR UN AVION EN FIN DE VIE

AURORE CAMELOT

DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

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

NOVEMBRE 2012

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

MODÉLISATION DES TÂCHES POUR LA RÉCUPÉRATION DE PIÈCES  
RÉUTILISABLES SUR UN AVION EN FIN DE VIE

présenté par : CAMELOT Aurore

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

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

M. CLOUTIER Guy, Doct., président

M. MASCLE Christian, Doctorat ès Sciences, membre et directeur de recherche

M. BAPTISTE Pierre, Doct., membre et codirecteur de recherche

M. HAUSLER Robert, Ph.D., membre

## DÉDICACE

*À mes grands-parents Marguerite et Jean-Marie et mon ami Jérôme,*

*À mes parents et ma chère Mamy,*

*À mon frère.*

## REMERCIEMENTS

Je tiens en premier lieu à remercier particulièrement mon codirecteur de recherche Pierre Baptiste pour toute l'énergie et la confiance accordées, ainsi que pour les nombreuses heures de travail et de discussions enrichissantes passées en sa compagnie pour ce mémoire.

Je remercie également mon directeur Christian Mascle pour sa disponibilité et son suivi au cours de ce travail de maîtrise, Messieurs Paul-Anthony Ashby et Yves Chamberland du CTA de Saint-Hubert pour leur sympathie, expérience et bons conseils.

Enfin, je souhaite remercier le Consortium de Recherche et d'Innovation en Aérospatiale au Québec (CRIAQ) et les tous partenaires industriels du projet ENV-412 sans qui ce mémoire n'aurait pas existé.

## RÉSUMÉ

La problématique du traitement en fin de vie des aéronefs traite de défis technologiques et environnementaux. Différentes issues de fin de vie sont proposées au(x) propriétaire(s) d'appareil aérien ayant chacune leurs incidences positives ou négatives sur les 3 sphères du développement durable. Le processus de traitement en fin de vie des avions comprend principalement 4 étapes majeures : la sécurisation, le désassemblage de pièces et équipements, le démantèlement de la carcasse restante et enfin la valorisation des matériaux et/ou leur enfouissement. Dans ce travail, l'étape de désassemblage des pièces réutilisables en vue de leur introduction sur le marché de seconde main est abordée. La réutilisabilité d'une pièce extraite d'un aéronef, jugé désuet, est conditionnelle au respect de toutes les procédures de maintenance applicables en désassemblage. Lors de la récupération massive de pièces destinées à une seconde vie, il est nécessaire de fusionner l'ensemble des procédures en une démarche optimisée et rationnelle. Les tâches de maintenance exécutables sur un appareil aérien sont regroupées dans le manuel intitulé « Aircraft Maintenance Manuel » (AMM) propre à chaque appareil. Le but de ce travail de recherche est d'organiser le désassemblage de ces équipements réutilisables à partir d'un modèle, sur lequel viennent s'établir des stratégies de désassemblage structurées et optimisées. La littérature regorge de travaux à propos du désassemblage (basée ou non sur des méthodes d'assemblage) présentant chacune leur propre stratégie de résolution ou d'optimisation. Le problème du désassemblage de pièces réutilisables est sélectif et non destructif. Il ne s'agit pas d'élaborer des séquences d'opérations puisqu'elles sont dictées au sein des tâches du manuel. Il s'agit d'ordonner les tâches de maintenance entre elles en fonction de leur zone d'exécution et de leur préparation (exécution de tâches préliminaires). L'analyse de la littérature existante ne permet pas de trouver une méthode adaptée au problème posé. Ainsi, des aspects des méthodes graphiques, de la propagation par vague, et des réseaux de Petri appliquées au désassemblage sont repris pour définir le modèle. Le modèle proposé est une représentation de l'ensemble du travail à effectuer sur l'appareil (l'ensemble des tâches à réaliser pour le désassemblage des équipements) devant servir de support aux stratégies de résolution visant une collaboration des techniciens en désassemblage. Deux stratégies d'utilisation en désassemblage sont proposées, une première basée sur la théorie des graphes, et une seconde basée sur une heuristique de résolution. L'alimentation du modèle peut se faire automatiquement à partir du manuel « Aircraft Maintenance Manual ».

## ABSTRACT

The problem of processing end-of-life aircrafts concerns some technological and environmental challenges. Different possibilities are offered to the owner(s) of an end-of-life aircraft, each with its positive and negative aspects on the 3 spheres of sustainable development. The end-of-life process includes 4 major steps: decontamination, disassembly of parts, the dismantling of the remaining carcass and finally the recovery of materials and/or landfill. In this work, the disassembly of reusable parts for their introduction on the second-hand market is discussed. Reusability of parts extracted from a plane is conditional upon compliance with all applicable maintenance procedures in disassembly step. When dismantling many parts (reusable parts), it is necessary to merge all procedures in order to obtain an optimized and rational approach. Maintenance tasks run on a plane are grouped in the manual entitled "Aircraft Maintenance Manual" (AMM). The purpose of this research is to organize the disassembly of reusable equipments with a model, on which strategies structured and optimized can be developed (in disassembly). The literature abounds about disassembly works (based or not on assembly methods) each having their own strategy of resolution or optimization. The disassembly problem of reusable parts is selective and non destructive. It is not about developing sequences of operations (given in the maintenance manual by the tasks), but arranging maintenance tasks together. Execution zone and tasks preparation (preliminary tasks) are important criteria. The analysis of the actual literature does not find a suitable method for the problem. Thus, aspects of graphical method, wave propagation approach, and Petri nets approach in disassembly applications are considered to define the model. The proposed model is a representation of the entire work which has to be done on the airplane (set of tasks to be performed for dismantling equipments). Moreover, it has to support different strategies for "solving" a disassembly, and guaranteeing collaboration between technicians. Two strategies are proposed, the first one based on graphs theory, and the second one based on a heuristic resolution. Data acquisition (model inputs) can be done automatically from the book "Aircraft Maintenance Manual".

## TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS .....	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT .....	VI
TABLE DES MATIÈRES .....	VII
LISTE DES TABLEAUX.....	X
LISTE DES FIGURES .....	XI
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS .....	XIII
LISTE DES ANNEXES .....	XIV
NOTE .....	1
INTRODUCTION.....	2
CHAPITRE 1 ÉTAT DE L'ART DE MÉTHODES POUR LE DÉSASSEMBLAGE.....	6
1.1    Approche graphique (« Graph-based approach ») .....	7
1.1.1    Méthode de Bourjault : Graphes de liaisons .....	8
1.1.2    Méthode de De Fazio et Whitney.....	12
1.1.3    Méthode de Jabbour et Mascle : Approche des graphes d'états .....	15
1.1.4    Méthode de Homen de Mello et Sanderson .....	17
1.2    Approche de la « propagation par vague » (« Wave propagation approach »).....	23
1.3    Approche des réseaux de Petri (« Petri-net approach ») .....	27
1.4    Synthèse de la littérature .....	29
1.5    Approche ordonnancement, « clustering » et théorie des graphes .....	31
CHAPITRE 2 LE DÉSASSEMBLAGE DE FIN DE VIE DANS LE DOMAINE AÉRONAUTIQUE .....	36

2.1	Enjeux.....	36
2.2	Acteurs .....	37
2.2.1	L'A.T.A : « Air Transport Association » .....	38
2.2.2	L'A.F.R.A. : « Aircraft Fleet Recycling Association » (Amérique du Nord, majoritairement) .....	39
2.2.3	P.A.M.E.L.A : « Process for Advanced Management of End-of-Life Aircraft » (Europe).....	40
2.2.4	Autres réglementations.....	41
2.3	La fin de vie des avions.....	42
2.3.1	La phase de désassemblage de pièces réutilisables (Source confidentielle) .....	46
2.4	Données disponibles pour le désassemblage de pièces réutilisables.....	47
2.4.1	A.M.M : « Aircraft Maintenance Manual » .....	50
<b>CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE.....</b>		<b>54</b>
3.1	Données utilisables.....	54
3.2	Concepts retenus des modèles développés antérieurement.....	55
3.3	Développement d'un modèle adapté .....	59
3.4	Validation du modèle .....	60
3.5	Élaboration de stratégies d'utilisation du modèle .....	60
3.6	Ouvertures de recherche.....	62
<b>CHAPITRE 4 MODÈLE POUR LE DÉSASSEMBLAGE DE PIÈCES RÉUTILISABLES SUR UN AVION EN FIN DE VIE.....</b>		<b>64</b>
4.1	Schématisation explicative d'une tâche de l'AMM .....	64
4.2	Définition du problème et du modèle par les mathématiques .....	65
4.2.1	Tâche, sous-partie et sous-tâche.....	66
4.2.2	Graphe de tâches développées ( $G_{td}$ ).....	73

4.2.3	Graphe sans cycle de tâches compactes ( $G_{tc}$ ).....	74
4.2.4	Activabilité d'une tâche .....	77
4.2.5	Bilan des définitions du modèle. ....	81
4.3	Utilisation du modèle et outils .....	82
4.3.1	Méthode d'utilisation du modèle employant la théorie des graphes .....	83
4.3.2	Approche heuristique d'utilisation du modèle .....	88
4.4	Obtention des données .....	92
4.4.1	Entrées du modèle .....	92
4.4.2	Considération de l'état de l'appareil pour le désassemblage .....	94
4.5	Validation du modèle. [PARTIE CONFIDENTIELLE] .....	95
4.5.1	Volume des données.....	95
4.5.2	Application de la méthode au retrait d'un élévateur .....	95
4.5.3	Automatisation du modèle .....	95
CHAPITRE 5 DISCUSSION ET DÉVELOPPEMENTS FUTURS.....		96
5.1	Fondements du modèle développé .....	96
5.1.1	Observation d'un désassemblage de pièces réutilisables sur un avion .....	96
5.1.2	Critères retenus pour la définition du modèle et son utilisation.....	98
5.2	Développements futurs.....	99
CONCLUSION .....		101
BIBLIOGRAPHIE .....		103
ANNEXES .....		109

## **LISTE DES TABLEAUX**

Tableau 3-1 : Adaptation et conservation de concepts développés dans la littérature .....	58
Tableau 4-1 : Informations fournies par le graphe $G_{tc}$ .....	77
Tableau 4-2 : Obtention des chaînes de couleurs à partir de tous les chemins de $G_{tc}$ .....	84
Tableau 4-3 : Choix de la première zone d'intervention.....	91
Tableau 4-4 : Équivalence des entrées du modèle dans l'AMM .....	92
Tableau A-1 : Intervention 1, choix de zone.....	110
Tableau A-2 : Intervention 2, choix de zone.....	111
Tableau A-3 : Intervention 3, choix de zone.....	112
Tableau A-4 : Intervention 4, choix de zone.....	113
Tableau A-5 : Intervention 5, choix de zone.....	114
Tableau A-6 : Intervention 6, choix de zone.....	115
Tableau A-7 : Intervention 7, choix de zone.....	116
Tableau A-8 : Intervention 8, choix de zone.....	117

## LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 : Organigramme et questionnement de Bourjault (adapté de Bourjault, 1984).....	10
Figure 2-1 : Stratégies de réutilisation d'un avion commercial.....	42
Figure 2-2 : Possibilités offertes par le traitement en fin de vie des avions.....	45
Figure 2-3 : Exemple de désignation d'un triplet (Norme ATA 2200). .....	48
Figure 2-4 : Chronologie des sous-parties.....	51
Figure 2-5 : Standard ATA 2200 et le code AMTOSS .....	52
Figure 3-1 : Principales étapes de la méthode proposée .....	59
Figure 4-1 : Contenu et agencement des sous-parties d'une tâche .....	65
Figure 4-2 : Schématisation développée d'une tâche et de ses sous-parties .....	67
Figure 4-3 : Schématisation développée d'une tâche et de ses sous-parties bornées.....	69
Figure 4-4 : Schématisation développée d'une tâche avec appels de tâches connexes.....	72
Figure 4-5 : Exemple de graphe de tâches développées $G_{td}$ .....	74
Figure 4-6 : Exemple d'arbre orienté de tâches compactes $G_{tc}$ .....	76
Figure 4-7 : Exemple d'arbre orienté de tâches compactes $G_{tc}$ .....	78
Figure 4-8 : Exemple d'urgence sur le court terme .....	80
Figure 4-9 : Exemple de graphe $G_{tc}$ .....	83
Figure 4-10 : Graphe de dominance .....	85
Figure 4-11 : Graphe de couleurs .....	86
Figure 4-12 : Graphes d'ordre présentant les solutions .....	87
Figure 4-13 : Comptabilisation du nombre de tâches par zone sur $G_{tc}$ .....	91
Figure A-1 : Graphe $G_{tc}$ initial .....	110
Figure A-2 : $G_{tc}$ / Intervention 1 en Zone 3.....	111
Figure A-3 : $G_{tc}$ / Intervention 2 en Zone 2.....	112

Figure A-4 : G <sub>tc</sub> / Intervention 3 en Zone 4.....	113
Figure A-5 : G <sub>tc</sub> / Intervention 4 en Zone 3.....	114
Figure A-6 : G <sub>tc</sub> / Intervention 5 en Zone 5.....	115
Figure A-7 : G <sub>tc</sub> / Intervention 6 en Zone 1 .....	116
Figure A-8 : G <sub>tc</sub> / Intervention 7 en Zone 2.....	117
Figure A-9 : G <sub>tc</sub> / Intervention 8 en Zone 1 .....	118

## **LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS**

A4A	Airlines for America
AFRA	Aircraft Fleet Recycling Association
AIPC	Aircraft Illustrated Parts Catalogue
AMM	Aircraft Maintenance Manual
ATA	Air Transport Association
AMTOSS	Aircraft Maintenance Task Oriented Support System
AWM	Aircraft Wiring Manual
CMM	Component Maintenance Manual
CO	Close Out
EASA	European Aviation Safety Agency
ISO	International Organization for Standardization
ITEM	Illustrated Tool and Equipment Manual
JSU	Job Set-Up
JSUI	Job Set-Up Information
P	Procedure
PAMELA	Process for Advanced Management of End-of-Life Aircraft
SCAP	Système de Caractéristiques d’Assemblage de Produits
SRM	Structural Repair Manual

## **LISTE DES ANNEXES**

ANNEXE 1 – ORGANIGRAMME DES SCÉNARIOS DE FIN DE VIE POUR UN AÉRONEF .....	109
ANNEXE 2 – EXEMPLE D’UTILISATION DU MODÈLE EMPLOYANT UNE HEURISTIQUE DE RÉSOLUTION .....	110

## **NOTE**

Certains documents confidentiels ont été consultés avec le consentement des détenteurs sous la condition que ces derniers ne soient aucunement cités à travers ce mémoire. Lorsque des éléments de documentation confidentiels sont évoqués, la référence « (Source confidentielle) » est stipulée.

## INTRODUCTION

Que faire des centaines d'avions arrivant en fin de vie ? Les stocker dans les déserts comme c'est souvent le cas ? Les broyer pour une potentielle récupération des matériaux ? Les solutions sont nombreuses, mais les constructeurs sont également conscients que toute solution actuelle passe par une analyse globale tenant compte des différents critères du développement durable. Il en va du respect de leurs valeurs, mais aussi des attentes de leurs clients, et bientôt de nouvelles législations.

Le projet CRIAQ (Consortium de Recherche et d'Innovation en Aérospatiale au Québec) ENV-412 permet une collaboration entre industriels et universitaires chercheurs sur des questions techniques à propos du devenir des aéronefs en fin de vie qui soient conjointes aux objectifs du développement durable.

En fin de vie utile, l'aéronef reste à la charge de son propriétaire. Le choix du traitement en fin de vie, à défaut d'un choix d'abandon ou d'entreposage à durée plus ou moins déterminée, donne lieu à différents scénarios de reconversion et/ou de traitement de l'appareil. L'appareil peut subir une reconversion d'activité ou être désassemblé, démantelé et subir un traitement de ses matériaux en vue d'un recyclage. Ce rapport traite de la question du devenir de l'appareil après une mise au sol et plus particulièrement, de l'étape de désassemblage des pièces réutilisables précédant le démantèlement de l'appareil. Le marché de revente de pièces et équipements aéronautiques de seconde main est une des premières alternatives possibles lorsqu'un propriétaire d'avion décide de ne plus assurer l'activité de vol de l'appareil.

Le désassemblage d'équipements aéronautiques est soumis à des pratiques et usages réglementés permettant la revente de pièces (à haute valeur marchande) et leur ré-installation sur un ou plusieurs autres appareil(s). Outre cette possibilité de seconde vie des équipements l'alternative de reconversion fonctionnelle est également possible. Cette reconversion abandonne la fonction première des équipements et s'oriente sur d'autres marchés, comme par exemple le « remanufacturing ». Une aile d'avion peut donc être désassemblée, traitée et transformée pour une tout autre fonctionnalité et par exemple se transformer en une table de conférence.

Le désassemblage d'équipements constitue une étape du traitement en fin de vie des aéronefs et le cadre de ce travail de recherche. Il s'agit d'un désassemblage sélectif et non destructif de pièces à haute valeur marchande, pour lesquelles les méthodes de retrait (séquences d'opérations) sont établies par les constructeurs et rassemblées dans les manuels de maintenance de l'avion.

L'objectif de ce travail est d'envisager le désassemblage d'un aéronef dans une optique de réutilisation de ses équipements. Il s'agit de s'attarder sur les méthodes de désassemblage qui pourraient profiter à l'initiateur du désassemblage en s'attardant sur son organisation. La littérature regorge de travaux à propos de méthodes d'assemblage et de désassemblage au champ d'action (cadre) plus ou moins restreint. Ce mémoire reprend des approches de désassemblage (basées ou non sur des méthodes d'assemblage) avec leur propre méthode de résolution ou d'optimisation. De plus, un regard sur l'approche d'ordonnancement, de « clustering » et de théorie des graphes est fourni. L'analyse des approches montre qu'une méthode appliquée particulièrement au domaine aéronautique et qui s'établit à partir de données réelles (à disposition) pour l'extraction d'une liste d'équipements sur un avion n'est pas rencontrée. Les éléments disponibles sont les manuels de maintenance. D'ailleurs, la réutilisabilité d'une pièce démontée est conditionnelle au respect de toutes les procédures de maintenance. Mais lors de la récupération massive des pièces valorisables, il est nécessaire de fusionner l'ensemble des procédures en une démarche optimisée et rationnelle ; c'est le but de ce travail de recherche. Les objectifs du désassemblage de pièces sur un aéronef comprennent certes l'extraction des équipements demandés, mais sont par ailleurs définis au cas par cas, suivant l'état de l'avion, de l'état de l'offre et de la demande du marché de seconde main, du savoir et des pratiques de l'équipe de techniciens œuvrant sur l'appareil. Il ne peut être établi de règle générale en matière de désassemblage aéronautique hormis le fait que celui-ci doit être respectueux des procédures de maintenance, efficace en terme de durée et sécuritaire pour le personnel.

Une synthèse de la littérature est effectuée afin de repérer des aspects méthodologiques existants et applicables au désassemblage aéronautique (aspects adaptables). De plus, cette synthèse permet de définir le cadre et la méthodologie pour le développement d'un nouvel outil : un modèle satisfaisant la problématique du désassemblage sélectif d'un aéronef qui soit une aide à la décision relative à l'organisation du travail des techniciens.

Les fondements du modèle développé dans ce mémoire sont établis à partir d'une analyse des données existantes et disponibles. Ce travail de recherche des données disponibles et des standards utilisés en aéronautique a permis de définir les lignes directrices d'un modèle permettant l'entrée des tâches de maintenance (en vue du retrait d'une liste aléatoire d'équipements), leur analyse et leur association. La standardisation de l'entrée des tâches de maintenance permet la création d'un outil de modélisation du désassemblage capable de renseigner le travail encouru et d'aider à la coopération des opérateurs dans cette activité. Le modèle est une aide au travail de collaboration entre les techniciens en désassemblage. Il permet d'obtenir une vue d'ensemble du travail, des zones de l'appareil à visiter et de la quantité de travail s'y trouvant. La quantité de travail à réaliser se traduit par la présence de tâches de maintenance possédant un caractère de réalisation valide ou non.

Le modèle se base sur le manuel de maintenance propre à chaque appareil, intitulé en anglais l' « Aircraft Maintenance Manual » (AMM). Il est présenté dans ce mémoire avec les définitions associées. Des exemples d'application fictifs accompagnent ce travail et une annexe permet de vérifier la validité des notions avancées à partir de données réelles et confidentielles.

En définitive, le mémoire se construit sur 5 chapitres révélant de façon chronologique les étapes du travail. Une revue non exhaustive de la littérature en désassemblage est réalisée, traitant de méthodes anciennes ayant établi les principaux fondements de l'organisation de l'assemblage d'un produit (méthodes applicables en désassemblage). De plus, celle-ci est complétée par une brève revue de méthodes employées dans des problèmes d'ordonnancement. La revue de la littérature réalisée montre que les méthodes existantes ne satisfont pas les besoins du problème, lié au désassemblage de pièces réutilisables sur un aéronef en fin de vie. Le désassemblage des pièces doit être établi en fonction des tâches de maintenance tirées du manuel propre à chaque appareil et organisé en fonction de celles-ci. De plus, les séquences d'opérations ne sont pas à déterminer, elles sont dictées par les tâches de maintenance qu'il est, par contre, nécessaire d'ordonner entre elles. Néanmoins, des aspects des méthodes existantes peuvent être retenus. La synthèse de ces aspects applicables permet d'orienter le développement du modèle pour le désassemblage de pièces réutilisables sur un avion en fin de vie.

Le chapitre 2 expose les acteurs à l'échelle « mondiale » du traitement en fin de vie des aéronefs ainsi que la tendance à l'égard d'une gestion intégrée de la fin de vie des produits usagés et législations. À la suite, l'étape de fin de vie d'un appareil aérien est précisée et plus particulièrement la phase de désassemblage. Les données disponibles regroupées dans le manuel de maintenance sont présentées et expliquées également en fin de chapitre.

L'analyse de la littérature en désassemblage et le cadre de fin de vie en aéronautique étudiés en amont permettent de dresser la méthodologie suivie dans le chapitre 3. Les données utilisables et concepts retenus sont rappelés et analysés pour le développement d'un modèle adapté. Ensuite, il s'agit de valider ce modèle pour être en mesure d'élaborer des stratégies d'utilisation et projeter des ouvertures de recherche futures.

Le chapitre 4 se scinde en trois parties. La première illustre le standard de présentation des tâches de l'AMM et définit ensuite mathématiquement les données du problème de désassemblage d'équipements réutilisables pour l'élaboration du modèle. Lorsque le modèle est défini, deux utilisations de ce dernier pour la résolution d'un exemple fictif sont présentées. Une première basée sur la méthode de la théorie des graphes et une seconde employant une heuristique de résolution. Enfin, une troisième partie porte sur l'obtention des données en entrée du modèle et les hypothèses de départ propres à chaque appareil.

Le chapitre 5 conclue le mémoire en discutant du modèle développé et notamment des orientations prises dans sa définition. De plus, ce dernier chapitre introduit les développements futurs à entreprendre à la suite du travail réalisé.

## CHAPITRE 1 ÉTAT DE L'ART DE MÉTHODES POUR LE DÉSASSEMBLAGE

Les travaux sur les méthodes de désassemblage rassemblent de nombreuses approches aptes à satisfaire les objectifs propres aux divers types de produits auxquels le désassemblage peut s'appliquer. L'accent mis sur la fin de vie des produits, du fait de l'émergence d'une prise de conscience des fabricants à l'égard de l'environnement, suscite de nouvelles applications pour les méthodes de désassemblage. Il s'agit par exemple de penser le design et l'optimisation de gammes de désassemblage, ou encore la conception de produits à des fins de désassemblage (« *Design for Disassembly* »). Lambert (2003) recense plus de 300 publications de revues et congrès à propos de la génération de séquences de désassemblage. Il y établi les séquences de désassemblage comme des listes d'actions subséquentes (« *Disassembly sequences are listings of subsequent disassembly actions* »). Les actions de désassemblage rassemblent les différentes opérations mécaniques de séparation, de déconnection et toute autre activité visant à la formation de sous-assemblages ou pièces issus d'un produit « parent ». Les méthodes pensées pour le désassemblage tirent généralement leurs fondements de méthodes antérieures développées pour l'assemblage. Néanmoins, le désassemblage diffère de celui-ci. D'après Lambert (2003) sept différences majeures peuvent être avancées à ce propos. Le désassemblage d'un produit n'est pas nécessairement complet, d'où l'introduction de la notion de profondeur de désassemblage (ex : désassemblage sélectif) (1). L'assemblage rassemble des opérations incluant des opérations irréversibles (l'annulation d'une telle opération prend un caractère destructif), comme par exemple un soudage (2). La valeur ajoutée par le processus de désassemblage est généralement plus faible que celle ajoutée par celui de l'assemblage (3). Des incertitudes existent quant à la qualité des composants, mais aussi quant à la quantité de pièces pouvant être extraite suite au désassemblage, tant d'un point de vue qualitatif (4) que quantitatif (5). Le nombre de produits issus du processus de désassemblage est lui très varié (6). Par ses caractéristiques le désassemblage est finalement réalisé par une main d'œuvre humaine plutôt que par des lignes d'assemblage automatisées et/ou robots (7). Le désassemblage peut prendre la qualité d'être destructif ou non destructif à l'égard des composants et liaisons. D'autre part, assemblage et désassemblage se situent aux extrêmes du cycle de vie d'un produit et encadrent sa période

d'utilisation. La mise en évidence des différences entre assemblage et désassemblage, appuie la recherche de nouvelles méthodes du fait de la variété des intérêts tirés des activités de désassemblage. Dans cette revue de littérature, certains fondements de la théorie de désassemblage sont dépeints avec l'approche des graphes de représentations (à l'origine établie pour les gammes d'assemblage d'un produit) avec une approche orientée composant et finalement une approche orientée produit. Le critère de choix ayant été retenu pour la citation ou non de méthodes repose sur la validité de l'emploi de celles-ci dans le cas du désassemblage de pièces sur un avion en fin de vie. Une fois ces méthodes revues et présentées, une dernière partie rassemble les objectifs et données nécessaires à chaque méthode. De plus une orientation ordonnancement, « clustering » et théorie des graphes est entrevue en fin de chapitre. Finalement, il sera possible d'établir notre problématique à l'égard du désassemblage de pièces réutilisables sur un aéronef en fin de vie et d'en dresser une méthodologie de réponse qui soit adaptée au problème.

## 1.1 Approche graphique (« Graph-based approach »)

Cette approche utilise comme son nom l'indique des représentations graphiques. Elle rassemble différents types de graphes utiles à des problèmes d'assemblage et/ou de désassemblage avec des hypothèses spécifiques. Quatre méthodes graphiques de représentation de séquences d'assemblage ou de désassemblage peuvent être considérées (Tang et al., 2000) : le graphe de liaisons (« connection graph »), le graphe direct représentant des états stables du produit en désassemblage (« direct graph »), le graphe ET/OU (« AND/OR graph ») et les réseaux de Petri appliqués au désassemblage (« disassembly Petri nets »). De plus, l'approche des graphes des états d'un produit au cours d'un processus d'assemblage ou de désassemblage est également présentée. Dans le cas présent, il s'agit de recenser de façon non exhaustive les méthodes de représentations graphiques ayant trait au processus de désassemblage et susceptibles d'approcher le problème traité. L'analyse des objectifs et des données nécessaires en entrée des méthodes est pour cela recommandée.

Les méthodes retenues et présentées dans les paragraphes suivants sont successivement, la méthode de Bourjault suivie de celle De Fazio & Whitney (graphe de liaisons), de Jabbour *et al.* et celle de Homen de Mello & Sanderson (Graphe ET/OU).

### 1.1.1 Méthode de Bourjault : Graphes de liaisons

L'établissement de séquence de désassemblage prend ses bases avec certaines méthodes établies originellement pour la planification de gammes d'assemblage. Les tâches de désassemblage sont par la suite perçues comme l'inverse de celles réalisables du processus d'assemblage, '*the sequence of assembly is the reverse of that of disassembly*' (Takeyama et al. 1983).

Alain Bourjault (1984) a été le premier à développer une approche globale et systématique pour l'élaboration de gammes d'assemblage en se basant sur des caractéristiques géométriques. De Fazio & Whitney (1987) qui reprendront les travaux de Bourjault, le qualifient à l'époque comme étant le seul à décrire cette génération de gammes à partir d'un algorithme.

Le point de départ de la méthode de Bourjault consiste à utiliser les données géométriques des composants d'un produit, ainsi que celles fournies par les dessins techniques de l'assemblage. Ces données permettent l'élaboration d'un graphe connexe représentatif de celui-ci. Dans cette représentation graphique connexe qualifiée de « graphe des liaisons mécaniques» (Bourjault, 1984) ; les nœuds et arêtes représentent respectivement les pièces du produit et les liaisons entre celles-ci (contacts et connexions). Le produit est donc représenté par ce réseau, où la désignation d'une pièce est associée à son nœud et les liaisons décrites par des nombres. Chaque tâche d'assemblage (entre deux ou plusieurs pièces) est associée à un nombre. C'est avec cette numérotation qu'une gamme complète d'assemblage peut se traduire par une liste ordonnée de nombres d'après le graphe des liaisons mécaniques de Bourjault. La gamme symbolisée par cette liste implique l'établissement de toutes les liaisons nécessaires pour la réalisation du produit assemblé. Le point important de la méthode réside dans les règles dictant la validité (et donc la faisabilité) de la création d'une liaison à chaque étape d'assemblage ; ceci dans le but d'obtenir une liste de nombres correcte d'un point de vue mécanique. Les règles sont créées à la suite de questions posées à l'utilisateur à propos du graphe de liaisons (un ingénieur de production ou un technicien en assemblage). Essentiellement, les questions ont pour but de savoir si un sous graphe donné est stable (donc un sous-assemblage potentiel) et si une liaison peut être une opération d'assemblage (accessibilité, faisabilité géométrique). À chaque question, l'utilisateur ne peut répondre que par un « Oui » ou un « Non ». Chaque réponse dicte quelle action subséquente doit être réalisée tout en dressant une liste de contraintes pour les opérations d'assemblage à réaliser

(les liaisons). Deux tournures de questions sont proposées à l'utilisateur (où  $L_i$  représente la liaison n°i du graphe) :

Question 1 – Est-il vrai que la liaison  $L_i$  ne peut pas être réalisée après que les liaisons  $L_j$  et  $L_k$  soient établies ?

Question 2 - Est-il vrai que la liaison  $L_i$  ne peut pas être réalisée si les liaisons  $L_j$  et  $L_k$  ne sont toujours pas établies ?

Le groupe de liaisons ( $L_j$  et  $L_k$ ) est appelé « corps de la question » et peut comprendre une simple liaison ou un groupe de liaisons.

Les deux tournures de questions présentées ci-dessus apparaissent dans les deux étapes constitutives de cette « enquête » des liaisons réalisables. Grâce à celles-ci les contraintes d'assemblage peuvent être établies, exprimant la nécessité de précédence ou non dans l'établissement des liaisons internes au produit. L'étape 1 implique une paire de liaisons (le corps de la question contient une unique liaison) pour chacune des questions 1 et 2. Si l'on considère un total de  $l$  liaisons dans le produit assemblé, un total de  $l^2$ <sup>1</sup> questions est posé lors de l'étape 1. L'étape 2 se divise elle en plusieurs modules (Étape 2/module 1; Étape 2/module 2; etc.). Un « Non » en guise de réponse à l'une des deux questions de l'étape 1 entraîne l'absence du corps de la question de l'étape 1 (une liaison) dans le corps de la question de l'étape 2/module 1. Dans ce cas, le corps de la question de l'étape 2/module 1 possèdera ( $l-1$ ) liaisons. Une réponse négative à l'une des questions de l'étape 2/module  $x$  ( $\forall x \in N, 1 \leq x \leq (l-2)$ ) entraîne l'enregistrement d'une contrainte de précédence dans l'établissement des liaisons de l'assemblage. A l'inverse, une réponse positive entraîne le passage à un module supérieur dont le corps de la question est réduit. Tant que les réponses aux questions sont positives, le passage de module en module se répète jusqu'à ce que le numéro du module atteigne un maximum  $k = (l-2)$ .

De cette façon, le programme de Bourjault génère un programme informatique de questions/réponses auxquelles répond un expert. Ainsi, le programme peut au fur et à mesure générer des relations de précédence pour la réalisation de liaisons dans un assemblage. En plus d'établir des précédences, le programme génère également des combinaisons logiques de connexions. L'ensemble des informations collectées permet d'obtenir un programme complet de génération de gammes d'assemblage dans le sens ou toutes les séquences d'établissement de

liaisons sont valides et faisables (séquences traduites par une liste ordonnées d'actions). La Figure 1-1 permet de visualiser l'organigramme de Bourjault présenté dans les paragraphes précédents.

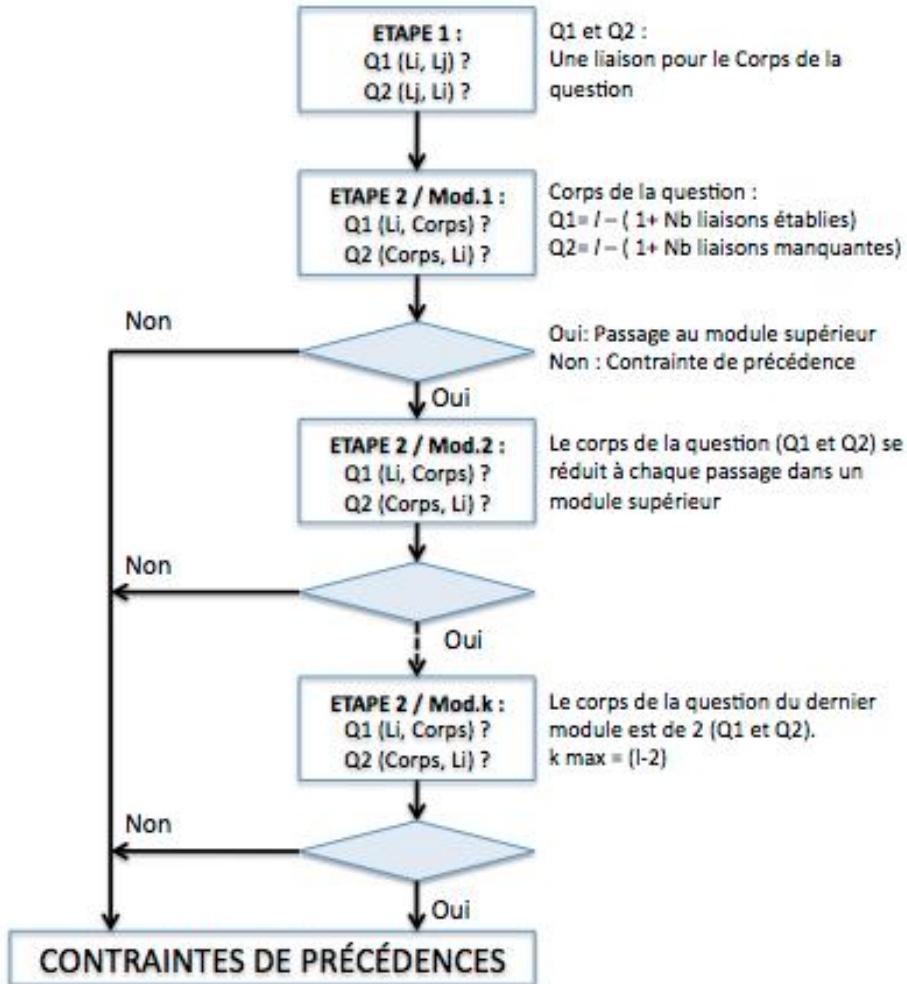


Figure 1-1 : Organigramme et questionnement de Bourjault (adapté de Bourjault, 1984)

Une fois l'ensemble des informations de précédence répertorié, Bourjault propose une représentation des gammes d'assemblage potentielles sous la forme d'un arbre inversé. Chaque branche de l'arbre (allant des « feuilles au sommet » de l'arbre) représente une gamme d'assemblage potentielle. La base de l'arbre inversé constitue l'état initial du produit désassemblé et donc sans aucune liaison entre composants. Le rang suivant rassemble les numéros des liaisons pouvant être réalisées en premier. Suivant la même logique, le rang suivant est atteint en effectuant les tâches d'assemblage possibles à partir des sous-assemblages créés au rang

précédent. Ce processus se poursuit jusqu'à ce que toutes les liaisons présentes du graphe des liaisons soient réalisées. Finalement, l'arbre inversé créé représente toutes les gammes d'assemblage possible du produit, identifiables par les suites ordonnées de numéros créées en partant de la base de l'arbre (une feuille) jusqu'à l'atteinte du sommet.

À noter qu'il peut devenir très lourd d'utiliser ce genre de représentation (arbre inversé), soit de représenter l'ensemble de toutes les séquences d'assemblage par un ensemble de listes ordonnées, chacune correspondant à une séquence. En effet, plusieurs séquences peuvent se partager des sous séquences communes.

Bourjault utilise sa méthode à des fins de génération de gammes d'assemblage pour le choix de l'une d'entre elles qui est tout à fait applicable en désassemblage, dans la mesure où les tâches de désassemblages sont considérées comme l'inverse des tâches d'assemblage réalisables (présentes dans l'arbre). De plus, la représentation graphique utilisée permet par une lecture partant du sommet aux feuilles de l'arbre inversé, d'obtenir les gammes de désassemblage d'un produit en supprimant des liaisons et donc en libérant des composants petit à petit.

Cette méthode de questions/réponses est développée par Bourjault dans l'optique que chaque question posée soit nécessaire. En effet, aucune question ne se répète et puisque chacune possède un « Oui » ou un « Non » en réponse, l'information relative à une gamme d'assemblage peut être comptabilisée (en bits). L'étape 1 qui établit les précédences entre chaque paire de liaisons, est identique pour chaque gamme d'assemblage et possède  $2l^2$  questions (avec  $l \geq 3$  pour passer l'étape 1). Pour l'étape 2, le nombre de questions dépend directement du nombre de « Oui » et « Non » comptabilisés dans l'étape précédente. Si des « Non » sont donnés pour toutes les questions du module 1, l'ensemble des contraintes de précédence est recensé. Sinon, des questions additionnelles sont posées dans le second module et ainsi de suite. Au minimum, le nombre de questions associées au module 1 est égal à  $2l$  ( $l \geq 4$  pour passer le module 1 de l'étape 2). Le nombre total de questions à poser pour l'élaboration d'une gamme de désassemblage, dépend du nombre de questions posées à travers les différents modules et du nombre de liaisons dans le produit ; mais ne peut cependant pas dépasser  $l2^l$  questionnements.

Dans leurs travaux, De Fazio et Whitney (1987) encadre ce nombre maximal de questionnements ( $Q$ ) tel que :  $l2^l > Q \geq 2(l^2 + l)$ , avec  $l \geq 3$  avec la méthode de Bourjault.

Le modèle de Bourjault pour la génération de gammes d'assemblage convertibles en gammes de désassemblage a été repris par de nombreux auteurs. Les méthodes basées sur ce modèle établissent leur étude à partir du graphe de liaisons et les contraintes de précédence dans un produit étudié. La méthode de De Fazio & Whitney est une de ces méthodes. La méthode de Homen de Mello & Sanderson a été elle travaillée de façon indépendante à la méthode de Bourjault.

### **1.1.2 Méthode de De Fazio et Whitney**

De Fazio et Whitney (1987) ont repris la méthode de Bourjault, en apportant des modifications à l'enquête de questions/réponses générée par l'algorithme d'élaboration des gammes d'assemblage. En effet, bien que la méthode de Bourjault soit rigoureuse, celle-ci peut s'avérer fastidieuse d'application dans le cas de produits aux liaisons internes multiples (nombreux composants). À titre d'exemple, avec l'encadrement du nombre de questions posées (Q) avancé dans le paragraphe précédent par les auteurs, un produit contenant 10 liaisons internes nécessite avec le programme de Bourjault un nombre minimum de 220 questions et au maximum de 10240 questions. Pour cette raison, De Fazio et Whitney (1987) ont décidé de reprendre le squelette du travail réalisé avec l'optique de réduire le nombre de questions posées. Pour ce faire, ils ont convenu qu'il était nécessaire de modifier la tournure des questions. À noter que tout le travail réalisé par Bourjault en amont de cette enquête de questions/réponses est repris (le graphe des liaisons). Les données nécessaires en entrée de cette méthode sont toujours tirées des dessins techniques de l'assemblage (vue éclatée, vues en coupe etc.), de la liste de pièces et/ou d'un prototype du produit. Concernant le graphe de liaisons, les auteurs précisent qu'un utilisateur peut s'accorder le choix de recenser une partie des liaisons (en regard de l'outillage disponible par exemple) ou bien d'en ajouter certaines (comme par exemple un simple appui). Ceci permettant de réaliser un certain nombre de tests sur les gammes d'assemblage. Déclarer plus de liaisons que n'en sont recensées dans le dessin technique n'impacte pas sur le caractère valide de cette méthode : des messages d'erreur peuvent être envoyés par le programme. Il s'avère d'ailleurs conseillé d'en déclarer davantage en cas de doute à leurs sujets ('*Clearly, it is more conservative to choose inclusion questionable liaisons rather than their omission*' De Fazio et Whitney (1987)).

Une fois le réseau (graphe connexe) de représentation des liaisons internes entre les composants réalisé, l'utilisateur doit répondre à des questions. Ces questions ne sont plus à réponses positive ou négative mais nécessite un raisonnement sur l'utilisation du produit et une anticipation de l'assemblage d'un point de vue géométrique. Les deux questions suivantes sont posées pour chaque liaison listée :

Pour un total de  $l$  liaisons dans le produit et  $i$  allant de 1 à  $l$ ,

Question 1 : Quelle(s) liaison(s) doivent être réalisée(s) préalablement à la liaison  $L_i$  ?

Question 2 : Quelle(s) liaison(s) doivent être réalisé(s) à la suite de la réalisation de la liaison  $L_i$  ?

Ces deux questions doivent être posées pour chaque liaison et avoir des réponses du type (respectivement pour les questions 1 et 2) :

Réponse 1 :  $(L_j \text{ ou } (L_k \text{ et } L_m)) \rightarrow L_i$

« La liaison  $L_j$  ou les liaisons  $L_k$  et  $L_m$  doivent être réalisées avant la liaison  $L_i$  »

Réponse 2 :  $L_i \rightarrow (L_s \text{ ou } (L_t \text{ et } L_u))$

« La liaison  $L_i$  doivent être réalisée avant la liaison  $L_s$  ou les liaisons  $L_t$  et  $L_u$  »

Les réponses à ces deux questions (des expressions booléennes) traduisent ainsi des relations de précédence entre les liaisons ou des combinaisons logiques entre les liaisons. Un total de  $2l$  questions est posé (2 questions pour chaque liaison). Des réponses correctes permettent d'obtenir une bonne connaissance du design de l'assemblage.

En comparaison avec la méthode de Bourjault où le nombre de questions est au maximum égal à  $l^2$  et au minimum égal à  $2(l^2+1)$ , la méthode de De Fazio et Whitney apporte un nombre de questions réduit atteignant  $2l$  (avec des questions demandant davantage de réflexion). Néanmoins, la méthode de Bourjault explore le graphe systématiquement, alors que la méthode de De Fazio et Whitney laisse une grande part à la décision de l'utilisateur et peut contenir de erreurs.

L'ensemble de ces  $2l$  questions indique les relations de précédences entre les liaisons (ou des combinaisons logiques de liaisons). Ainsi, les séquences d'établissement des liaisons peuvent être générées directement à partir des réponses fournies.

L'état désassemblé du produit constitue le point de départ de l'algorithme, un état initial d'établissement des liaisons qui est nul (aucune liaison établie). L'algorithme commence ensuite par déterminer les liaisons n'ayant pas de contrainte de précédence et pouvant donc être établies en premier. En considérant le terme « état » comme l'état d'établissement de liaisons, la procédure d'assemblage se réalise en passant d'un état à un autre en ajoutant une pièce ou un sous-assemblage à une autre pièce (ou un autre sous-assemblage). Le processus prend fin lorsque l'ensemble des liaisons déclarées est établi.

La représentation des séquences d'assemblage diffère quelque peu de celle de Bourjault qui utilise l'arbre inversé. En effet, De Fazio et Whitney use d'une représentation plus compacte qu'ils appellent Graphe des Séquences de Liaisons ou Graphe des Gammes de Liaisons suivant la traduction (*'Liaison Sequence Graph'*, *d'acronyme 'LSG'*). Ce graphe est construit à partir de boîtes et arêtes. Plusieurs rangs sont utilisés dans la représentation, chaque rang renvoie à un état intermédiaire d'assemblage ou des liaisons ont été établies en fonction du rang précédent (état d'assemblage précédent). Sur chaque rang se dessinent des boîtes numérotées. La numérotation des boîtes correspond à des liaisons dans le produit. La réalisation d'une liaison au cours de l'assemblage implique le marquage (coloriage) de la boîte correspondante. L'état initial est représenté par un ensemble de  $l$  boîtes vides. Les arêtes du graphe connexe représentent le chemin d'assemblage, c'est à dire qu'elles assurent le passage d'un rang à un autre (d'un état à un autre) en connectant les boîtes. Les arêtes traduisent ainsi les transitions (d'où le terme de '*transition state*'). Il n'est pas rare de trouver plusieurs arêtes (transitions) quittant un état (boîte) pour en atteindre d'autres sur le rang suivant. Une gamme d'assemblage potentielle prend alors son origine au rang ou état initial (désassemblé) et se termine au rang final correspondant à l'assemblage (les  $l$  boîtes sont marquées). À noter que cette représentation présentant toutes les séquences potentielles de désassemblage n'utilise qu'un seul ensemble de boîtes vides au rang 0 (état désassemblé) et un seul ensemble de boîtes pleines au rang final (état assemblé).

Tout comme l'arbre inversé de Bourjault, le Graphe des Séquences de Liaisons de De Fazio et Whitney (1987) est lisible dans une optique de désassemblage, en partant du rang final et en « remontant » jusqu'à l'état initial par l'un des chemins. Un tel cheminement fournit de la même manière que précédemment une gamme de désassemblage, fournissant une liste ordonnée des liaisons à supprimer pour atteindre l'état désassemblé. Dans le cas où un désassemblage partiel

du produit est à atteindre, il s'agit de s'arrêter pour chaque séquence au rang nécessaire (c'est à dire lorsque les pièces voulues ont été à ce stade extraites du produit).

C'est ainsi que De Fazio et Whitney (1987) reprendront la méthode de Bourjault (1984), en modifiant les questions/réponses relatives à l'élaboration des gammes d'assemblages et en modifiant leur représentation graphique. Les gammes issues de ces deux méthodes représentent des séquences de liaisons à établir et permettent par la même occasion de fournir tous les états d'un produit au cours de son assemblage.

La méthode interactive de De Fazio & Whitney basée sur celle de Bourjault a suscité le développement d'outils d'aide pour répondre aux questions. Citons Baldwin et al (1991) qui développent une interface graphique en guise « d'outil d'aide à la réponse ». Néanmoins les séances de questionnement à l'égard des contraintes de précédences pour l'assemblage d'un produit restent fastidieuses. Dans les années suivantes, l'automatisation de cette étape est pensée par de nombreux auteurs, en essayant de prendre le problème sous différents angles. Ha et Al. (1996) utilisent des cônes de visibilité pour l'extraction de pièces, favorisant d'aborder le problème en trois dimensions. Lambert (2002) aborde le problème des contraintes de précédences avec un questionnement sur les priorités de retrait de pièces et non sur des suppressions de liaisons.

### **1.1.3 Méthode de Jabbour et Mascle : Approche des graphes d'états**

Jabbour *et al.* (1998) propose une méthode de détermination des gammes d'assemblage en introduisant des caractéristiques géométriques, technologiques et fonctionnelles associées aux composants et définies pas à pas dans le processus d'assemblage d'un produit. Parmi d'autres méthodes qui utilisent la représentation graphique pour traduire les liaisons d'un composant avec le reste de l'assemblage, employant des sommets représentatifs des pièces et des arcs pour traduire les liaisons entre celles-ci (liaisons de type géométrique, de connexion, de localisation ou encore de fonctionnalité). La méthode de Jabbour *et al.* (1998) trouve son originalité dans la considération des différents états du produit au cours de son assemblage. En effet, une grande partie des méthodes de la littérature considèrent les caractéristiques des composants dans leur état assemblé, c'est-à-dire lorsque le produit se trouve dans son état final assemblé. Les auteurs

estiment important de considérer les effets des différentes modifications de l'état d'assemblage sur l'ensemble des caractéristiques définies sur le produit. C'est ainsi qu'ils justifient la nécessité et l'importance de modéliser le produit dans chacun de ses états (configurations) pris au cours du processus d'assemblage. L'assemblage est considéré en deux étapes : une étape de pré-positionnement des composants (mise en contacts des surfaces), suivie de l'étape de réalisation des actions technologiques sur ces surfaces en contact (réalisation des liaisons à proprement dites). La première étape se base sur un modèle géométrique des composants, et la seconde sur un modèle technologique des liaisons. L'avantage du graphe d'états considéré réside dans la possibilité à chaque instant de revenir en arrière, en désassemblant le produit, ou en continuant d'avancer dans le processus en assemblant d'autres composants. Pour chaque état considéré, toute l'information est disponible et il est possible d'utiliser ce graphe en assemblage comme en désassemblage. Jabbour *et al.* (1998) propose un '*Système de Caractéristiques d'Assemblage de Produits*' (SCAP) établi pour répondre à l'absence de prise en compte de l'information relative aux changements d'état au cours de l'assemblage des faces ou sous faces de contact, des degrés de liaison, des attachements, etc., dans les modèles de la littérature. Ce système est créé afin de considérer les différentes activités du processus d'assemblage. Les liaisons sont modélisées par ce système qui considère les deux étapes d'assemblage évoquées précédemment : le '*prepositioning stage*' et le '*process stage*'. Une liaison par contact établie dans l'étape 1 est appelée liaison de pré-positionnement ('*prepositionning liaison*') tandis que celles réalisées dans l'étape 2 sont appelées liaisons de procédé ('*process liaison*'). SCAP permet de modéliser un produit dans chacun de ses états d'assemblage, tant valable en assemblage qu'en désassemblage, employant une procédure considérant chacune des spécifications propres à une étape du processus. De plus, le produit est perçu comme un ensemble d'entités devant être traitées séparément ('*The configuration of product may be understood as a set of entities, each of them working separately. But these entities represent, on the first hand, the subset of assembled components and, secondly, the disassembled components*''). Par cette considération, chaque état du produit au cours de son assemblage est considéré comme un ensemble d'entités indépendantes les unes des autres. Les séquences d'assemblage sont finalement représentées par un graphe des états du produit, avec l'état initial du produit désassemblé, l'ensemble des états d'assemblage intermédiaires réalisables, et ultimement l'état final du produit complètement assemblé. Le système employé a l'avantage de déterminer les opérations d'assemblage restantes à partir de

l'état d'assemblage actuel du produit ('*The system is also able to determine the assembly operation that must be applied to modify the state of a product while it is in its current state (in assembly)*').

L'originalité et avantage de la méthode de Jabbour *et al.* (1998) est qu'elle permet la modélisation dynamique d'un produit à travers les étapes de son processus d'assemblage, en introduisant des caractéristiques géométriques, technologiques et fonctionnelles. Cette approche permet la détermination automatique des séquences d'assemblages et des ressources nécessaires à l'élaboration du produit.

#### **1.1.4 Méthode de Homen de Mello et Sanderson**

Homen de Mello et Sanderson (1990) établissent une représentation de toutes les gammes d'assemblage d'un produit, nommée Graphes ET/OU (« *AND/OR Graphs* »).

##### ✓ *Organisation du Graphe ET/OU*

Cette représentation illustre les composants d'une pièce et les sous-ensembles créés par les opérations d'assemblage en vue de l'atteinte de l'assemblage complet du produit. Dans le graphe connexe ET/OU les tâches d'assemblage (établissement de liaisons) sont implicites : le graphe ne présente plus des états d'assemblage traitant de l'établissement de liaisons comme précédemment. Il traite désormais de la configuration entre des composants du produit (position relative entre les pièces, ou sous-assemblage du produit). Les nœuds sont caractérisés par des sous-ensembles du produit à monter et non par des opérations de montage à réaliser. Une critique de cette méthode peut être que les sous-assemblages sont créés de manière aléatoire.

Selon les auteurs, l'assemblage d'un produit repose sur la succession d'opérations transformant une configuration de pièces en une autre , en commençant pour une série de pièces détachées et en terminant par l'ensemble des pièces correctement assemblées pour former le produit désiré ('*Assembly plans are ordered sequences of operations that transform one configuration of parts into another, starting with all parts disconnected from each other and ending with all parts properly joined to form the desired assembly*', Homen de Mello et Sanderson 1990).

À travers le montage d'un produit, il est possible de retrouver dans le graphe des pièces seules et des sous-assemblages (sous-ensemble de pièces jointes pour créer un sous-assemblage du produit). Les gammes d'assemblage réalisables pour le montage d'un produit sont représentées par les graphes ET/OU de la façon suivante : un graphe connexe, composé de nœuds et d'arêtes (un graphe orienté d'états d'assemblage). Chaque nœud représente une pièce ou un sous-assemblage dit stable (une configuration) du produit à assembler. Les états du procédé d'assemblage correspondent dans cette méthode aux possibles configurations du produit prises durant son assemblage. Les arêtes soulignent le passage entre deux configurations d'assemblage du produit (avec un ajout de pièces ou sous-ensembles) qui soit réalisable (*'Each transition between two configurations corresponds to joining a number of subassemblies to form one larger subassembly'*). Chaque opération d'assemblage correspond au passage entre deux configurations et le montage d'un produit correspond lui à la gamme rassemblant ces transitions (depuis des pièces détachées à un produit complètement assemblé). Le montage du produit doit d'après les auteurs comporter des « transitions physiquement réalisables ». Il s'agit dans ce cas d'être en mesure d'avoir des trajectoires pour la séparation des assemblages qui soient libres d'accès et en l'absence de forces gênant cette extraction. Les nœuds origines du graphe d'assemblage correspondent à chacun des composants du produit désassemblé et les « nœuds terminaux » au produit complètement assemblé (après la réalisation des différentes configurations encourues par la gamme).

Les auteurs font un parallèle entre la représentation de toutes les gammes d'assemblage réalisables pour la formation d'un produit par l'intermédiaire de graphes orientés d'états d'assemblage et la représentation par un graphe ET/OU. Ce dernier graphe permet une réduction du nombre de nœuds (agencement des configurations), puisqu'il permet d'obtenir une liste ordonnée d'opérations d'assemblage qui soient physiquement réalisables. Dans l'approche des graphes orientés, toutes les gammes d'assemblage sont recensées sans en avoir vérifié la validité des opérations d'un point de vue physique. Le caractère valide d'une opération d'assemblage quant à sa faisabilité physique est exposé dans les lignes précédentes (« transitions physiquement réalisables »).

Homen de Mello et Sanderson (1990) établissent que la méthode de recherche de gammes d'assemblage d'un produit peut être convertie en une recherche des gammes de désassemblage de ce même produit. Puisqu'une opération de désassemblage n'est pas nécessairement l'inverse de

l'opération d'assemblage (caractère irréversible de certaines opérations), il convient de définir le terme de '*disassembly operation*'. Ils précisent à ce sujet que cette dénomination prend part dans le cas où l'opération de désassemblage réfère à l'inverse d'une opération de d'assemblage réalisable (*'disassembly operation is used to refer to the reverse of a feasible assembly operation'*). Le désassemblage d'un produit passe par la succession de décompositions de celui-ci (opérations de désassemblage) et peut être représenté par les graphes ET/OU de Homen de Mello et Sanderson (1990) (encore appelés *hypergraphes*).

De façon analogue au graphe d'assemblage exposé précédemment, les nœuds d'un hypergraphe représentent des pièces détachées, des sous-assemblages, ou encore des configurations de sous-ensembles d'un produit. Le « nœud origine » de l'hypergraphe correspond au produit assemblé, duquel sortent non pas des arêtes (cf le graphe ET/OU d'assemblage) mais des hyperarcs. Les hyperarcs trouvent leur origine dans un composant « parent » et s'orientent vers le ou les composants créés par l'opération de séparation de deux pièces, d'une pièce et d'un sous-ensemble, ou encore de deux sous-ensembles. À partir des « nœuds enfants » (cibles des hyperarcs précédents), d'autres hyperarcs sont créés par les opérations sous-jacentes de décomposition du produit, jusqu'à ce que l'ensemble des composants du produit soient séparés les uns des autres. Les gammes de désassemblage réalisables sont représentées par les arbres contenus dans le graphe ET/OU (qui peuvent être représentés individuellement pour une meilleure visibilité). Le choix de la meilleure gamme d'assemblage ou de désassemblage nécessite ensuite un arbitrage. Les auteurs proposent une pondération des hyperarcs en fonction de la difficulté, du coût etc., des opérations encourues pour avoir emprunté chaque hyperarc d'une séquence. La meilleure séquence (gamme) apparaît avec cet arbitrage comme la moins coûteuse.

Dans le cadre d'opérations de maintenance et réparation, le graphe ET/OU peut également se prêter à cette utilisation, pour laquelle le produit complet ne doit pas être désassemblé. Dans ce cas la recherche d'une gamme de désassemblage pour l'atteinte d'un composant en particulier, nécessite une gamme où le composant visé est désassemblé et où le reste peut, suivant les cas, représenter un ou plusieurs sous-assemblages et/ou une ou plusieurs pièces détachées.

Pour les produits à nombreux composants, le graphe ET/OU peut devenir très grand. Il est possible dans ce cas de considérer des sous-ensembles stables de pièces (sous-assemblages du produit) ne nécessitant pas de démontage.

#### ✓ *Obtention du Graphe ET/OU*

Homen de Mello et Sanderson (1991a) proposent un algorithme exact et complet (exhaustif) pour la génération de séquences d'assemblage d'un produit ('*A Correct and Complete Algorithm for the Generation of Mechanical Assembly Sequences*'). Les preuves du caractère exact et complet de l'algorithme sont exposées dans Homen de Mello et Sanderson (1991a) et dans Homen de Mello et Sanderson (1990b).

En considérant qu'une gamme d'assemblage est une liste ordonnée d'opérations, il peut s'avérer que plusieurs séquences d'assemblage possèdent des sous séquences communes (portions de séquences ordonnées similairement). C'est à partir de cette observation que les auteurs envisagent de créer une représentation des gammes d'assemblage qui soit plus compacte.

Les méthodes précédentes de Bourjault (1984) et de De Fazio et Whitney (1987) proposent des approches interactives de questions/réponses en entrée de l'algorithme. C'est dans l'objectif de répondre à ces questions par un programme plutôt que par un expert que Homen de Mello et Sanderson (1991a) élaborent leur modèle.

Pour la génération de gammes d'assemblages, une description géométrique du produit doit être complétée par une description des attachements présents dans ce même produit. Pour remplir ces deux critères la méthode de Homen de Mello et Sanderson (1991a) propose d'établir un '*relational model*' du produit en guise d'entrée de leur algorithme de génération de gammes.

Le '*relational model*' traite de trois entités : les composants, les contacts et les attachements d'un produit. De plus, les relations entre les composants du produit sont précisées. Pour compléter le modèle, des fonctions sont associées aux entités et relations (ex : une fonction associant un composant à sa forme géométrique).

Le '*relational model*' se représente par un graphe connexe où les nœuds représentent les entités et les arêtes les relations entre les entités. Une table élaborée en parallèle précise les fonctions associées aux nœuds et arêtes s'il y a lieu. Le graphe de Bourjault (le graphe de liaisons

mécaniques) est d'ailleurs un sous graphe de ce '*relational model*' ; soit un graphe simple ayant pour nœuds les composants du produit et des arêtes en guise de contacts entre composants.

Comme vu précédemment, le problème de génération de gammes d'assemblages est transformable en un problème de génération de séquences de désassemblage pour un même produit. Toujours à condition de ne retenir que les tâches de désassemblage qui correspondent à l'inverse des tâches d'assemblage réalisables. Le but de l'algorithme consiste donc à déterminer toutes les décompositions d'un assemblage qui soient réalisables. De fait, la représentation des gammes d'assemblage par un graphe ET/OU se prête à l'algorithme.

Une décomposition correspond à la réalisation d'une coupe dans le graphe des liaisons de Bourjault (soit en quelque sorte une vision mathématique du désassemblage). Pour que cette décomposition soit jugée réalisable, deux « qualités » doivent être validées : '*task-feasibility*' et '*subassembly-feasibility*' ; ces deux « qualités » permettent de valider la réalisation d'un assemblage entre deux sous-assemblages et sont vérifiées au travers de la procédure « FEASABILITY-TEST ».

Globalement, l'algorithme s'articule autour de quatre procédures et test suivants :

« GET-FEASIBLE-DECOMPOSITION » : Procédure nécessitant le '*relational model*' en entrée pour fournir toutes les décompositions réalisables de l'assemblage en sortie.

« GET-DECOMPOSITIONS » : Procédure de génération de décompositions de l'assemblage couplée au test « FEASABILITY-TEST », prenant part dans la procédure précédente.

« GENERATE-AND-OR-GRAF » : Procédure qui à partir du '*relational model*' et de chaque décomposition obtenu par la première procédure, génère le graphe ET/OU de toutes les gammes d'assemblages du produit.

Finalement, les arbres du graphe ET/OU obtenus permettent d'obtenir toutes les gammes d'assemblage du produit.

L'équivalence statuée précédemment entre les problèmes de génération de gammes d'assemblage et de désassemblage permet d'utiliser le graphe ET/OU pour les deux applications. Il ne faut cependant pas oublier que seules les tâches de désassemblage correspondant à des tâches d'assemblage réalisables sont considérées. Étudier le graphe représentatif d'une gamme de haut

en bas ou de bas en haut, revient à obtenir des gammes de désassemblage ou d'assemblage respectivement.

Le nombre de calculs à réaliser pour cet algorithme dépend du nombre d'entités du '*relational model*' et également du graphe ET/OU résultant. À partir du nombre de composants du produit (N) et de leur « niveau » de connexion, est obtenu le nombre total de décompositions résultantes (D). Deux niveaux de connexion sont établis pour les assemblages : '*Weakly connected assembly*' (a) et '*Strongly connected assembly*' (b) (Homen de Mello et Sanderson (1991a)).

(a) 'Weakly connected assembly' :

Arbre du graphe ET/OU ('*One-part-at-a-time tree AND/OR graph*') :

$$D = \frac{N \cdot N(N-1)}{2}$$

Graphe ET/OU ('*Network AND/OR Graph*') :

$$D = \frac{(N + 1) * N(N - 1)}{6}$$

(b) 'Strongly connected assembly' :

Arbre du graphe ET/OU ('*One-part-at-a-time tree AND/OR graph*') :

$$D = 2^N - N - 1$$

Graphe ET/OU ('*Network AND/OR Graph*') :

$$D = \frac{3^N - 1}{2} - 2$$

Les preuves associées à ces limites de calcul sont présentées dans Homen de Mello et Sanderson (1991).

## 1.2 Approche de la « propagation par vague » (« Wave propagation approach »)

Srinivasan et Gadh (1998) établissent une méthode de désassemblage orientée composant. Ce désassemblage sélectif se prête aux activités de maintenance, entretien et réutilisation. Le terme de ‘wave propagation’ est utilisé pour la désignation de cette méthode, relativement à la forme du graphe illustrant le retrait d’un composant dans l’assemblage et est élaboré par l’algorithme.

L’objectif de l’algorithme est de fournir une séquence de retrait de pièces pour le désassemblage sélectif composant  $C_x$  qui soit optimale. Par optimalité, les auteurs choisissent les séquences nécessitant un minimum de trajectoires de désassemblage. Seuls les composants ‘*1-disassemblable*’ (ne nécessitant qu’une simple trajectoire rectiligne de retrait), sont considérés ; ce qui est restrictif par rapport au problème posé. Il s’agit donc d’obtenir une ou des séquences optimales avec un minimum de composants à extraire.

Cet algorithme utilise l’assemblage modélisé par ordinateur accompagné de ses considérations géométriques.

Dans un premier temps, le modèle de la propagation par vague développé par Srinivasan et Gadh (1997) ne considère pas les attachements présents dans un assemblage.

L’assemblage est représenté par un graphe de liaisons de ses composantes (‘*Component Mating Graph*’), où les composants  $C_i$  sont représentés par des noeuds et où les contacts entre composants sont représentés par les arêtes du graphe. Les considérations géométriques de la méthode permettent d’organiser les composants d’un assemblage en fonction de leurs surfaces de contacts et de leur localisation dans l’assemblage.

Les *contacts* d’un composant  $C_i$  avec ses voisins, c’est-à-dire les composants avec qui  $C_i$  possède une ou plusieurs surfaces de contact, sont définis et rassemblés dans un ensemble appelé ‘*Mating adjacent of  $C_i$* ,  $MA_i$ ’. En effet, le contact entre deux surfaces de deux composants distincts est défini comme un accouplement formant une ‘*mating face*’. Ainsi, chaque composant  $C_i$  possède son propre ensemble de surfaces avec lesquelles il est en contact, l’ensemble  $MA_i$ .

L’accessibilité d’un composant  $C_i$  est définie à partir de l’ensemble  $MA_i$ . L’accessibilité d’un composant s’établit par les surfaces avec lesquelles il établit un contact. Ainsi pour chaque élément de  $MA_i$ , les surfaces de contacts avec le composant  $C_i$  sont analysées dans l’objectif de

définir quels sont les accouplements à supprimer entre les composants  $C_i$  et  $C_j$ , avec  $C_j$  appartenant à  $MA_i$ , pour une accessibilité.

La « *désassemblabilité* » (*'disassemblability'*) du composant  $C_i$ , indique si le composant peut être extrait de l'assemblage au cours de la séquence en se basant sur l'accessibilité de celui-ci. Les accouplements présents sur la trajectoire de désassemblage doivent être supprimés (prédécesseurs dans le désassemblage) pour que le composant soit « *désassemblable* ».

L'*influence de retrait* est la dernière considération géométrique prise en compte par l'algorithme. Celle-ci analyse l'influence du retrait d'un composant  $C_j \in MA_i$  sur le désassemblage du composant  $C_i$ . Si la « *désassemblabilité* » initialement impossible du composant  $i$ , devient possible avec le retrait du composant  $j$  alors  $RI_i^j = \text{true}$ .

L'algorithme fonctionne avec les quatre caractéristiques géométriques précédentes.

Le composant  $C_x$  est le composant à désassembler, le composant cible de l'assemblage. L'ensemble des composants frontières de l'assemblage, c'est à dire ceux à la « *désassemblabilité* » vraie à  $t=0$  dans l'avancée du désassemblage, appartiennent à l'ensemble  $C_b$ .

Le principe de la propagation par vague créé par l'algorithme est le suivant. Le composant cible  $C_x$ , point de départ de l'algorithme, émet une vague circulaire à  $t=0$ . A l'instant  $t=1$ , si la « *désassemblabilité* »  $\Delta_x = \text{false}$  alors, la vague  $\tau_1$  est mise en place. Cette vague contient tous les composants voisins (chacun ayant au minimum une surface de contact avec le composant cible) dont l'influence de retrait est vraie  $RI_i^j = \text{true}$ . Une arête relie alors le composant  $C_x$  à chacun des éléments de la vague  $\tau_1$ , stipulant que  $C_j \in \tau_1$  doit être désassemblé avant  $C_x$  (suppression du contact entre les composants par un retrait) :  $C_x \rightarrow C_j$  .

Ce processus itératif est reproduit pour chaque vague suivante  $\tau_a$ , créée à partir des éléments de  $\tau_{a-1}$  pour chaque instant  $t$  du processus. Lorsqu'un composant frontière est « *touché* » par une vague, la séquence créée (retrait d'un composant par vague à chaque instant  $t$  pour atteindre le composant cible), est retenue en guise de séquence optimale. Si plusieurs composants « frontières » se retrouvent sur une même vague, alors plusieurs séquences optimales pour le retrait de  $C_x$  existent.

Finalement un graphe type de la propagation par vague est obtenu. Srinivasan et Gadh (1998) l'appelle le '*Removal Influence Graph (RG)*'. Ce graphe représente chacune des vagues créées et ce jusqu'à l'atteinte de composants « frontières » sur une dernière vague.

Dans certains cas, l'extraction d'un composant suivant une trajectoire rectiligne peut nécessiter le retrait de deux composants se partageant une même surface de contact. Dans ce cas, les deux composants à extraire se retrouvent sur la vague et sont reliés par un hyper-arc au composant avec lequel ils sont en contact. Srinivasan et Gadh (1998) fournissent plusieurs exemples illustrant ces propos dans leurs travaux.

Pour l'inclusion des composants d'attachments dans la méthode, deux approches sont proposées. La première considère les attachments comme des composants à part entière vus par l'algorithme, permettant une analyse complète, mais plus coûteuse en calculs. La seconde sépare l'étude des attachments de la méthode expliquée ci –dessus. Lorsque la séquence optimale de désassemblage est obtenue (en ignorant les attachments), l'algorithme regarde quels sont les attachments devant être supprimés pour l'extraction de chacun des composants présents dans la séquence optimale de désassemblage. Cette approche est plus efficace que la précédente en termes de calculs mais possède certaines limites : la séquence optimale issue peut être ordonnée de différentes manières à la suite de l'inclusion du retrait d'un attachment.

Finalement, la '*wave propagation approach*' de Srinivasan et Gadh (1998) apporte une nouvelle méthode qui offre une séquence optimale de désassemblage (minimisant les mouvements) pour le retrait d'un composant dans un assemblage.

La complexité de l'algorithme varie selon que l'on est en présence de '*l-dependent*' ou '*d-dependent*' composantes : chaque composant est-il en contact avec au plus un composant par surface de contact ('*l-dependent component*' ), ou plusieurs composants par surface de contact ('*d-dependent component*' )? Pour chacun des cas, la complexité est évaluée en moyenne à  $O(n)$  et  $O(n^2)$  respectivement, avec  $n$  le nombre de composants dans l'assemblage.

Cette approche pour le désassemblage sélectif d'un composant dans un assemblage est suivie de l'élaboration d'un algorithme pour le désassemblage de plusieurs composantes dans un assemblage basée sur la méthode de la propagation par vagues ('*Efficient Geometric Disassembly*

*of Multiple Components from an Assembly Using Wave Propagation')*, Srinivasan et Gadh (2000)). Il s'agit désormais de générer automatiquement une séquence de désassemblage d'un ensemble C de composantes en minimisant le nombre d'opérations de retrait. Les auteurs montrent que l'élaboration de séquences de désassemblage de composants disjointes n'apporte pas une solution optimale pour le retrait de ces pièces en agrégeant les séquences obtenues individuellement. Ils proposent donc une nouvelle approche appelée '*Disassembly Wave Propagation Approach*'. La méthode comporte désormais deux types de vagues, de types  $\tau$  et  $\beta$ . La création de ces deux types de vagues permet d'apporter conjointement à l'algorithme les séquences individuelles de retrait des composants cibles, ainsi que la séquence commune pour le retrait de l'ensemble des composants de C. Globalement, l'élaboration d'une séquence de désassemblage optimale pour le retrait de l'ensemble des composants de C, repose sur l'analyse de l'intersection des vagues des '*Removal Influence Graph*' des composants (une intersection est identifiée lorsque deux composants nécessitent au même instant t le retrait d'un même composant pour être accessible). Toujours en se basant sur les contacts géométriques entre les pièces d'un assemblage, les surfaces d'accouplement de celles-ci et d'une modélisation de l'assemblage, les auteurs proposent deux algorithmes utilisant la '*Disassembly Wave Propagation*'. Un premier visant le désassemblage d'un nombre de pièces nettement inférieur au nombre total de composants présents dans l'assemblage : '*Multiple Wave Propagation Algorithm*'. Et un second où le nombre de composants à désassembler est conséquent par rapport au nombre de pièces de l'assemblage : '*Priority Intersection Event Algorithm*'. La nuance entre ces deux algorithmes réside dans le traitement des '*Intersection Events*', soient les intersections des vagues propres aux composants cibles ; pour la génération de la gamme de désassemblage optimale. La complexité de ces deux méthodes avancée par Srinivasan et Gadh (2000) est respectivement  $O(n^2)$  et  $O(sn^2)$  avec s le nombre de composants cibles et n le nombre de composants de l'assemblage.

Par ailleurs, Srinivasan et Gadh (2002) propose une méthode améliorée de la vague (qui ne prend plus la forme d'une vague) pour le désassemblage d'un composant d'une pièce avec une prise en compte de contraintes spatiales mais également de contraintes établies par l'utilisateur. Par les « contraintes-utilisateur » se retrouvent la création de sous-assemblages de pièces, de directions interdites et autres restrictions. Il s'agit toujours de déterminer une séquence de désassemblage optimale en se basant sur la modélisation de l'assemblage sous logiciel.

Les contraintes spatiales regroupent désormais des contraintes de contacts géométriques entre les pièces et également des directions pouvant être sujettes à des collisions lors de l'extraction d'un composant cible. L'objectif est de déterminer une séquence optimale de désassemblage du composant cible en privilégiant des retraits simultanés plutôt que séquentiels de composants et de minimiser les retraits simultanés. À la différence de la méthode de la '*wave propagation*' qui se base sur une analyse des contacts géométriques, les interférences globales entre les pièces d'un assemblage sont désormais prises en compte. Les auteurs présentent alors un algorithme fournissant une séquence optimale pour un désassemblage sélectif global d'un composant en analysant ses contraintes géométriques dans l'assemblage ('*Global Selective Disassembly Algorithm to determinate an OS for global SD of a selected component by analysing the geometric constraints of the components in A*' Srinivasan et Gadh (2000)). Cet algorithme requiert le modèle 3D de l'assemblage considéré et possède une complexité de calcul polynomial évaluée à  $O(d^*F^2+d^*n^3)$ , avec d le nombre de demi-directions considérées dans l'univers des mouvements de l'approche, F le nombre total de faces de tous les composants de l'assemblage A et n le nombre de composants de A .

### **1.3 Approche des réseaux de Petri (« Petri-net approach »)**

Les réseaux de Petri ont également été utilisés pour le désassemblage de composants. Moore, Gungor et Gupta (1998a) proposent à ce sujet un algorithme capable de générer automatiquement des réseaux de Petri pour le désassemblage ('*Disassembly Petri Net (DPN)*') à partir d'une matrice de précédence basée sur les contraintes géométriques entre les composants. Pour la détermination d'une séquence optimale de désassemblage des fonctions coûts sont associées aux séquences et des méthodes heuristiques peuvent permettre de s'en approcher (Moore, Gungor et Gupta (1998a)). La méthodologie pour la génération de gammes de désassemblage optimale (ou presque optimale) comprend trois étapes. Dans un premier temps, la matrice des précédences de désassemblage doit être établie. Cette matrice est une matrice carrée de degré n (n= le nombre de pièces du produit), qui fournit pour chaque composant la direction de retrait à suivre pour chaque pièce qu'il constraint physiquement (par une ou plusieurs surfaces de contact). La matrice de précédence peut donc devenir relativement importante dans le cas d'un produit complexe à grand nombre de pièces.

Une fois la matrice réalisée, le réseau de Petri correspondant peut être construit. Les réseaux de Petri correspondent à une technique de modélisation graphique et mathématique développée à l'origine pour la modélisation de systèmes d'ordinateur (Petri, 1966). Murata (1989) rassemble dans ses travaux l'analyse de ces réseaux et les applications pouvant se prêter à leur utilisation. Un réseau de Petri peut se modéliser à partir de 5 éléments : des positions (Ensemble fini P), des transitions (Ensemble fini T), des arcs orientés (Ensemble A), des fonctions propres aux arcs (Ensemble W) et des marqueurs d'état pour chaque position (noté  $M_i$  pour  $i \in P$ ). L'algorithme NP-complet de Moore, Gungor et Gupta (1998a) reprend les données de la matrice de précédence complétée au préalable. La séquence de désassemblage correspond à une liste d'actions de désassemblage réalisée à partir du produit complètement assemblé et se terminant par l'extraction des composants désirés. Avec la précision des précédences de type « ET/OU » (AND/OR) l'algorithme génère les positions et transitions adaptées. Les positions représentent des états et les transitions qui les encadrent des actions. Lorsqu'une position est marquée, cela signifie que la transition (la tâche de désassemblage) la précédent est réalisée et qu'il est possible de passer à l'opération suivante (transitions et positions sont reliées par des arcs). Les composants n'ayant aucune contrainte de précédence, sont également muni d'une transition en amont, demandant la présence de la pièce pour qu'elle soit désassemblée et que le désassemblage de tous les composants cibles puisse être complet. Une fois le réseau de Petri complet, les auteurs proposent une analyse de celui-ci par la '*reachability tree method*' de Murata (1989), pour obtenir toutes les gammes de désassemblage réalisables. Enfin, pour le choix de la séquence de désassemblage optimale (en termes de coûts des opérations), il convient d'associer un coût à chaque arc du réseau et de déterminer l'arbre de désassemblage le moins coûteux.

Tang, Zhou, Zussman et Caudill (2000), établissent une revue des méthodes de modélisation et de planification à éléments discrets ('*discrete-event modeling and planning methodologies*') appliquées au désassemblage pour en établir un comparatif (avantages et inconvénients des méthodes en désassemblage). Les méthodes comparées, au nombre de 5 (dont deux variantes des réseaux de Petri) sont le Graphe de liaisons, le Graphe orienté, le Graphe ET/OU et les réseaux de Petri. Gungor et Gupta (1998b) proposent un algorithme pour la génération de la matrice de précédences, dans l'objectif d'obtenir la gamme de désassemblage optimale.

## 1.4 Synthèse de la littérature

Les méthodes et modèles cités dans la revue de littérature proposent différentes visions avec lesquelles peut être abordée la génération de gammes de désassemblage. À partir de ces méthodes, relativement anciennes, d'autres auteurs ont su par la suite établir leur recherche. La littérature en désassemblage avance de nombreux travaux traitant du modèle de Bourjault, de De Fazio & Whitney, des graphes ET/OU de Homen De Mello & Sanderson, de la propagation par vague de Srinivasan et Gadhi, sans oublier les réseaux de Petri. De plus, l'approche des graphes des états d'un produit introduit de nouveaux paramètres pour une mise à jour de l'état du produit étape par étape avec les considérations géométriques correspondantes.

L'analyse requiert une définition du problème abordé. La récupération de pièces réutilisables sur un avion en fin de vie passe par leur désassemblage. La méthode de désassemblage utilisée pour cette récupération doit respecter les directives précisées à cet usage dans les manuels de maintenance et d'entretien de l'appareil. Plusieurs raisons justifient cette façon d'agir et seront exposées dans le Chapitre 2. L'activité de désassemblage des pièces ne doit pas aller à l'encontre de leur caractère fonctionnel, puisque celles-ci doivent être réutilisables.

Toutes les méthodes revues s'établissent à partir du graphe de liaisons d'un produit et travaillent ensuite à l'établissement des relations de précédence. Le graphe des liaisons est créé à partir de dessins techniques, prototypes et modélisations du produit. Dans le cas d'un avion en fin de vie, notamment ceux étudiés à travers ce projet, il s'agit de « produits anciens » d'une durée de vie n'excédant pas 25 ans (Howarth, 2012), pour lesquels les données disponibles reposent sur des plans, sur l'appareil en lui-même (son état en fin de vie) et sur les manuels techniques relatifs à la maintenance et l'entretien. Les outils de modélisation tels que Catia et Solidworks ne sont apparus que dans les années 90' et 2000 respectivement (1981 pour Catia et 1997 pour Solidworks, tout deux rachetés par Dassault Système, (CATIA, 2012), (Solidworks, 2012)).

Il pourrait être envisagé de réaliser un graphe complet de l'appareil aérien. En dépit de sa très grande taille, un travail de réalisation exigeant et spécifique à chaque appareil, il permettrait de renseigner l'ensemble des contacts géométriques entre les pièces d'un avion. Cependant, ce travail colossal n'est que partiellement utile au problème de désassemblage de pièces traité. En effet, le problème de désassemblage posé se caractérise par ses aspects à la fois sélectif et non connexe. L'objectif n'est pas ici de désassembler un objet ou des objets établis dans une région

du produit, mais de récupérer des sous-assemblages et pièces situés dans des zones diverses d'un produit de grande taille : un avion. Un graphe des liaisons, tel que celui de Bourjault, peut être exploitable localement (dans une zone de travail), mais pas à l'échelle globale du produit. Ainsi l'établissement d'un graphe de liaisons global et centré sur les « sous-assemblages cibles », illustrerait ce caractère non connexe. Le problème traité est plus générique et repose sur la question de savoir où agir et à quel moment : une planification d'opérations non connexes en désassemblage (Mise en place d'un plan d'intervention).

L'objectif des méthodes de Bourjault, de De Fazio & Whitney et de Homen de Mello & Sanderson ('*relational model*') est de créer un graphe de liaisons entre les composantes et ensuite d'établir des précédences entre des établissements liaisons ou des états d'assemblage. Dans notre cas, l'objectif est d'établir un plan de travail en désassemblage, qui minimise les déplacements dans le produit (pour maximiser l'efficacité du désassemblage des pièces). Des précédences existent entre les tâches de désassemblage. Ces contraintes de précédence (précédence entre des tâches de désassemblage) peuvent s'articuler autour de tâches corrélées, ordonnées, indépendantes et s'établir dans des zones diverses (exemple : nécessité d'intervenir dans le cockpit avant d'opérer le désassemblage d'un élévateur). De plus, l'exécution des tâches de désassemblage se réalise par étape et nécessite une mise à jour des tâches exécutées ou non dans le plan de travail et dans son avancée. Cette mise à jour de « l'état » des tâches sollicitées par le désassemblage rejoint la méthode de Jabbour *et al.*. En effet, les auteurs proposent dans leur méthode une mise à jour des caractéristiques des composants (géométriques, de contact ou technologiques) à chaque étape du procédé ; contrairement à d'autres méthodes retenant les caractéristiques des composants à partir de leur état final dans le produit assemblé. De façon analogue, la mise à jour étape par étape des caractéristiques des composants dans la méthode de Jabbour *et al.* correspond à la mise à jour étape par étape de l'état de réalisation des tâches au cours du procédé de désassemblage. Il n'est plus tenu compte de l'analyse des caractéristiques géométriques ou fonctionnelles des composants mais de l'état de réalisation des tâches de désassemblage..

Le principe de la vague introduit par Srinivasan et Gadh (1998) peut être employé pour illustrer la navigation de tâche en tâche dans une zone et donc en minimisant les déplacements : rester dans une zone pour y exécuter les tâches de désassemblages et les précédences entre celles-ci et

n'en sortir que lorsque la navigation est bloquée (à cause d'une contrainte de précédence à réaliser hors zone).

La notion de précédence par contacts géométriques entre les pièces est abandonnée. Seules les opérations citées dans les procédures de désassemblage sont retenues. Les voisins d'une pièce à désassembler ne sont pas regardés, sauf si la tâche de désassemblage de la « pièce cible » le demande. Néanmoins, la notion de précédence entre des tâches de désassemblage est introduite (notion de tâche préparatoire à une tâche subséquente, d'actions et/ou manipulations de préparation : Jobs Set-Up).

Le caractère non destructif du désassemblage est posé comme dans les méthodes de la littérature. Dans notre cas, les tâches de désassemblage correspondent d'une certaine façon à l'inverse de tâches d'assemblage puisque l'issue de ce problème est la réutilisation des pièces (donc une pièce non désassemblable ne sera pas désassemblée). En effet, comme précisé précédemment, les pièces extraites doivent rester en état de fonctionnement pour leur remontage sur un autre avion.

La représentation du désassemblage par un graphe (arbre) est conservée avec la nuance suivante : les gammes de désassemblage réalisables ne constituent plus des sous-arbres d'un arbre général. Le graphe issu du modèle présenté dans les prochains chapitres n'est plus un arbre de choix, mais un graphe de tâches. Celui-ci contient toutes les tâches sollicitées pour le désassemblage d'une liste de pièces sur un avion. Le graphe est créé à partir de la nécessité de précédences entre tâches.

L'exigence des données nécessaires aux méthodes présentées (et celles ultérieurement établies sur ces modèles) n'est donc pas appropriée au problème ici présent. Les plans d'ensemble et modélisations du produit ne sont pas disponibles. L'établissement d'un graphe des liaisons global du produit n'est que partiellement approprié.

## 1.5 Approche ordonnancement, « clustering » et théorie des graphes

Nous constatons donc que la littérature relative au désassemblage correspond davantage à une littérature où les objets à désassembler se structurent en un graphe de liaisons connexe. Le cadre de désassemblage qui nous intéresse nous amène ici à rechercher une séquence d'opérations de démontage (une séquence de tâches de désassemblage) permettant aux opérateurs de se déplacer

d'un secteur d'activités à un autre en minimisant les déplacements. Il s'agit donc, d'une manière ou d'une autre, de regrouper des tâches (suivant des paramètres à définir) en respectant des contraintes (notamment les règles et usages permettant de certifier un démontage) tout en optimisant certains critères. Les domaines connexes à notre recherche sont donc l'assemblage, voire la classification non supervisée (« clustering ») dans un graphe de tâches.

D'un point de vue ordonnancement, en se référant au chapitre 2 du livre de Michael Pinedo et Xiuli Chao intitulé « Operations Scheduling in Manufacturing and Services » (Pinedo et Chao, 1999), un problème d'ordonnancement se caractérise avant tout par : les durées et contraintes de dates, la structure d'atelier, les contraintes sur les tâches, et les objectifs.

Une rapide observation des documents de maintenance à notre disposition montre que nous ne disposerons d'aucune durée dans les manuels. Au delà de cela, le temps n'est pas la grandeur qui nous intéresse dans notre étude. Le concept de vague retenu de la méthode de Srinivasan et Gadh nous amène à minimiser des déplacements entre des zones d'activités en se propageant d'une zone de travail à une autre, et non pas des durées. Il serait toujours possible de prendre des durées arbitraires. Mais si on se réfère aux critères, tous les critères d'ordonnancement sont basés sur la minimisation de durées (moyenne, maximum) ou d'attentes (nombre, attente maximum, attente moyenne). Finalement, la seule caractéristique que nous partageons avec l'ordonnancement est une structure de tâches (organisée en fonction des contraintes entre celles-ci) avec un ou des graphes sous-jacent(s). Au niveau des graphes de tâches pouvant être construit, la culture de gestion de projets se concentre essentiellement sur un axe : la minimisation de la durée d'un projet sous contraintes de ressources. Mais nous n'avons ici ni ressources ni durées. Comme précisé dans le manuel « Project Scheduling A Handbook Research » de Erik L. Demeulemeester et Willy S. Herroelen (Demeulemeester et Herroelen, 2002, chapitre 3) l'ordonnancement de projet peut s'établir à partir de trois paramètres  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$ . Ces paramètres traitent respectivement de l'environnement machine, de la tâche et de la ressource caractéristique et de critère de performance. Le problème actuel s'articule lui autour d'opérations de maintenance réalisées par des techniciens spécialisés et dictées par une liste de pièces à désassembler dépendant de l'état de l'avion et du modèle d'avion. Il n'existe pas de contraintes de ressources mais des contraintes entre des tâches devant être réalisées dans différentes zones de l'avion qui s'avère être un produit de grande taille et ne pouvant être déplacé. Des durées

d'exécution de tâche ne sont par ailleurs pas disponibles. Ainsi, ces recherches ne sont donc pas pertinentes et le problème ne peut être abordé sous cet angle de recherche. Finalement, en étudiant différents cas particuliers d'ordonnancement décrits dans les différents chapitres du livre « Operations Scheduling in Manufacturing and Services » de Pinedo et Chao nous constatons qu'aucun de ces cas particulier ne s'applique. Le chapitre 4 « Project Scheduling » traite de la planification de projet et n'est pas adapté au problème (voir ci-dessus). En effet, ceci s'oriente sur une gestion des machines supportrices d'activités dans laquelle le « makespan » doit être minimiser tout en respectant les contraintes ; avec l'emploi de différents graphes afin de supporter la méthode. Dans notre cas, il existe bel et bien des précédences entre tâches de désassemblage représentées par un graphe mais qui sont exécutées sur un avion et sans information sur des ressources ou durées (sans donnée temporelle disponible). Le chapitre 5 « Job Shop Scheduling », traite de l'ordonnancement d'activités par atelier. Le problème traite d'activités sur un avion donc hors d'un atelier possédant différentes machines et dans lequel un chemin prédéterminé ne peut être prévu du fait du caractère très variable des activités commandées en désassemblage (pour les pièces commandées sur un avion). Le chapitre 6 « Scheduling of Flexible Assembly Systems » traite de systèmes d'assemblage flexibles pour lesquels différents types de produits (en nombre limités) sont considérés et qu'un système est tenu de produire en quantités données. Dans le problème traité, les produits sont les différentes composantes rassemblées dans une liste de pièces à désassembler et c'est l'exécution des procédures de maintenance qui permet d'obtenir la quantité de composantes demandées et pouvant être importante. Une nouvelle fois des machines sont considérées, tout comme des temps de réalisation d'activités afin de prévoir des temps de démarrage de machines et autres en fonction de la chaîne d'activités. Le chapitre 7 « Lot Sizing and Scheduling » s'attarde sur l'ordonnancement de lots d'activités définis par un compromis entre coûts de réglage et de production de stocks, afin de fournir une séquence minimisant des temps et coûts de réglages. Le chapitre traite alors d'une situation différente du problème traité qui de surcroît ne possède pas les données nécessaires. Le chapitre 8 « Interval Scheduling, Reservation Systems, and Timetabling » traite typiquement d'un environnement de machines en parallèle possédant un nombre données d'activités à réaliser incluant inévitablement des temps de traitement (« processing time »). Le problème considère ici des activités de maintenance très variables sur un avion, demandant des expertises diverses avec des temps d'exécution dépendant de l'état de la

pièce à extraire, de l'avion, de la disponibilité du technicien à réaliser la tâche et que nous ne sommes pas en mesure de posséder. Le chapitre 9 « Workforce Scheduling » relate de l'allocation du personnel et de la création d'horaires de travail établis en fonction des activités opérées et de la demande de ressources. Dans notre cas le personnel opérant sur l'avion se résume aux techniciens. Dans la majorité des cas l'équipe de techniciens travaille sur un appareil à la fois et suit la progression du travail réalisé en extrayant les pièces demandées. Ce genre de problème n'est pas sujet à une allocation prévisible du personnel tout comme la création d'emploi du temps puisque la demande de pièces sur un avion est finie et doit être accomplie avant de commencer à opérer sur un autre appareil. Une fois les activités de désassemblage réalisées un tout autre plan d'action est à définir sur un autre avion en fonction de son état et de la commande de pièces réalisée sur celui-ci (l'environnement change tout comme la demande).

Finalement, le chapitre 3 du livre énonce que faute de structure particulière, il faut se ramener à un développement d'heuristique ou de métaheuristique dépendant de l'application.

Concernant le « clustering » dans les graphes, l'article de Schaeffer (Schaeffer, 2007) présente une synthèse intéressante des travaux existants. L'auteur définit clairement la notion de « cluster » dans un graphe et analyse la bibliographie, qu'il s'agisse de graphes orientés ou non orientés. Il est rapidement aperçu que toutes les méthodes de « clustering » dans un graphe orienté sont basées sur le regroupement de sommets avec de fortes interactions. D'une manière ou d'une autre, il s'agit de diagonaliser les matrices d'arcs, avec comme difficulté la taille des graphes. C'est une extension des recherches classiques de cliques, mais étendue à des sous-graphes non totalement connectés. Dans notre cas, les regroupements recherchés ne sont pas forcément des sommets adjacents, mais plutôt des sommets se faisant dans les mêmes secteurs (les tâches). De plus, une consultation d'un spécialiste en théorie des graphes, Mr Alain Hertz a été réalisée : le problème ne peut être résolu par une méthode existante en la matière.

Globalement, le problème traité ne semble pouvoir bénéficier ni des travaux spécifiques en ordonnancement, ni des travaux spécifiques en théorie des graphes. Nous sommes donc réduit à définir la structure exacte du problème par un graphe adapté et à développer, comme proposé par Pinedo et Chao (« General-Purpose Scheduling Procedures », chapitre 3) des heuristiques ou métaheuristiques permettant de résoudre un problème spécifique.

La revue de littérature aurait pu être abordée d'une façon tout à fait différente. Les opérations de désassemblage n'étant pas nécessairement corrélées et ordonnées, le problème pourrait s'envisager sous l'angle d'une réfection de bâtiment. Dans le cadre d'une telle activité, l'équipe de travail s'attèle à des tâches connexes et non connexes qui s'apparentent à divers corps de métier. Le but ultime est commun à toutes les activités propres à chaque corps de métier : remettre les choses en état. Le secret de la réussite repose sur l'organisation du travail et la coordination des activités (précérences) ; soit sur la validité du plan d'intervention. Bien que les opérations soient très différentes en réfection de bâtiment et en désassemblage de pièces réutilisables sur un avion en fin de vie, les deux problèmes sont analogues du point de vue de l'organisation des activités.

## CHAPITRE 2 LE DÉSASSEMBLAGE DE FIN DE VIE DANS LE DOMAINE AÉRONAUTIQUE

Le domaine aéronautique possède ses spécificités en matière de désassemblage et traitement en fin de vie des avions. Ces produits de grande taille requièrent une attention particulière en fin de vie à l'égard des législations en vigueur et des dommages subséquents pouvant être causés à l'environnement. Afin de situer le problème et de comprendre les enjeux du traitement en fin de vie des avions, l'objectif de ce chapitre est de définir le cadre de l'activité, les acteurs, les scénarios de fin de vie et plus particulièrement le désassemblage des pièces réutilisables. Le désassemblage des pièces ne peut être réalisé de façon anarchique et doit répondre à des critères opératoires garantissant la conservation de leur valeur économique sur le marché de la revente des pièces de seconde main.

### 2.1 Enjeux

Actuellement, on compte plus de 2000 avions entreposés (de tailles variables) dans les déserts à travers le monde (Source confidentielle) et plus encore si l'on comptabilise ceux laissés à l'abandon. La durée de vie utile d'un avion commercial avoisine les 25 ans (Howarth, 2012). D'après la compagnie française Airbus, près de 300 avions de plus de 100 places seront retirés annuellement du service dans les 15 prochaines années (PAMELA, 2008). La hausse des coûts de maintenance, de réparation et d'entretien général des aéronefs entraîne la retraite anticipée des appareils aériens. Le stockage d'avions dans le désert, leur abandon à proximité des aéroports, le cannibalisme des appareils pour la récupération de métaux à haute valeur marchande, le développement de marchés noirs de pièces, inquiètent et suscitent l'engagement des industriels. Les risques encourus par de telles pratiques sont de natures diverses : pollution des sols, présence de matières dangereuses dans les appareils laissés pour compte, démantèlement incontrôlé etc. De plus, l'émergence de législations entraîne des modifications techniques pouvant être coûteuses sur les appareils ; citons par exemple la loi relative à la lutte contre le bruit adoptée en Europe (Sénat français, 1992). Par ailleurs, la directive européenne 2000/53/CE pour les constructeurs automobiles à l'égard de la récupération et du recyclage des véhicules (« End-of-life Vehicle

Directive ») adoptée en 2000, responsabilise depuis maintenant une dizaine d'années les constructeurs automobiles européens (Parlement européen, 2000). Depuis 2003, la fin de vie des déchets électriques et électroniques est également légiférée en Europe par la directive 2002/96/CE (Parlement européen, 2003)

Les projets de loi émergent et s'affirment à l'égard de l'environnement et la possibilité de nouvelle(s) législation(s) à l'égard de la fin de vie des aéronefs n'est pas à exclure. C'est donc l'occasion pour les parties prenantes du domaine aéronautique de s'attarder sur le traitement en fin de vie des appareils désuets : pour des aspects environnementaux, économiques et prévoyant en matière de législation (comme présenté plus haut la gestion en fin de vie des produits devient préoccupante : des lois et règlements émergent).

La conjoncture actuelle, la prise de conscience globale et la découverte d'un nouveau marché potentiel (nouveau plan d'affaires pour certains) ouvrent la porte à de nouveaux défis pour les acteurs du domaine aéronautique.

## 2.2 Acteurs

Les acteurs de l'activité de traitement en fin de vie des avions s'articulent autour du(des) propriétaire(s) de l'avion et des décisions prises à l'égard de l'appareil lorsque celui-ci est jugé hors d'usage par rapport à sa fonction originelle (avions commerciaux, avions cargo, avions privés ou d'affaires). Suivant le scénario de fin de vie choisi par le propriétaire, différents acteurs viennent se greffer au processus.

Dans un premier temps, les acteurs sont regardés à l'échelle globale, quels sont ceux qui influencent les activités de fin de vie en aéronautique à l'échelle mondiale ? Puis, comment et pourquoi traiter un avion en fin de vie ?

À la suite de la présentation des principaux organismes et rassemblements mondiaux actant en fin de vie des appareils, les différents scénarios de fin de vie possibles sont exposés. Puisque l'objet du travail est d'étudier le désassemblage des pièces réutilisables et d'en présenter une méthode aidant à la planification de celui-ci, un focus est établi sur cette activité. Finalement, les données disponibles sur le terrain et sur lesquelles se base le problème, sont mises en avant et expliquées.

### **2.2.1 L’A.T.A : « Air Transport Association »**

L’organisation américaine « Air Transport Association (ATA) », autrement connue sous le nom de « Airlines for America (A4A) » est un rassemblement de compagnies aériennes fondé en 1936. Ces compagnies aériennes sont toutes états-uniennes, sauf « Air Canada » et « KLM ». L’objectif de l’organisation est de préconiser des modèles de sécurité, de service à la clientèle et de responsabilité environnementale aux compagnies aériennes membres, pour une économie et une compétitivité croissante de l’aviation aux États-Unis : « *Mission and Vision : Airlines for America (A4A) vigorously advocates for America’s airlines as models of safety, customer service and environmental responsibility; and as the indispensable network that drives our nation’s economy and global competitiveness* » (Airlines for America, 2012b) . Cette organisation mondiale de l’aviation commerciale est à l’initiative de la publication de normes à l’égard de l’ingénierie, la maintenance, la gestion du matériel et des opérations aériennes (ATA, 2012). Dans le cadre du problème posé, les spécifications ATA Spec. 100 et ATA Spec. 2100, aujourd’hui regroupées sous le terme de iSpec 2200 sont d’une grande utilité. L’iSpec 2200 regroupe les standards pour la maintenance aéronautique (« *Information Standards for Maintenance Information* »).

ATA iSpec 2200 est une norme « mondiale » visant le contenu, la structure et l'échange de documents électroniques pour la maintenance et l'entretien d'un appareil aérien. Elle se compose d'un ensemble de spécifications pour la structure des procédures de maintenance, de contrôle et de configuration d'un aéronef. La création de cette spécification résulte du souhait de minimiser les coûts encourus par les opérateurs et les fabricants pour la compréhension et la réalisation des documents techniques ; mais encore pour améliorer la qualité de l'information, la rapidité d'accès à l'information et la livraison des données (pour les besoins des compagnies aériennes). La norme précise la structure des manuels techniques, la numérotation du contenu et sa mise en forme.

La définition complète et anglaise de la norme est disponible en ligne (Airlines for America, 2012a).

Avant la création de cette spécification (tenue au cours de l’année 2000, après la création de la Spec. 100 et Spec 2100), la structure des manuels techniques était assez aléatoire et propre au constructeur de l’appareil. Les constructeurs d'aéronefs avaient leur propre système de désignation d’activités de maintenance (donc pas de standards) ce qui occasionnait des difficultés

d'utilisation des manuels (sans compter la venue de gros appareils avec les gros volumes de manuels techniques). Établir une « norme » à respecter par les constructeurs lors de la réalisation des manuels techniques destinés à l'utilisateur, permet d'en standardiser l'élaboration.

La numérotation de la norme ATA-2200 est spécifiée dans le paragraphe 2.4, partie relative aux documents techniques disponibles.

## **2.2.2 L'A.F.R.A. : « Aircraft Fleet Recycling Association » (Amérique du Nord, majoritairement)**

L'« Aircraft Fleet Recycling Association » (AFRA), créée en juin 2006, est une association internationale d'industriels soucieux de l'environnement dans leur pratique de désassemblage, démantèlement, recyclage et valorisation des avions et de leurs composantes en fin de vie. Les membres sont unis dans une mission commune, celle de la gestion durable des appareils, de leurs équipements et de leurs moteurs (AFRA, 2012a). C'est par cette union de partenaires que l'AFRA a pu rassembler, regrouper, promouvoir, mettre à jour et publier les expériences de « gestion durable » de l'activité des différents membres. Ce partage de méthodes et d'expérimentations en matière de gestion durable d'aéronefs a permis d'améliorer le traitement des avions en fin de vie et notamment par le biais de la création d'un guide de « bonnes pratiques » intitulé « *Best Management Practice for Management of Used Aircraft Parts and Assemblies* » (AFRA, 2009). Ce guide rassemble les façons d'agir jugées les plus « durables » en ce qui concerne la gestion des pièces sur un appareil en fin de vie. Le terme « durable » se rapporte à la gestion conjointe des sphères économique, environnementale et sociale du développement durable. Ainsi, l'AFRA cherche à établir un code de conduite, cherchant l'élaboration de règles, pour les pratiques et conceptions aéronautiques actuelles et futures.

L'organisation est internationale et rassemble des partenaires aux activités industrielles diverses. Ces activités traitent notamment du désassemblage et du démontage d'avions, de l'activité de négoces de pièces détachées, de recycleurs de matériaux, d'assureurs et autres (AFRA, 2012b). Pour être accréditée par l'AFRA, un audit de l'activité de la compagnie en matière de traitement d'aéronefs doit être réalisé. Si les pratiques répondent à la conduite préconisée par l'organisation, celle-ci peut se faire accréditer. Les membres de l'AFRA peuvent partager leurs connaissances en termes de gestion de flotte d'avions et utiliser le guide des bonnes pratiques.

Ce guide, comme son nom l'indique, indique la conduite estimée la plus responsable par un ensemble d'industriels œuvrant dans le domaine. Néanmoins, celui-ci n'a aucune valeur légale et personne n'est contraint d'en respecter les propositions avancées (mais vivement conseillées). Il s'agit davantage d'une prise de conscience globale, désireuse de changer les comportements ayant trait à la fin de vie des aéronefs et finalement d'instaurer une conscience environnementale.

### **2.2.3 P.A.M.E.L.A : « Process for Advanced Management of End-of-Life Aircraft » (Europe)**

Le projet de « Process for Advanced Management of End-of-Life Aircraft » (Projet PAMELA) est un projet européen à l'initiative d'Airbus pour une expertise en gestion des avions en fin de vie, incorporant les aspects environnementaux et économique du développement durable. Ce projet de plus de 3 millions d'euros, met en place une plate-forme dans la ville de Tarbes (Midi-Pyrénées, France), pour l'expérimentation de méthodes de désassemblage, de découpe et de recyclage d'appareils aériens (ENVIROPEA, 2012). L'objectif de la compagnie Airbus est de maximiser la récupération et la valorisation sur un avion en fin de vie (en termes de masse) et de minimiser l'impact des activités sur l'environnement. Le projet rassemble de nombreux partenaires industriels européens capables d'intervenir dans la chaîne d'activités du traitement en fin de vie. Les principaux résultats du projet PAMELA montrent que le recyclage des matériaux et le réemploi des composants s'élève à plus de 70 % de la masse d'un avion et qu'une valorisation accrue des matériaux peut atteindre 80-85% en masse (Source confidentielle). L'obtention des résultats résulte de l'étude de trois grandes étapes dans la fin de vie des avions : la sécurisation de l'appareil (extraction des matières dangereuses), le désassemblage de pièces et équipements et le démontage pour une valorisation des matériaux. Par les différents scénarios étudiés, le projet PAMELA établit de bonnes pratiques pour le traitement en fin de vie regroupées dans le « *Training Kit* » (Pamela, 2008). La définition des bonnes pratiques en déconstruction et recyclage permet une rétroaction sur la prise de décisions au cours de l'ensemble du cycle de vie du produit.

Par cette initiative, Airbus assure un engagement volontaire pour la gestion environnementale d'un avion sur l'ensemble de son cycle de vie, l'établissement de bonnes pratiques pour la fin de vie des avions et un partage d'expériences entre les industriels impliqués.

## **2.2.4 Autres réglementations**

Brièvement, deux autres réglementations sont à évoquer par rapport à l'activité de traitement en fin de vie des aéronefs.

Le Règlement PART-145 est un règlement publié au Journal Officiel de l'Union Européenne « *relatif au maintien de la navigabilité des aéronefs et des produits, pièces et équipements aéronautiques et relatif à l'agrément des organismes et des personnels participants à ces tâches* » (Commission européenne, 2003). En d'autres termes, il s'agit d'un règlement pour la maintenance et l'entretien d'aéronef. Le respect de ce règlement permet la délivrance de certificats pour les équipements aéronautiques réparés ou révisés. Il impose des règles techniques et des procédures administratives communes « *destinées à assurer le maintien de la navigabilité d'aéronefs, y compris tout élément à y installer* » (Commission européenne, 2003). Il est applicable pour les équipements (comprendre tout moteur, hélice, pièce ou équipement) enregistrés dans un état européen, « *enregistrés dans un pays tiers et utilisés par un exploitant dont l'Agence* » (Agence Européenne de la Sécurité Aérienne (EASA)) « *ou un Etat membre assure la supervision de l'exploitation* » (Commission européenne, 2003).

D'autre part, la norme ISO 14001:2004 est une norme produite par l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), à propos du management environnemental accompagné des exigences et lignes directrices pour son application. Être muni de cette norme (à la suite d'un audit) assure une crédibilité aux industriels par leur capacité à prouver que leurs actions et activités sont soucieuses de l'environnement. La détention de ISO 14001:2004 demande d'identifier et de maîtriser l'impact environnemental des activités industrielles, une amélioration continue des performances environnementales et la mise en place d'une approche systématique fiable munie d'objectifs et défis à l'égard de l'environnement (savoir les réaliser et apporter des preuves de leur réalisation) (ISO, 2012).

## 2.3 La fin de vie des avions

Une tendance à l'inaction dans le traitement en fin de vie des avions, des abandons dans les déserts, des entreposages à durée indéterminée, ou encore un broyage grossier des appareils avant enfouissement sont des pratiques rencontrées et exclues de la pensée gestion en fin de vie des appareils aériens recherchée aujourd'hui. La réutilisation des avions peut se réaliser pour un réemploi total ou partiel de celui-ci. La Figure 2.1 (réalisées à partir des lectures et expériences réalisées au cours de ce travail de mémoire) recense différentes issues de réutilisation en fin de vie d'un avion commercial.

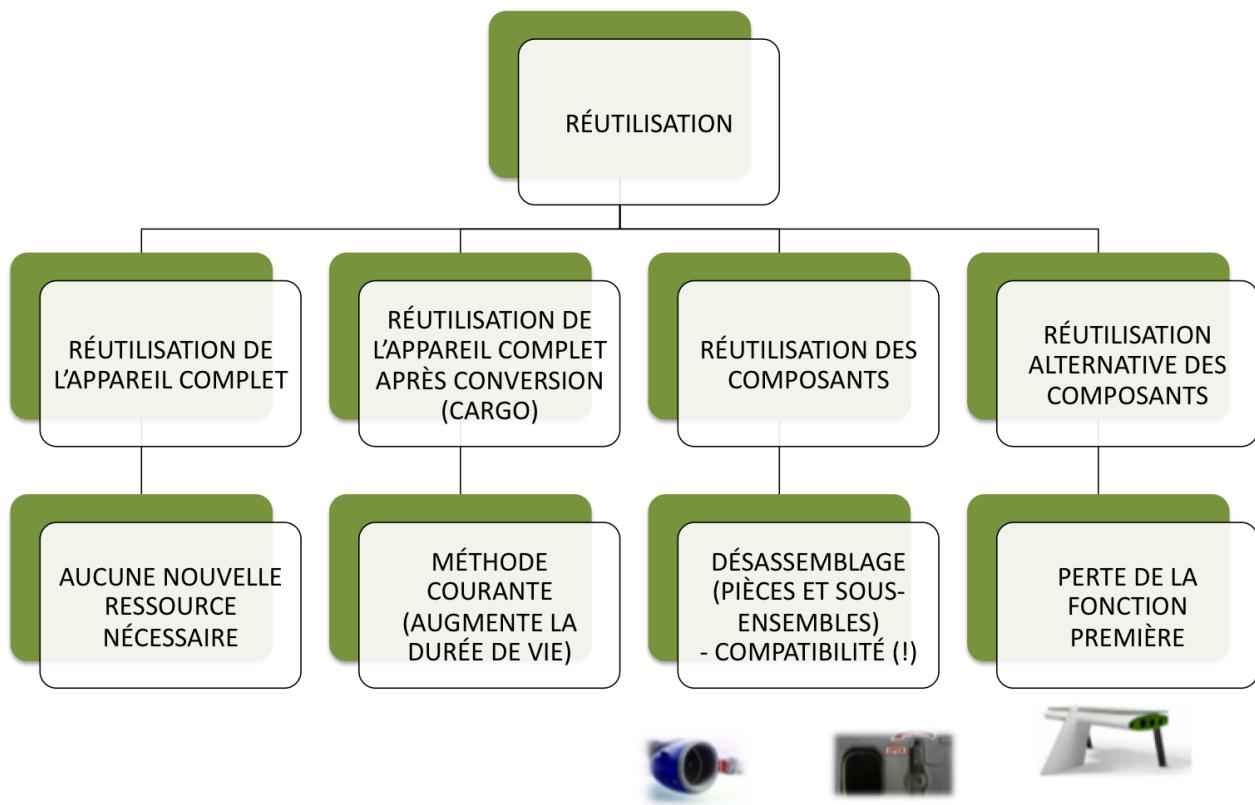


Figure 2-1 : Stratégies de réutilisation d'un avion commercial

La réutilisation d'un avion commercial peut passer par une revente en l'état ou une reconversion de celui-ci en avion de transport notamment pour augmenter sa durée de vie utile. Outre ces deux solutions, la réutilisation de l'appareil peut être partielle, en réutilisant ses pièces et composantes sur un autre appareil (conservation de la fonction première des composantes), ou encore pour d'autres applications de celles-ci (exemple : remanufacturing).

Sur l'Annexe 1, un organigramme des scénarios de fin de vie possibles incluant les activités d'entreposage, de désassemblage, de recertification, de négoce de pièces de seconde main et de recyclage est présenté.

Le propriétaire d'un avion commercial jugé désuet peut décider d'un entreposage de son appareil pour une durée définie ou non et accompagné ou non d'un service de maintenance. Le service de maintenance permet comme son nom l'indique de maintenir l'appareil dans les meilleures conditions techniques, pour envisager une revente subséquente par exemple. Après un entreposage (ou directement : bref entreposage), l'avion peut être revendu en l'état ou encore pour une reconversion ; revente suivant les cas, l'état de l'appareil, son nombre d'heures de vol, ou encore suivant son nombre de cycles (décollage-atterrissage). Si l'avion n'est pas revendu pour une nouvelle période d'activité dans les airs, celui-ci entame un processus de traitement en fin de vie. Le traitement en fin de vie d'un appareil peut prendre des années, suivant sa durée d'entreposage. Le démantèlement d'un appareil aérien doit se faire réalisé par une compagnie spécialisée en démantèlement et employant des techniciens appropriés (techniciens pour la fin de vie certifiés, c'est-à-dire formés pour le traitement en fin de vie et capable d'appliquer les précautions et mise en garde stipulées dans les manuels techniques des fabricants). Le démantèlement d'un aéronef possédant toutes ses composantes et ne pouvant être revendu peut lui aussi prendre plusieurs années. Le démantèlement « petit à petit » consiste à prélever des pièces et sous-assemblages capables d'être démontés et réadaptés sur un autre appareil (sans que le processus total de traitement en fin de vie soit entamé). À noter que dans la majorité de cas, les moteurs et leur nacelle ne restent pas longtemps sur un appareil mis au sol, du fait de leur haute valeur économique. Un appareil entreposé et disposé à un démantèlement imminent peut donc d'ores et déjà être démunie de certains sous-assemblages et pièces de structure.

Le processus complet de traitement en fin de vie d'un appareil rassemble trois grandes étapes ; étapes permettant de passer d'un aéronef complet ou quasi complet à des morceaux de matériaux découpés et broyés. La Figure 2-2 établie à partir de lectures, entrevues et expériences réalisées au cours de ce travail de mémoire résume le processus de traitement en fin de vie expliqué dans les paragraphes suivants.

Chronologiquement se succèdent la sécurisation de l'appareil, le désassemblage des pièces réutilisables, puis le broyage pour recyclage et valorisation des matériaux de la carcasse restante.

La sécurisation consiste à vider l'appareil de toutes les matières dangereuses présentes dans les réservoirs et dans tous les réseaux de l'avion. Les matières dangereuses sont majoritairement des huiles (exemple : fluide hydraulique Skydrol) et carburants. Des précautions connues des techniciens sont à prendre et les durées d'aération (variables) peuvent aller jusqu'à un mois (un mois pour les réservoirs de carburant). Une fois les matières dangereuses extraites de l'appareil (et récupérées par une compagnie spécialisée en traitement des matières dangereuses) et que celui-ci se trouve en aération, la phase de désassemblage peut être amorcée. À partir d'une liste de pièces commandées par une compagnie de négoce de pièces détachées pour le marché de seconde main, les techniciens peuvent entamer leur désassemblage. Le désassemblage de ces pièces ne peut pas être réalisé n'importe comment. En effet, la destinée de ces pièces peut dans le meilleur des cas (économiquement parlant pour l'entreprise de négoce) constituer une revente pour réutilisation sur un autre appareil (notion de compatibilité de pièces dans ce cas). Les procédures de retrait des pièces et sous-assemblages d'un avion (tout comme la procédure d'installation) sont précisées dans son manuel de maintenance (« Aircraft Maintenance Manual » (AMM)). D'après le manuel des bonnes pratiques de l'AFRA, (Article V.b)1), le retrait de composants doit suivre la procédure préconisée par le constructeur ou une autre procédure fournissant des précautions équivalentes à celles du fabricant. Pour que les éléments désassemblés puissent conserver leur valeur économique et la possibilité d'être réinstallés sur un autre appareil, leur désassemblage doit être opéré par des techniciens spécialisés et certifiés suivant les procédures dictées par les manuels techniques, notamment celui de maintenance (AMM). L'ensemble de l'activité de retrait des composants listés est dicté par une « Check List » fournie par le manuel des bonnes pratiques de l'AFRA. Une fois l'ensemble des pièces commandées extrait de l'appareil, la compagnie de négoce de pièces de seconde main peut les entrer dans sa base de données (inventaire de l'ensemble des composantes disponibles) et être en mesure de les revendre. Le service de recertification des pièces est nécessaire pour leur nouvelle installation sur un avion et peut être assuré par le vendeur (compagnie de négoce de pièces détachées) ou l'acheteur à la suite de la vente. Lorsque les bonnes pratiques pour la fin de vie d'un avion ne sont pas respectées, notamment lorsqu'une pièce est désassemblée par une méthode autre que celle précisée dans le manuel de maintenance, celle-ci ne peut être recertifiée et voit donc sa valeur économique chuter. L'issue de l'étape de désassemblage est donc la revente de pièces tirées d'appareils aériens sur le marché de seconde main.

Une fois toutes les pièces commandées pour retrait disponibles individuellement, l'activité de démantèlement peut commencer. L'issue du démantèlement est la valorisation et le recyclage des matériaux de la carcasse restante. Des recherches sont actuellement en cours pour exploiter au mieux cette étape de la fin de vie (recherches ayant été réalisées par le projet PAMELA, mais dont les résultats sont confidentiels). En effet, faut-il trier les matériaux présents dans la carcasse en adaptant la découpe à cet effet puis réaliser le broyage de l'appareil ? Il s'agit dans ce cas d'un tri des matériaux pré-broyage. Ou bien, faut-il découper et broyer l'appareil pour réaliser le tri des matériaux par la suite (tri post-broyage) ? Le défi de cette activité est de réaliser le meilleur tri qu'il soit des matériaux, alliages etc. pour tirer un maximum de profit de l'activité de recyclage. Plus le tri des matériaux est scrupuleux, plus il est possible d'associer le recyclage de ces matériaux (de haute qualité) à des retombées économiques conséquentes.

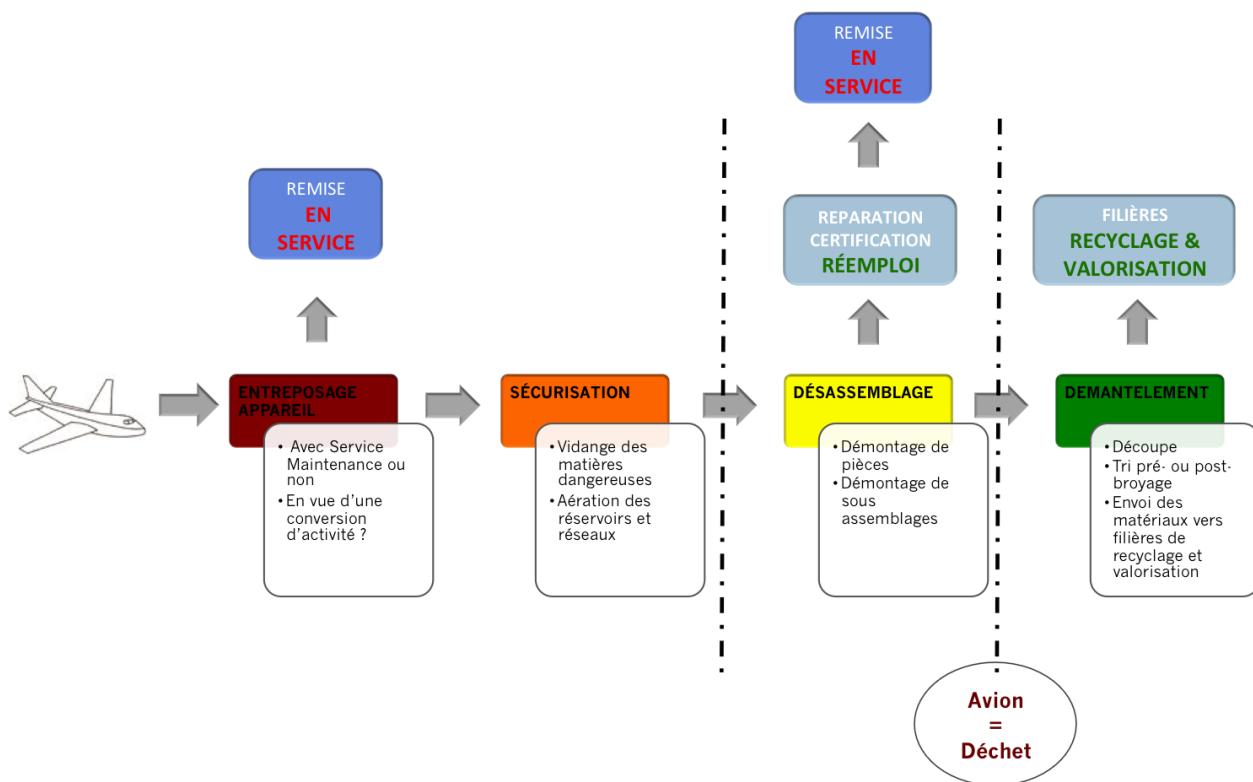


Figure 2-2 : Possibilités offertes par le traitement en fin de vie des avions

### **2.3.1 La phase de désassemblage de pièces réutilisables (Source confidentielle)**

Avant que le désassemblage d'un ensemble de pièces commandées ne soit réalisé, l'aire allouée au désassemblage doit être préparée en conséquences.

L'aire environnante de l'appareil doit être sécurisée et proche d'un lieu de stockage des pièces pour les activités d'identification, de marquage et d'emballage de celles-ci une fois complètement désassemblées. Le matériel requis pour la réception des matières dangereuses doit être maintenu à proximité de l'appareil, tout comme celui requis pour le stockage d'absorbant. À ce propos, de l'absorbant doit être disposé au sol dans des zones stratégiques et sujettes à des fuites occasionnelles de fluide pendant le désassemblage (par mesure de prévention et de sécurité).

Les opérations de retrait des composantes doivent suivre celles établies par les fabricants et stipulées dans les manuels techniques. Dans la plupart des cas, les câbles, tuyaux, gaines, supports, connecteurs, bagues de serrage etc. ne sont pas récupérés. Un nettoyage des composants peut être nécessaire avant leur stockage et activités subséquentes (précisées ci-dessus). Il est très important que chaque pièce soit clairement identifiée à partir de sa plaque signalétique, avec son numéro de composant ou numéro de série. L'identification est nécessaire pour le marquage des pièces, où une étiquette propre à la compagnie récupérant les pièces détachées doit être apposé. Cette étiquette de retrait précise le numéro de pièce, le numéro de série, sa description, le fabricant, la date de retrait et porte le nom de l'opérateur accompagné de sa signature. Une fois marquée, la pièce peut être emballée. Toutes les directives d'emballage, de marquage, de transport et de délivrance des pièces sont précisées dans le manuel des bonnes pratiques de l'AFRA ; tout comme les consignes pour le broyage suivant l'étape de désassemblage des pièces.

Avant l'étape de désassemblage, des tests sont à réaliser sur les moteurs (si ces derniers sont encore présents sur l'avion) et l'avion vidé de ses matières dangereuses. Le désassemblage de composants intervient dans les zones/domaines de l'appareil listés ci-dessous :

- Avionique / Électrique / Instruments de bord,
- Moteurs / APU (« Auxiliary Power Unit »),
- Cellule d'avion / Empennage / Ailes,
- Poste de pilotage / Cabine principale,

- Air Conditionné / Système de pressurisation,
- Protection contre l'incendie,
- Essence,
- Hydraulique,
- Systèmes à air,
- Système d'eau/ Déchets.

La composition de la liste de pièces récupérables commandées sur un aéronef en fin de vie, dépend entre autres des compagnies de négoce en pièces détachées de seconde main (plan d'affaire et fluctuations de l'offre et de la demande), de l'état de l'avion et du constructeur de l'appareil (récupération de pièces pour la réalisation de tests en vue d'amélioration(s) technique(s) par exemple).

## **2.4 Données disponibles pour le désassemblage de pièces réutilisables**

Comme déclaré dans le Chapitre 1, les plans d'ensemble, de coupes etc. ne sont pas disponibles pour les avions à traiter en fin de vie. Seuls les principaux manuels concernant la maintenance, l'entretien, la configuration de l'appareil, la mise en service, entre autres catalogues et addenda connexes peuvent être fournis. En effet, les manuels et leur addenda (Exemple d'addenda : Note de changement d'une composante au cours de la vie de l'appareil) constitue en quelque sorte le carnet de santé de l'appareil, avec toutes les manipulations techniques que celui-ci a subi au cours de sa vie utile.

Comme entrevu dans le paragraphe 2.2.1, les normes ATA 100 et ATA 2100, regroupées sous la norme ATA 2200, structurent les manuels techniques des constructeurs d'aéronefs, pour en faciliter l'utilisation.

La numérotation établie par la norme s'organise en plusieurs divisions. La première division rassemble les chapitres relatifs aux 5 groupes suivants :

Groupe 1 : Généralités sur les aéronefs (« Aircraft general »), Chapitre 1 à 19.

Groupe 2 : Circuit - cellule (« Airframe system »), Chapitre 20 à 49.

Groupe 3 : Structure (« Structure »), Chapitre 50 à 59.

Groupe 4 : Hélices/ Rotors (« Propeller/ Rotor »), Chapitre 60 à 69.

Groupe 5 : Groupe propulseur (« Power Plant »), Chapitre 70 à 89.

La division en groupes des manuels permet d'en réaliser une première partition. Le deuxième niveau de division structure chaque groupe par des numéros de chapitre (voir ci-dessus). Chaque chapitre traite d'un système de l'appareil et est fourni par un nombre à deux chiffres. Les systèmes (chapitres) se divisent en sous-systèmes et eux-mêmes en « sous-sous-systèmes ». Les sous-systèmes représentent les sections de chapitre et les « sous-sous-systèmes » une précision de la section de chapitre. Les sections sont désignées par un nombre à deux chiffres : les dizaines pour les sections et les unités pour les précisions de section. Enfin, les sujets viennent préciser les sections et sous-sections. De la même manière, les sujets sont identifiables par un numéro à deux chiffres.

Finalement, un sujet se repère dans une section de chapitre par un triplet de nombres grâce à la norme ATA-2200 (le standard de numérotation des systèmes). La Figure 2.3 permet d'illustrer ce standard de numérotation par un exemple.

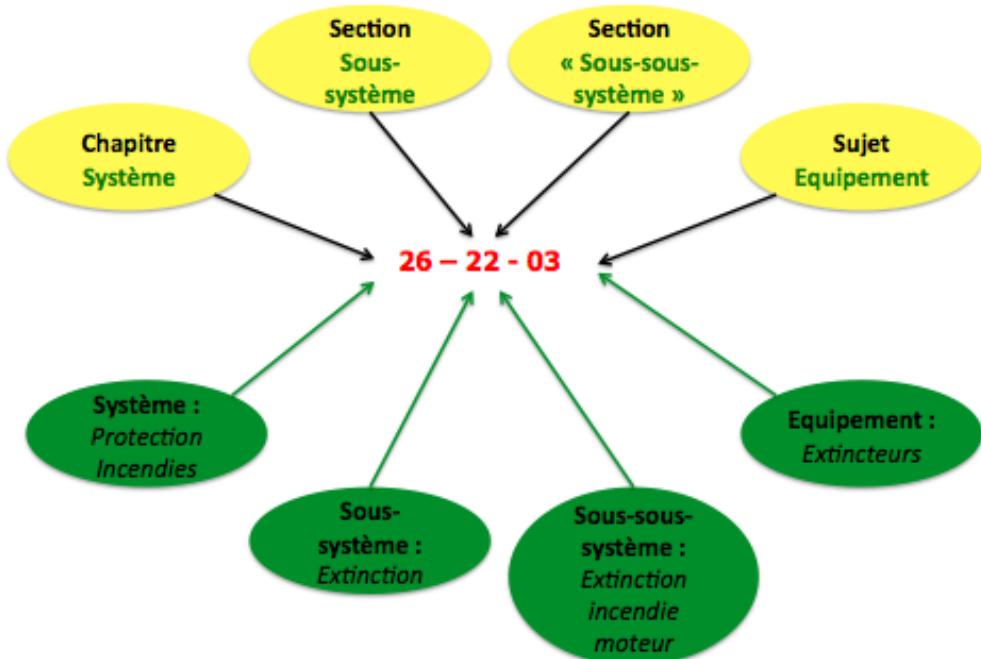


Figure 2-3 : Exemple de désignation d'un triplet (Norme ATA 2200).

Cette désignation par un triplet de nombres partitionne le manuel technique en Chapitre/Section/Sujet ou encore Système/Sous-système/Equipement. À noter qu'un « 00 » traduit une généralité, par exemple 26-00-00 relate de la protection contre les incendies en général.

La norme ATA-2200 organise également la pagination par sujet traité. Différentes activités peuvent être organisées autour d'un sujet et la pagination structure ces activités de la façon suivante :

Page 1 à 100	Description et fonctionnement (« Description and Operation »),
Page 101 à 200	Recherche de pannes,
Page 201 à 300	Pratiques de maintenance (« Maintenance Practises),
Page 301 à 400	Entretien courant (« Servicing »),
Page 401 à 500	Pose et dépose (« Removal/Installation »),
Page 501 à 600	Réglage et test (« Adjustement/Test »)
Page 601 à 700	Inspection (« Inspection »),
Page 701 à 800	Nettoyage et peinture (« Cleaning/Painting »),
Page 801 à 900	Réparation autorisées (« Repairs »).

La norme ATA-2200 s'applique aux manuels techniques d'un appareil aérien. Le manuel de maintenance, l'AMM (« Aircraft Maintenance Manual ») est considéré comme le manuel primaire et pouvant faire référence aux manuels de soutien suivants :

- S.R.M.: Structural Repair Manual,
- A.W.M.: Aircraft Wiring Manual,
- A.I.P.C.: Aircraft Illustrated Parts Catalogue,
- C.M.M.: Component Maintenance Manual,
- I.T.E.M.: Illustrated Tools and Equipment Manual.

Dans le cadre du problème posé le contenu du manuel de maintenance est sollicité pour les procédures de retrait des pièces à désassembler et donc les tâches de maintenance associées.

Le paragraphe suivant décrit la structure du manuel de maintenance, son organisation et son standard de numérotation fourni par la norme ATA 2200.

#### **2.4.1 A.M.M : « Aircraft Maintenance Manual »**

Le manuel de maintenance est conçu par le rédacteur technique du constructeur de l'aéronef. Il est composé de tâches de maintenance à propos des 89 chapitres (systèmes) énoncés plus haut. Une tâche de maintenance est une procédure complète pouvant être réalisée sur un aéronef. Chaque tâche est structurée par des sous-tâches et peut faire référence à d'autres tâches du manuel. Une sous-tâche est par définition une division de tâche, employée pour organiser et faciliter la compréhension de la procédure complète de maintenance. Elle traite généralement d'un seul type d'information, comme par exemple l'outillage, une table de références de tâches, une simple opération de procédure etc. Cinq sous-parties principales rassemblent des sous-tâches :

- « Reason for the Job »,
- « Job Set-up Information »,
- « Job Set-up »,
- « Procedure »,
- « Close-Out ».

Ces sous-parties ne sont pas nécessairement toutes présentes au sein d'une même tâche, qui peut suivant les applications en contenir une ou plusieurs d'entre elles. D'après l'AMM consulté, dans le cas où toutes ces sous-parties seraient évoquées leur ordre d'apparition est présenté sur la Figure 2-4. Les sous-parties usuelles citées ci-dessus, peuvent être accompagnées de notes de prévention du danger, d'informations sur l'outillage à utiliser si leur présence est jugée nécessaire dans une tâche. Les sous-parties doivent être satisfaites en suivant leur ordre d'apparition.

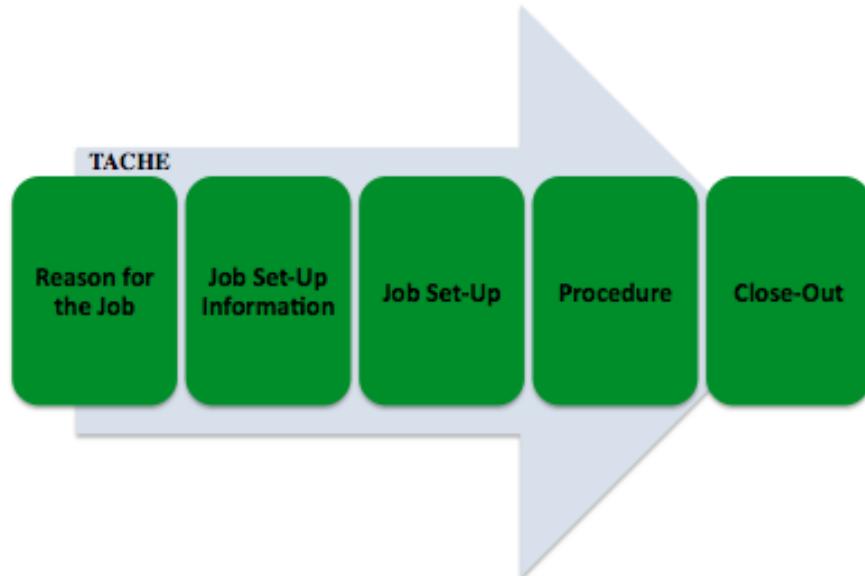


Figure 2-4 : Chronologie des sous-parties

Les sous-parties usuelles citées ci-dessus, peuvent être accompagnées de notes de prévention du danger, d'informations sur l'outillage à utiliser si leur présence est jugée nécessaire dans une tâche. Les sous-parties doivent être satisfaites en suivant leur ordre d'apparition.

Le standard de numérotation de la norme ATA-2200, qui fournit un triplet de nombres pour renseigner le Chapitre/Section/Sujet abordé, est accompagné par une numérotation pour la distinction des sous-tâches (éléments constitutifs des sous-parties). Ce système de numérotation est une extension de la norme ATA 2200, et porte le nom de « Aircraft Maintenance Task Oriented Support System » (AMTOSS). Le rôle de cette extension est d'améliorer l'organisation de l'AMM, en fournissant une identification numérique unique à chaque sous-tâche.

La numérotation s'établit comme présentée sur la Figure 2-5 (d'après l'AMM consulté pour ce mémoire et les précisions s'y trouvant à propos de l'ATA-2200 et du code AMTOSS). Le système AMTOSS s'occupe du quatrième et cinquième nombre du code, plus précisément des deux premiers numéros du quatrième nombre (le troisième et dernier pouvant être défini par le constructeur de l'aéronef).

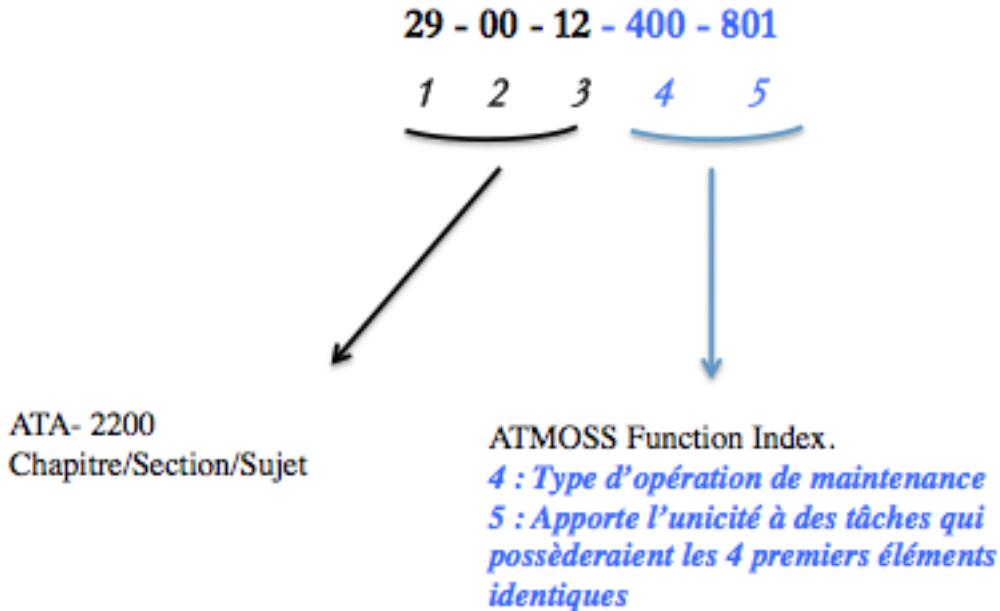


Figure 2-5 : Standard ATA 2200 et le code AMTOSS

Le premier chiffre (de la position 4), par exemple 000, informe du type d'opération de maintenance à réaliser parmi les choix suivants : Retrait (« Removal »), Nettoyage (« Cleaning »), Inspection (« Inspection/Checks »), Réparation (« Repair »), Installation (« Installation »), Manipulation de l'aéronef (« Material and Aircraft Handling »), Mise en Service (« Servicing/Preserving/Lubricating »), Tests (« Test »), Divers (« Miscellaneous ») et Remplacement (« Change »). Le second précise l'opération : par exemple « 010 » réfère au groupe « 000 » correspondant à une activité de retrait et le « 10 » vient préciser qu'il s'agit d'un retrait ou d'une ouverture pour créer un accès.

C'est ainsi que la norme ATA 2200 et son extension avec le système AMTOSS permettent de repérer chaque tâche de maintenance numériquement par un code. En se référant au standard de l'ATA-2200 et au code AMTOSS il est possible de « décoder » un numéro de tâche et d'en entrevoir les activités.

À noter qu'au sein des tâches de l'AMM, les manuels de soutien peuvent être appelés (« Aircraft Illustrated Parts Catalogue (AIPC) » par exemple pour une aide à la visualisation d'une pièce). Dans ce cas, ils sont appelés par leur acronyme accompagné du code ATA correspondant à la pièce, sous-assemblage, ou élément visé. De même, lorsqu'une tâche de l'AMM fait référence à

une autre tâche (tâche dite connexe), celle-ci est désignée par son code à 5 nombres tel que présenté ci-dessus.

Le Chapitre 4, traitant du modèle développé se basera sur l'identification numérique des tâches de maintenance de l'AMM évoquée dans ce paragraphe.

## CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre présente le cheminement de la recherche réalisée. La visée de cette recherche est d'être en mesure de répondre à la problématique suivante : comment aider à l'organisation du désassemblage de pièces réutilisables sur un aéronef en fin de vie, pour établir des stratégies d'intervention en désassemblage efficaces et sensées sur un appareil ? Cette problématique structure la méthodologie de recherche en passant par les étapes suivantes :

- recherche de données utilisables,
- analyse des modèles et méthodes développés dans la littérature et confrontation des méthodes avec les données disponibles,
- analyse de concepts existants (aspects de méthodes) applicables au problème traité et développement d'un nouveau modèle adapté aux besoins,
- validation et élaboration de stratégies d'utilisation du modèle et finalement l'établissement de développements subséquents capables d'être satisfaits au cours de recherches futures.

### 3.1 Données utilisables

Les données utilisables dans le cadre du problème posé doivent répondre aux besoins et être exploitables pour répondre à la problématique. Comme évoqué précédemment, des modélisations numériques de l'appareil et de ses sous-ensembles ne sont pas disponibles en fin de vie. Seuls les manuels techniques primaire et de soutien accompagnent l'appareil lorsque celui-ci entame un processus de traitement. Certes des manuels comme l'AIPC (« Aircraft Illustrated Parts catalogue ») fournissent des vues d'ensemble de l'avion (avec les dimensions générales), des vues en coupe et d'ensemble des principaux sous-assemblages (en version informatique « .pdf »). Il s'agirait d'utiliser l'ensemble des manuels techniques (A.M.M. : Aircraft Maintenance Manual, S.R.M.: Structural Repair Manual, A.W.M.: Aircraft Wiring Manual, A.I.P.C.: Aircraft Illustrated Parts Catalogue, C.M.M.: Component Maintenance Manual, I.T.E.M.: Illustrated Tools and Equipment Manual) pour pouvoir créer un graphe des liaisons complet d'un aéronef.

Or, comme il en a été discuté dans la synthèse de la revue de littérature, disposer d'un graphe des liaisons complet de l'appareil ne répond pas à notre besoin. En effet, ce graphe serait connexe, ce qui diverge du problème non connexe de récupération d'une liste aléatoire de pièces sur un avion en fin de vie. Il convient cependant de noter que les manuels de maintenance constituent la seule ressource de données réelles capable d'être exploitée ; et plus particulièrement le manuel primaire de maintenance et d'entretien, l'AMM. L'AMM rassemble toutes les procédures et interventions techniques pouvant être réalisées sur un avion : les tâches de maintenance. Les interventions techniques de retrait de pièces et de sous-ensembles font partie intégrante du manuel de maintenance et sont codées numériquement par le quintuple de nombres présenté dans le chapitre 2. Une tâche particulière de maintenance est donc reconnaissable par un nombre parmi la multitude de tâches rassemblées dans le manuel.

Les données disponibles capables d'être exploitées au sein du problème posé sont donc les tâches de maintenance et le standard de numérotation qui leur est associé (ATA-2200 et AMTOSS Index).

### **3.2 Concepts retenus des modèles développés antérieurement**

La synthèse de la revue de littérature réalisée dans le chapitre 1 (sous-partie 1.4) justifie le maintien ou l'abandon de concepts propres à une ou plusieurs méthodes. Le problème traité dans ce mémoire est un problème de désassemblage sélectif et non destructif à l'égard d'une liste de pièces dispersées sur un aéronef. Le but est d'établir un plan d'intervention (pour les opérations de retrait des pièces), qui respecte les procédures de retrait et satisfasse des objectifs d'efficacité propre à chaque situation (qui minimise les déplacements des techniciens par exemple) : un plan d'intervention efficace. Les approches existantes d'ordonnancement, de « clustering », et de théorie des graphes sont écartées puisque qu'aucune notion de temps n'est disponible. Néanmoins, les points communs entre le problème et ces méthodes sont une structure de tâches possédant des contraintes et l'emploi de graphes. La notion de précédence de retrait en raison de contacts géométriques est abandonnée. En effet, des précédences dans les opérations de désassemblage existent mais sont précisées par la tâche de maintenance sollicitée (et ses appels de tâches connexes s'il y a lieu). Il existe donc une notion de précédence mais qui s'établit entre différentes tâches sollicitées pour le désassemblage (il s'agit par exemple de dépressuriser un

système (tâche 1) avant de le démonter (tâche 2)). De plus, les contraintes de précédence existant entre les tâches suscitent une exécution globale des tâches étape par étape. Une mise à jour étape par étape du plan d'intervention est nécessaire concernant l'état de réalisation des tâches sollicitées par le désassemblage. Ces mises à jour rejoignent celles employées par la méthode de Jabbour *et al.* à l'égard des caractéristiques des composants au cours du procédé d'assemblage. Par ailleurs, puisqu'il existe des précédences entre les tâches, il existe donc une propagation des opérations de tâche en tâche. Cette propagation peut se visualiser comme le concept de la propagation par vague : sur une même onde 1 se trouvent les tâches capables d'être satisfaites du fait d'une absence de tâches préparatoires associées (tâche indépendante, se « satisfaisant à elle-même », pas de prédecesseurs ; appelée « feuille » en théorie des graphes), ou encore parce que les tâches préparatoires propres à chaque tâche de l'onde ont d'ores et déjà été réalisées (et qui se trouveraient dans ce cas sur une onde 0 précédent l'onde 1). La satisfaction de l'ensemble des tâches d'une même onde permet la propagation des opérations techniques à l'onde suivante (onde 2) supportant les tâches qui nécessitent la réalisation des tâches présentes sur les ondes précédentes (une ou plusieurs, suivant les cas). En fonctionnant de cette façon jusqu'à ce que l'ensemble des pièces commandées soit désolidarisé de l'appareil, une propagation d'opérations techniques de vague de tâches en vague de tâches peut être aperçue. Cependant, une nuance est à ne pas négliger, puisqu'un appareil aérien est un produit de grande envergure fournissant différentes zones de travail et faisant intervenir des opérations techniques dispersées et capables d'être réalisées en parallèle (d'un point de vue technique, en regard des tâches dictées), il convient de construire un graphe autour de la propagation de tâche en tâche. Il ne s'agit plus d'obtenir un graphe connexe qui soit un arbre de choix de procédure de désassemblage comme présenté dans la littérature, mais un graphe proposant des zones de travail réelles sur l'avion dans lesquelles viennent s'établir des tâches nécessaires au désassemblage. La contrainte et directive majeure du problème posé, est de minimiser les déplacements de la main d'œuvre. La notion de graphe est donc réutilisée sous la forme d'un graphe de précédences entre des tâches (sollicitées par le désassemblage d'une liste de pièces), sur lequel viennent se superposer des vagues établies par zone et où la satisfaction des tâches d'une vague dans une zone X peut libérer la réalisation de tâches présentes sur une autre vague dans une autre zone (exemple : agir sur les fusibles du cockpit avant de commencer à défaire les attachements d'une pièce de l'empennage). Le modèle des réseaux de Petri évoqué dans la littérature avance une pondération de l'arbre de choix pour

choisir le meilleur chemin de désassemblage. Dans notre cas, la meilleure organisation du désassemblage s'établit à partir d'un minimum de déplacements encourus et donc par un arbitrage du plan de travail établi en fonction : dans quelle zone intervenir ? À quel moment ? Sur quelles tâches ?

Ainsi, à travers les explications précédentes, les concepts de graphe, de précédences, de sélectivité, de caractère non destructif, de propagation par vagues et d'optimisation du chemin de désassemblage peuvent être repris sur certains principes et adaptés comme le précise le Tableau 3-1 de la page suivante.

Les concepts retenus à partir des modèles de la littérature sont ainsi posés et adaptés en conséquences pour le développement d'un nouveau modèle d'organisation des opérations de désassemblage de pièces réutilisables sur un avion en fin de vie.

Tableau 3-1 : Adaptation et conservation de concepts développés dans la littérature

<i>Concepts de la littérature</i>	<i>Adaptation pour le problème posé</i>
Arbre de choix de séquence de désassemblage	Graphe de tâches de désassemblage nécessaires à l'extraction d'une liste de pièces
Relations de précédences géométriques	Précédences entre la réalisation de tâches
Mise à jour des états du produit à l'égard des caractéristiques géométriques et fonctionnelles de ses composants étape par étape	Mise à jour de l'état de réalisation des tâches sollicitées par le plan d'intervention en désassemblage étape par étape.
Désassemblage sélectif	Conservé
Désassemblage non destructif	Conservé
Propagation par vagues, établie sur des précédences géométriques	Propagation par vagues établie sur des précédences de réalisation de tâches et sur la succession de zones visitées
Choix du chemin de désassemblage par pondération des arcs de l'arbre développé	Choix du chemin suivi entre des zones de travail en minimisant les déplacements (pondération)
Ordonnancement, « clustering », théorie des graphes	Conservation de la structure de tâches contraintes entre elles, et de graphes de représentation

### 3.3 Développement d'un modèle adapté

Le développement d'un modèle doit répondre à la problématique d'organisation du désassemblage et être conforme aux bonnes pratiques en matière de traitement en fin de vie des aéronefs. Le modèle est un modèle de désassemblage respectant les procédures de retrait de composants stipulées par les constructeurs et regroupées dans le manuel de maintenance qu'est l'AMM. Il doit s'établir sur les données disponibles et sur les adaptations des concepts cités dans le paragraphe précédent. Le modèle de désassemblage s'établit donc à partir de données réelles exploitables grâce aux standards de numérotation de tâches. À partir des données et de la liste de pièces à fournir, le modèle doit être capable d'ordonner le désassemblage en coordonnant la réalisation de tâches à opérer dans différentes zones de l'appareil pour extraire une liste de pièces. Une recherche des tâches sollicitées par le désassemblage d'une liste de pièces et leurs tâches connexes doit être réalisée : il s'agit alors d'une reconnaissance des tâches. Une fois les tâches reconnues, le modèle doit être capable de les agencer suivant leur état de connexion (tâches seules, tâches nécessitant des préparations et donc des tâches connexes) et finalement de créer un graphe de tâches. Un zonage des opérations est ensuite à associer au graphe de tâches créé permettant une visualisation dans l'espace du travail (dans les différentes zones de l'avion). Finalement lorsque le modèle a su déterminer, associer et localiser les opérations, il doit être en mesure de proposer un ou plusieurs plans d'intervention par zone de travail, en minimisant les déplacements et en assurant le bon déroulement des opérations ; ce qui implique la définition d'un arbitrage.

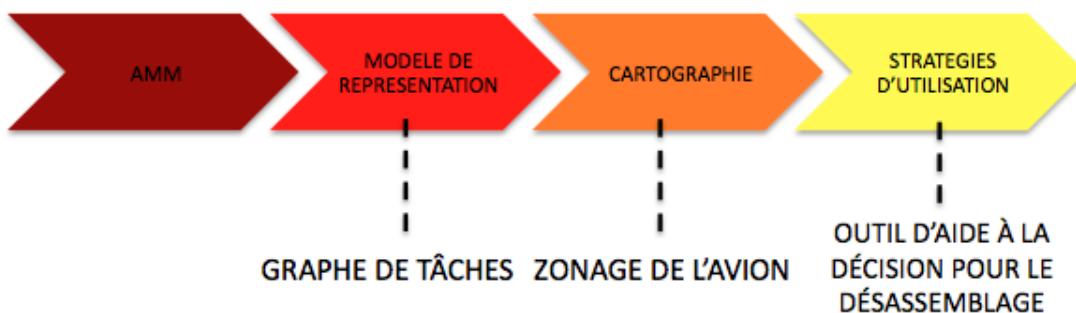


Figure 3-1 : Principales étapes de la méthode proposée

### **3.4 Validation du modèle**

Pour que le modèle puisse être qualifié de valide, celui-ci doit remplir des conditions d'utilité et de faisabilité auprès des personnes de terrain œuvrant dans le domaine du désassemblage aéronautique. Pour être valide, la disponibilité des données en entrée doit être vérifiée et les résultats en sortie être profitables à l'efficacité du désassemblage envisagé. Le désassemblage de pièces réutilisables, tel qu'aperçu aujourd'hui respecte les procédures de retrait stipulées dans le manuel de maintenance, mais celles-ci ne sont pas coordonnées. Les grandes étapes du désassemblage sont respectées, mais un travail collaboratif de désassemblage n'est lui que peu présent, entraînant de nombreuses allées et venues qui pourraient être évitées.

De plus, la validité du modèle passe par son expérimentation sur des cas réels se prêtant au problème posé. Il s'agit ici de prendre une liste de pièces récupérables sur un aéronef en fin de vie et de tester le modèle développé pour obtenir un ou plusieurs plans d'intervention des techniciens sur l'appareil (pour le retrait de ces pièces cibles) ; des « feuilles de mission » peuvent alors être créées. Les tests réalisés permettront de valider ou d'invalider le modèle à partir d'une analyse critique de son application.

### **3.5 Élaboration de stratégies d'utilisation du modèle**

L'originalité du modèle proposé repose sur une fouille des documents disponibles, à partir de laquelle des données réelles, exploitables sont repérées pour la génération de gammes et séquences de désassemblage d'équipements. En d'autres termes, le modèle est créé et défini à partir de la fouille de documents réalisée, pour ensuite supporter des stratégies d'utilisation.

Dans un premier temps, avant d'envisager de potentielles stratégies d'utilisation du modèle, il s'agit de s'attarder sur son automatisation.

Le modèle, développé et capable de répondre à la problématique posée, doit se créer automatiquement à partir de la lecture des données disponibles. Chacune des étapes nécessaires à l'élaboration d'un graphe de tâches se réalise pour servir de support à une stratégie d'intervention pour la récupération d'équipements.

L'automatisation de la réalisation du graphe de tâches doit être faite en fonction du type de données en entrée, qui sont des données réelles (disponibles) rassemblées dans le manuel de maintenance (AMM). Le manuel de maintenance est disponible sous format « pdf », il s'agit donc d'être capable de lire les fichiers « pdf » pour une reconnaissance des tâches de maintenance. En effet, lorsqu'une liste de pièces est commandée, il est facile d'en obtenir la numérotation ATA (de la norme ATA-2200) et la numérotation AMTOSS associées aux tâches. Le programme de génération automatique d'un graphe de tâches doit reconnaître les tâches sollicitées par la liste et leurs tâches connexes ; tout en étant capable d'en identifier les sous-tâches. Puisque l'organisation des tâches de l'AMM est standardisée, le développement d'un programme informatique pour la lecture de ces tâches est réalisable. Suivant le nombre de pièces à extraire, le temps de calcul pour la reconnaissance de toutes les tâches sera plus ou moins conséquent ; et la reconnaissance des tâches permet de générer au final le graphe de tâches.

Le repérage des zones d'intervention sollicitées par les tâches est requis pour l'élaboration de stratégies d'utilisation du modèle. En effet, un arbitrage est à définir pour assurer la condition de la minimisation des déplacements encourus pendant le désassemblage.

À partir de cette condition, différentes utilisations du modèle sont envisageables sur le terrain. L'exploitation du graphe de tâches avec un zonage des activités à réaliser sur l'avion permet d'identifier les opérations nécessitant des manipulations préliminaires (avec la finalité d'extraire un équipement), de les situer sur l'avion et d'entrevoir les opérations capables d'être réalisées subséquemment. Le travail de désassemblage peut alors être organisé, non pas dans une vision de plusieurs désassemblages individuels, mais avec une mission commune de désassemblage pour l'obtention d'une quantité d'équipements. En d'autres termes, les différentes stratégies d'utilisation du modèle concourent toutes vers la même finalité qui est d'organiser le travail d'une collection d'individus qui tous travaillent à la réalisation non pas d'un projet mais d'une multitude de projets interreliés. À titre d'exemple, lorsqu'une tâche est qualifiée de préliminaires à deux autres tâches, son exécution n'est pas doublée, elle est réalisée une seule fois et jugée réalisée par toutes les tâches le requérant par la suite.

À ce titre, une stratégie d'utilisation du modèle peut être pour un chef d'équipe de créer des fiches de mission (séquence d'opérations de désassemblage) pour chacun de ses techniciens ; en fonctionnant par étape pour effectuer des mises à jour du graphe de tâches (avec la suppression

des tâches réalisées) et établir des feuilles de route valides. L'avantage d'une distribution de feuilles de route, permet d'éviter un travail séquentiel plus long et réalisé au « compte-gouttes » (entrée dans une zone pour un retrait d'équipement, puis une nouvelle fois dans l'avancée du désassemblage etc. ; entraînant des déplacements qui peuvent être qualifiés d'inutiles). L'élaboration de feuilles de route étape par étape (feuilles de route journalières par exemple) à partir du modèle, a l'avantage d'établir celles-ci les unes en fonction des autres, pour un travail collaboratif entre opérateurs.

Les outils technologiques actuels, style tablette électronique, peuvent également s'avérer très utiles si par leur intermédiaire une interface « homme-machine » est créée. En imaginant que les tablettes constituent les feuilles de mission des techniciens, la mise à jour en temps réel des opérations réalisées peut être enregistrée sur le réseau commun aux tablettes utilisées. Ainsi, le corps technicien en charge des opérations peut être informé des activités réalisées à chaque instant. Les outils technologiques style tablettes permettent un travail collaboratif en temps réel, qui assurent l'efficacité du travail des opérateurs (imbrication de tâches pour un minimum de déplacements) en fonction de leurs disponibilités et champ d'actions techniques.

Finalement, l'automatisation du modèle peut être mise au profit du désassemblage des pièces réutilisables, en instaurant une organisation du travail des techniciens sur l'avion qui soit distribuée de manière collaborative. Le modèle est alors la base d'un outil d'aide à la décision pour le désassemblage capable d'être interfacé.

### **3.6 Ouvertures de recherche**

Un nouveau modèle de désassemblage de composants s'établissant à partir de données réelles, peut donner naissance à des ouvertures de recherches et améliorations. Ces recherches et améliorations peuvent porter sur le modèle en lui-même, sur son automatisation, ou encore sur les stratégies d'utilisation de celui-ci en tant qu'outil d'aide à la décision. La finalité du modèle étant principalement de fournir des propositions de plans d'intervention et une interface homme/machine entre autres développements. La richesse du modèle proposé réside dans la présentation de l'information, qui permet d'entrevoir le travail de manière globale pour le distribuer ensuite. La présentation de l'information pour une intelligence distribuée est un

élément moteur du travail. Ainsi, des recherches sur la manière d'associer ce modèle à une interface « homme-machine » qui privilégie la collaboration et les questionnements au sein d'une équipe de travail sont à explorer (recherches sur l'intelligence distribuée auprès des personnes concernées par le travail).

En effet, la finalité est d'obtenir une méthode de désassemblage des pièces réutilisables sur un aéronef en fin de vie à partir du modèle et de ses stratégies d'utilisation, pour que celle-ci soit applicable et mise à la disposition des techniciens spécialisés en la matière.

## CHAPITRE 4 MODÈLE POUR LE DÉSASSEMBLAGE DE PIÈCES RÉUTILISABLES SUR UN AVION EN FIN DE VIE

Ce chapitre traite du modèle développé pour répondre au problème posé de désassemblage d'avions en fin de vie. Les différentes sous-parties du chapitre 4 retracent le cheminement d'élaboration du modèle, son utilisation, ainsi que son application.

### **4.1 Schématisation explicative d'une tâche de l'AMM**

En règle générale, chaque tâche peut inclure une, plusieurs, ou l'ensemble des sous-parties suivantes (chronologiquement) : Le *Job Set-Up Information*, le *Job Set-Up*, la *Procedure* et le *Close Out*. Ce sont ces sous-parties qui caractérisent et structurent une tâche extraite du manuel. Chaque sous-partie possède un rôle spécifique, qui justifie sa présence ou non dans une tâche.

Le contenu des sous-parties reste le même quelque soit la tâche sollicitée. Certaines tâches vont nécessiter la présence de sous-parties ou non, dépendamment de l'activité à réaliser pour l'accomplissement de la tâche. Il convient de préciser le rôle et/ou le contenu des sous-parties pour comprendre la nécessité de leur présence potentielle.

- Le *Job Set-Up Information (JSUI)* apporte la référence et la désignation de tâches appelées dans la tâche regardée (dites tâches connexes). À noter que la rédaction d'un *Job Set-Up Information* est obligatoire s'il est nécessaire d'accomplir des tâches (de l'AMM) au travers des autres paragraphes que sont le *Job Set-Up*, la *Procedure* ou encore le *Close Out*.
- La sous-partie de *Job Set-Up (JSU)* précise les différentes actions à accomplir en amont de procédure (sous-partie *Procedure*). Ces actions peuvent être par exemple la mise en place de panneaux de signalisation d'opérations en cours et/ou un danger potentiel durant leur accomplissement (ex : Signalisation d'intervention sur un système hydraulique), une demande de « marquage » et/ou dés-enclenchement de fusibles ou finalement les différentes tâches à accomplir en amont de la procédure de la tâche regardée (tâches renseignées préalablement dans le *Job Set-Up Information*).

- La sous-partie *Procedure (P)* de la tâche fournit les directives précises en matière de désassemblage de la pièce, soit une séquence d'opérations élémentaires ou non élémentaires à réaliser (manipulations, opérations techniques etc.). Celle-ci peut faire appel à des tâches connexes à travers son cheminement (renseignées dans le *Job Set-Up Information*), qui doivent être réalisées et satisfaites à la demande dans la *Procedure*.
- Finalement, le *Close Out (CO)* intervient dans une tâche lorsqu'un « démarquage » et/ou ré-enclenchement de fusibles est stipulé, ou encore lorsque des opérations de finalisation de procédure sont nécessaires. Le cas échéant, il est possible de rencontrer des appels de tâches (renseignées dans le *Job Set-Up Information*), qui doivent à nouveau être satisfaites.

La Figure 4-1 permet de visualiser le contenu des sous-tâches et leur agencement.

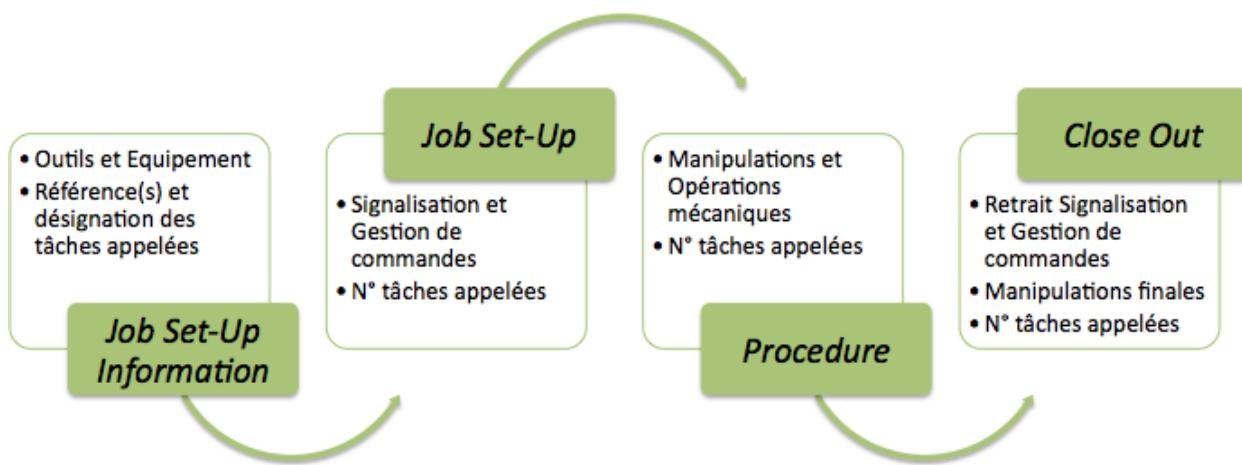


Figure 4-1 : Contenu et agencement des sous-parties d'une tâche

## 4.2 Définition du problème et du modèle par les mathématiques

Le modèle répond à l'élaboration d'un plan d'intervention sur un avion pour la récupération d'équipements et/ou pour l'exercice de manipulations sur celui-ci. Le plan d'intervention repose sur des étapes de réalisation de tâches et sous-tâches sollicitées par l'intervention. Dans cette

partie, les outils nécessaires à la mise en place d'un plan d'intervention sont présentés tout comme l'usage qui peut en être en fait.

L'Annexe 3 permet d'illustrer les définitions fournies dans ce chapitre à partir de données extraites du manuel de maintenance (AMM).

#### **4.2.1 Tâche, sous-partie et sous-tâche**

- Tâche

Une tâche est un ensemble de sous-parties, généralement au nombre de 4, à savoir : *Job Set-Up Information (JSUI)*, *Job Set-Up (JSU)*, *Procedure (P)* et *Close Out (CO)*.

Chacune de ces sous-parties est elle-même constituée d'un ensemble ordonné de sous-tâches. Chaque sous-tâche peut contenir des informations textuelles décrivant le travail concret à réaliser et/ou faire appel à la réalisation d'autres tâches qui doivent précéder la réalisation de cette sous-tâche. Une tâche  $t_i$  est une séquence totalement ordonnée de  $m$  sous-tâches, décomposable en 4 intervalles disjoints et consécutifs, les ensembles de sous-tâches (constitutif de la tâche) :  $(JSUI)_i$ ,  $(JSU)_i$ ,  $(P)_i$  et  $(CO)_i$  (les sous-parties de la tâche) .

Puisque les sous-tâches sont ordonnées au sein d'une tâche, leur désignation repose sur l'indexation du terme  $t_i$  comme le présente le paragraphe ci-dessous.

Notation utilisée pour une tâche  $i$  :

Pour  $i$  et  $m \in N$  :

- $t_i = \text{« La tâche } i \text{ »}$
- $(JSUI)_i = \text{« Job Set-Up Information de la tâche } i \text{ »} = \text{Ensemble ordonné de sous-tâches du JSUI de } t_i$
- $(JSU)_i = \text{« Job Set-Up de la tâche } i \text{ »} = \text{Ensemble ordonné de sous-tâches du JSU de } t_i$
- $(P)_i = \text{« Procedure de la tâche } i \text{ »} = \text{Ensemble ordonné de sous-tâches de la P de } t_i$
- $(CO)_i = \text{« Close Out de la tâche } i \text{ »} = \text{Ensemble ordonné de sous-tâches du CO de } t_i$
- $t_{ij} = \text{« } j^{\text{ième}} \text{ sous-tâche de la tâche } i \text{ »}$
- $t_i = (t_{ij})_{1 \leq j \leq m} = \text{la tâche } t_i \text{ est l'ensemble ordonné des sous-tâches } t_{ij}$

La Figure 4-2 présente la schématisation développée d'une tâche fictive et de ses sous-parties (cette figure reflète la composition d'une tâche mais qui n'a pas été obtenue à partir d'une tâche de l'AMM à des fins de confidentialité). Les sous-tâches doivent être exécutées chronologiquement.

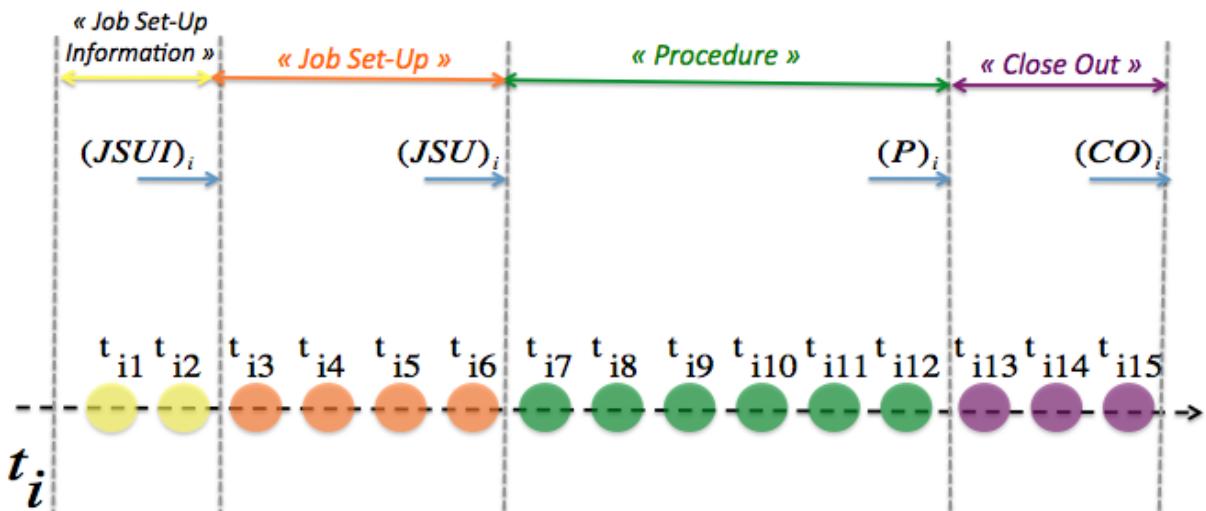


Figure 4-2 : Schématisation développée d'une tâche et de ses sous-parties

De plus, à chaque tâche  $t_i$  est associée la zone de réalisation de la tâche, notée  $z_i$ . La zone  $z_i$  donne la localisation des activités, ou encore une « catégorie de métiers » (ex : Hydraulique, Électrique et électronique etc.) à laquelle appartiennent les sous-tâches. L'association d'une zone à chaque tâche est effectuée à partir des données disponibles, c'est-à-dire par le biais de la numérotation spécifique des tâches de l'AMM. Cette numérotation renseigne suivant les cas la zone dans laquelle la tâche doit être réalisée, ou encore la catégorie de métier à laquelle appartient la tâche (de laquelle se déduit une ou plusieurs zones d'actions). Dans le modèle développé, l'hypothèse souvent vérifiée qu'une tâche appartenne toutes ses sous-tâches à une même zone ou catégorie de métier est effectuée. La localisation des opérations est établie sur les tâches et non sur les sous-tâches. Il est évident que dans certains cas le modèle devra être développé plus finement au niveau de la localisation de certaines sous-tâches. Néanmoins l'hypothèse considérée représente l'essentiel des activités.

- Sous-parties

Les 4 sous-parties principales évoquées se composent d'un nombre de sous-tâches variable qui leur est propre. Une tâche dite « complète » (comprenant les 4 sous-parties principales) les présente toujours dans le même ordre : les sous-parties sont ordonnées.

L'ordre est le suivant : *Job Set-Up Information*, *Job Set-Up*, *Procedure* et *Close Out*. Lorsqu'une ou plusieurs de ces sous-parties se trouve(nt) manquante(s), l'ordre est inchangé et il est juste fait abstraction des sous-parties manquantes dans l'ordre défini.

Soit une sous-partie quelconque d'une tâche  $i$ , appelons celle-ci  $(X)_i$ . La sous-partie  $(X)_i$  se compose d'un nombre fini de sous-tâches  $t_{ij}$ . La comptabilisation des sous-tâches associées à la sous-partie  $(X)_i$  s'arrête lorsque la sous-partie suivante commence. De cette façon, chaque sous-partie contient un nombre fini et borné de sous-tâches, qui se traduit par les relations suivantes :

$$\text{JSUI}_i = \{t_{ij} / j \in [0, n_1]\}$$

$$\text{JSU}_i = \{t_{ij} / j \in ]n_1, n_2]\}$$

$$(P)_i = \{t_{ij} / j \in ]n_2, n_3]\}$$

$$(CO)_i = \{t_{ij} / j \in ]n_3, n_4]\}$$

Avec  $n_1 \leq n_2 \leq n_3 \leq n_4$  entiers naturels.

La lecture de l'ensemble  $(JSUI)_i$  tel qu'écrit ci-dessus est la suivante : « L'ensemble  $(JSUI)_i$  (le *Job Set-Up Information* de la tâche  $i$ ) est composé de l'ensemble des sous-tâches  $t_{ij}$  (sous-tâches relatives à la tâche  $t_i$ ), tel que  $j$  appartient à l'intervalle d'entiers naturels fermé borné  $[0, n_1]$  et tel que  $n_1$  soit égal au  $j^{\text{ième}}$  terme de la dernière sous-tâche  $t_{ij}$  rencontrée dans la sous-partie  $(JSUI)_i$ .

La lecture des trois autres ensembles  $(JSU)_i$ ,  $(P)_i$  et  $(CO)_i$ , réalise de façon similaire, avec la nuance que les bornes propres aux sous-parties changent. La Figure 4-3 (page suivante) reprend l'exemple précédent de schématisation développée d'une tâche fictive avec l'ajout des bornes  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$ ,  $n_4$  pour la définition des ensembles  $(JSUI)_i$ ,  $(JSU)_i$ ,  $(P)_i$  et  $(CO)_i$ .

- Contenu d'une sous-tâche

Les sous-tâches sont les éléments constitutifs des sous-parties. Elles incluent le travail effectif pour réaliser la sous-tâche (opérations mécaniques, manipulations etc.). De plus, des appels de tâches peuvent prendre part à la sous-tâche, ces tâches doivent être préalablement exécutées pour « passer » la sous-tâche. L'ensemble des tâches appelées au sein d'une sous-tâche est un ensemble non ordonné de tâches.

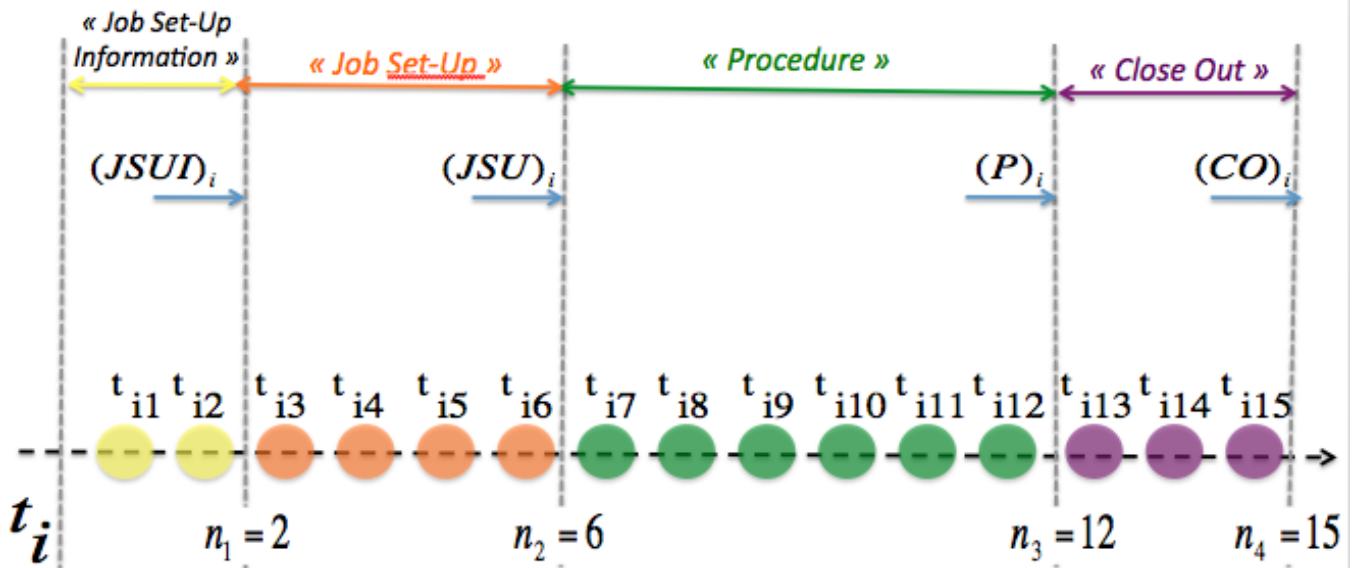


Figure 4-3 : Schématisation développée d'une tâche et de ses sous-parties bornées

Deux nouvelles entités sont créées : l'ensemble des tâches appelées au sein d'une sous-tâche et l'ensemble des tâches appelées au sein d'une sous-partie (par le biais de ses sous-tâches constitutives). Les notations utilisées sont les suivantes :

- $T = \{t_i\}$
- $ct_{ij} \subset T = \text{Ensemble des tâches appelées au sein de la sous-tâche } t_{ij}$

D'où pour une tâche  $t_i$  :

- $JSUI_i = \bigcup_{j=0}^{n_i} ct_{ij} = \text{Ensemble non ordonné des tâches appelées au cours de toutes les sous-tâches de } (JSUI)_i$

- $\text{JSU}_i = \bigcup_{j \geq n_1}^{n_2} ct_{ij}$  = Ensemble non ordonné des tâches appelées au cours de toutes les sous-tâches de  $(\text{JSU})_i$
- $P_i = \bigcup_{j \geq n_2}^{n_3} ct_{ij}$  = Ensemble non ordonné des tâches appelées au cours de toutes les sous-tâches de  $(P)_i$
- $\text{CO}_i = \bigcup_{j \geq n_3}^{n_4} ct_{ij}$  = Ensemble non ordonné des tâches appelées au cours de toutes les sous-tâches de  $(\text{CO})_i$

Une même tâche peut être élément de  $(\text{JSUI})_i$ ,  $(\text{JSU})_i$ ,  $(P)_i$  et/ou encore de  $(\text{CO})_i$ . C'est à dire que leur désignation peut se retrouver au sein des différentes sous-parties. Par exemple, une tâche détectée dans la sous-partie  $(\text{JSUI})_i$  sera détectée dans une autre sous-partie de la tâche puisque le *Job Set-Up Information* possède ce caractère informatif sur les réalisations de tâches connexes (tandis que les autres demanderont l'exécution de la tâche appelée pour poursuivre).

*Remarque :* Une des limites du modèle est qu'il n'intègre aucune notion de durée, puisque qu'aucune notion de durée n'apparaît dans les documents existants. Seuls le nombre de sous-tâches d'une tâche et le nombre de tâches connexes appelées par celles-ci peuvent être détectés et comptabilisés. L'ampleur des opérations élémentaires décrites textuellement au sein des sous-tâches ne peut être détectée, comptabilisée, ou encore « pesée ». Prenons par exemple une tâche A possédant 5 sous-tâches et une autre tâche B possédant 3 sous-tâches. Il pourrait être avancé que la tâche A prend davantage de temps de réalisation que la tâche B du fait d'un nombre supérieur de sous-tâches. Or, les sous-tâches peuvent contenir du texte et la tâche B peut par exemple présenter au sein de ses 3 sous-tâches beaucoup plus de texte (donc un mode opératoire plus long) que n'en possède les sous-tâches de la tâche A. Dans ce cas, B présente des sous-tâches plus lourdes de réalisation.

Considérons un ensemble de X tâches  $t_i$ . L'ensemble des tâches appelées par chacune des sous-parties des X tâches, peut être précisé par 4 nouveaux ensembles. Ces ensembles sont établis pour rassembler la totalité des tâches appelées par les sous-parties. C'est à dire que pour les X tâches étudiées, les tâches appelées par les éléments de  $(\text{JSUI})_i$ ,  $(\text{JSU})_i$ ,  $(P)_i$  et  $(\text{CO})_i$ , sont rassemblées. En d'autres termes, pour  $1 \leq i \leq X$ , il s'agit de l'union des ensembles  $\text{JSUI}_i$ ,  $\text{JSU}_i$ ,  $P_i$  et  $\text{CO}_i$ .

Notation utilisée :

$$\text{- JSUI} = \{t_\alpha / \exists i \neq \alpha, t_\alpha \in \text{JSUI}_i\}$$

$$\text{- JSU} = \{t_\beta / \exists i \neq \beta, t_\beta \in \text{JSU}_i\}$$

$$\text{- P} = \{t_\gamma / \exists i \neq \gamma, t_\gamma \in \text{P}_i\}$$

$$\text{- CO} = \{t_\delta / \exists i \neq \delta, t_\delta \in \text{CO}_i\}$$

Si une tâche est élément de plusieurs JSU (indexé par leur numéro de tâche), elle n'apparaît qu'une seule fois dans l'ensemble JSU. Il en va de même pour les autres ensembles JSUI, P et CO.

D'autre part, une tâche peut être appelée par deux tâches distinctes et au cours de sous-parties différentes. Par exemple, en étant élément du *Job Set-Up* de l'une et élément de la *Procedure* de l'autre. Dans un tel cas, la tâche apparaît dans les 2 ensembles JSU et P.

Rappelons qu'une zone  $z_i$  est associée à chaque tâche  $t_i$  et que par définition toutes les sous-tâches sont exécutées dans cette même zone. Une tâche  $t_j$  appelée par une sous-tâche de  $t_i$  possède elle aussi une zone  $z_j$  qui lui est par définition associée. Les zones  $z_i$  et  $z_j$  peuvent être identiques ou non.

- Illustration par un exemple

La Figure 4-4 (page suivante) reprend l'illustration de la tâche  $t_i$  de la Figure 4-3 qui présente cette fois-ci 11 appels de tâches par les sous-tâches de la tâche ; sous-tâches éléments de  $(\text{JSUI})_i$ ,  $(\text{JSU})_i$ ,  $(\text{P})_i$  et  $(\text{CO})_i$ .

*Remarque :* Dans le désassemblage aéronautique, la sous-partie *Job Set-Up Information* semble ne jamais réaliser d'appel de tâche à travers ses sous-tâches (ceci allant à l'encontre du caractère informatif de cette sous-partie).

Soit la tâche  $t_i$ .

Les 11 appels de tâches sont réalisés au cours de 7 sous-tâches.

Sur la Figure 4-4 les sous-parties  $(JSUI)_i$ ,  $(JSU)_i$ ,  $(P)_i$  et  $(CO)_i$  sont composées respectivement de 2, 4, 6 et 3 sous-tâches, pour un total de 15 sous-tâches. Chaque sous-partie fait appel à 0, 3, 7 et 1 tâches, respectivement.

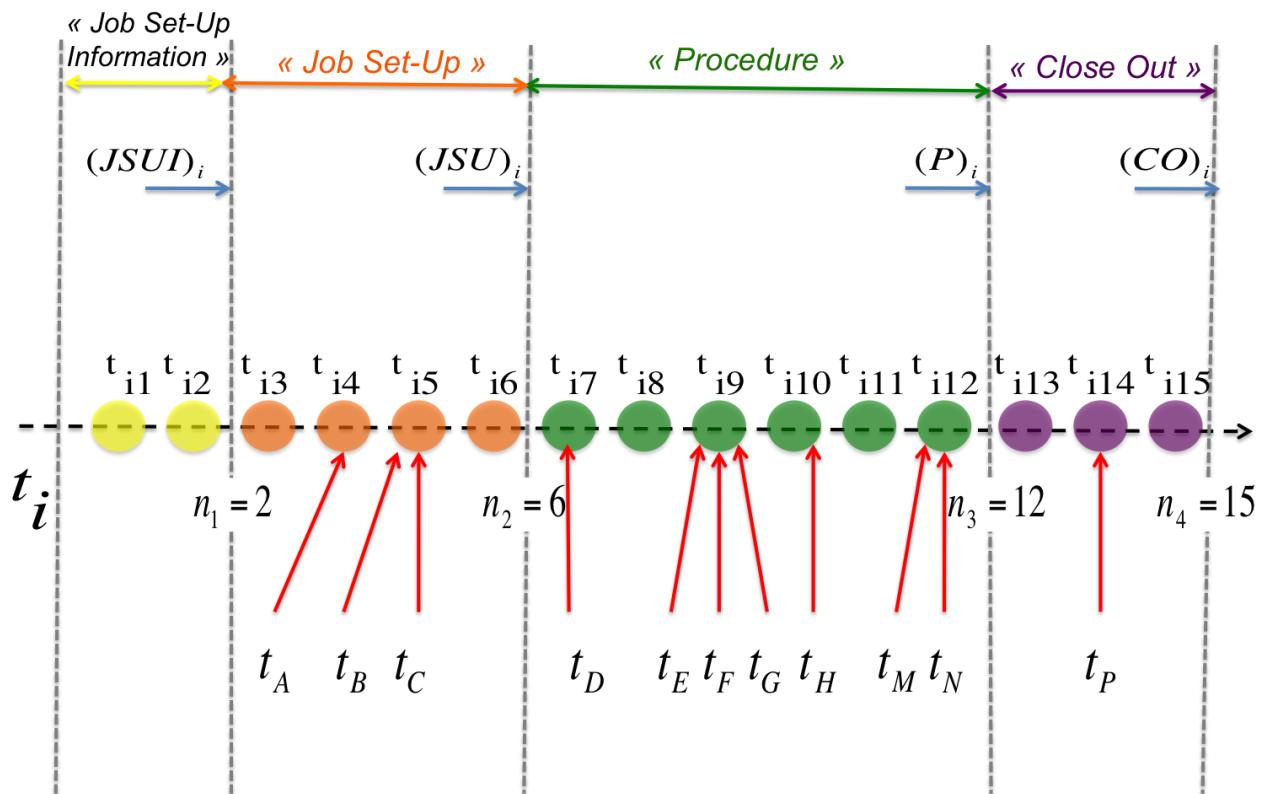


Figure 4-4 : Schématisation développée d'une tâche avec appels de tâches connexes

Le contenu des ensembles définis dans les paragraphes précédents est le suivant :

- $(JSUI)_i = (t_{i1}, t_{i2}) \quad n_1=2$
- $(JSU)_i = (t_{i3}, t_{i4}, t_{i5}, t_{i6}) \quad n_2=6$
- $(P)_i = (t_{i7}, t_{i8}, t_{i9}, t_{i10}, t_{i11}, t_{i12}) \quad n_3=12$
- $(CO)_i = (t_{i13}, t_{i14}, t_{i15}) \quad n_4=15$

- $ct_{i4} = \{t_A\}$ ,  $ct_{i5} = \{t_B, t_C\}$ ,  $ct_{i7} = \{t_D\}$ ,  $ct_{i9} = \{t_E, t_F, t_G\}$ ,  $ct_{i10} = \{t_H\}$ ,  $ct_{i12} = \{t_M, t_N\}$ ,  
 $ct_{i14} = \{t_P\}$ ,
- $JSUI_i = \{\emptyset\}$
- $JSU_i = \{t_A, t_B, t_C\}$
- $P_i = \{t_D, t_E, t_F, t_G, t_H, t_M, t_N\}$
- $CO_i = \{t_P\}$

Puisque seule la tâche  $t_i$  est considérée :

- $JSUI = JSUI_i = \{\emptyset\}$
- $JSU = JSU_i = \{t_A, t_B, t_C\}$
- $P = P_i = \{t_D, t_E, t_F, t_G, t_H, t_M, t_N\}$
- $CO = CO_i = \{t_P\}$

#### 4.2.2 Graphe de tâches développées ( $G_{td}$ ).

*Définition :*

Le graphe de tâches développées  $G_{td}$  se compose de l'ensemble des tâches considérées, y compris des tâches appelées par celles-ci s'il y a lieu. Il est obtenu par la schématisation développée de toutes les tâches sollicitées. La Figure 4-5 présente un exemple de  $G_{td}$ .

Dans cet exemple, la tâche  $t_i$  possède 5 tâches appelées, 2 appartenant à  $JSU_i$ , 2 appartenant à  $P_i$  et 1 appartenant à  $CO_i$ . Ces 5 tâches sont représentées sous leur forme développée, précisant le nombre de sous-tâches de chaque sous-partie. La tâche  $t_b$  appelée par  $t_i$ , appelle elle-même  $t_1$ , qui pour ne pas alourdir le schéma est représentée plus succinctement, alors que celle-ci devrait être représentée au même titre que les autres tâches dans un tel graphe  $G_{td}$ .

Dans l'exemple, la tâche  $t_i$  est capable d'être débutée. Les 2 premières sous-tâches peuvent être réalisées, puis l'atteinte de la troisième sous-tâche demande la réalisation de la tâche  $t_a$  pour passer à la sous-tâche suivante. Le même cas de figure se présente pour le passage de la

quatrième à la cinquième sous-tâche, avec cette fois-ci la réalisation de la tâche  $t_b$  (nécessitant la réalisation de la tâche  $t_1$  en amont).

#### 4.2.3 Graphe sans cycle de tâches compactes ( $G_{tc}$ )

*Définition :*

Le graphe orienté de tâches compactes  $G_{tc}$  se compose de nœuds et d'arcs. Les nœuds représentent les tâches et les arcs les liens entre tâches (les appels de tâches). Les nœuds s'accompagnent de deux nombres relatifs aux sous-tâches.

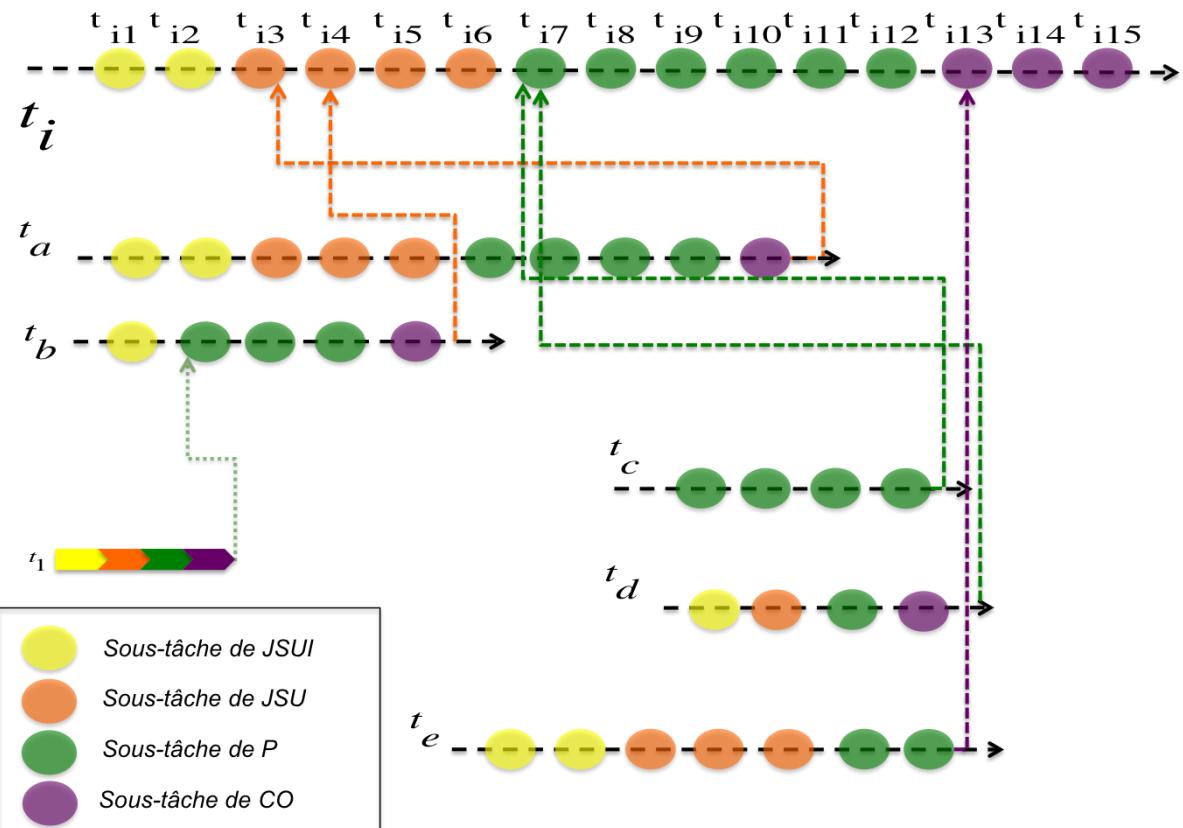


Figure 4-5 : Exemple de graphe de tâches développées  $G_{td}$

- $G = (T, A)$  avec  $T = \{t_i\}$  et  $A = \{(i, j)\}$  avec  $i$  et  $j$  entiers naturels
- $\exists (i, j)$  si et seulement si  $t_i \in (JSU)_j \cup (P)_j \cup (CO)_j \Leftrightarrow t_i$  est connexe à  $t_j$
- $m_{i,j} : \text{Label de l'arc } (i, j) \text{ correspondant au numéro de la sous-tâche de } t_j \text{ réalisant l'appel de la tâche } t_i$
- $a_i : \text{État de la tâche } t_i \text{ correspondant au nombre de sous-tâches finies à la date courante}$
- $n_4^i : \text{Nombre total de sous-tâches de la tâche } t_i$

L'état  $a_i$  et le nombre de sous-tâches  $n_4^i$  sont rassemblés dans chaque sommet du graphe  $G_{tc}$ . L'état informe de l'avancée du travail dans une tâche relativement à ses sous-tâches en donnant le numéro de la dernière sous-tâche réalisée. Le nombre  $n_4^i$  correspond lui au nombre total de sous-tâches de  $t_i$ . L'état  $a_i$  d'un nœud est toujours inférieur au label minimum des arcs entrants.

Les arcs traduisent une relation entre deux tâches. Un arc existe entre deux tâches si et seulement si la tâche à l'extrémité origine de l'arc est appelée par une des sous-tâches de l'autre tâche (à l'extrémité finale de l'arc). Le numéro de la sous-tâche réalisant cet appel doit être associé à l'arc :  $m_{i,j}$ . Si une tâche B est appelée par la 4<sup>ème</sup> sous-tâche d'une tâche A, alors l'arc unissant les tâches porte la valeur 4 :  $m_{B,A}=4$ .

#### *Propriétés et définitions :*

La **marge d'un nœud**, ( $M_i$ ), du graphe  $G_{tc}$  est la différence entre la valeur de l'arc minimum entrant et l'état  $a_i$  du nœud. En d'autres termes, la marge d'un nœud (d'une tâche) est la différence entre ce qui le bloque le plus rapidement et son état courant. La marge d'un nœud diminuée de 1 correspond au nombre de sous-tâches réalisables. Une tâche non commencée possède un état courant égale à 0.

La marge d'un nœud est toujours supérieure ou égale à 1. Une tâche est **bloquée** lorsque la marge du nœud associée est égale à 1.

Suivant l'utilisation faite de la marge, celle-ci peut être considérée en absolue ou non et donc la différence  $[\min(m_{i,j}) - a_j]$  divisée par le nombre total de sous-tâches de la tâche  $t_i$  soit  $n_4^i$ .

La **criticité d'un nœud** ( $Cr_i$ ) est le maximum pris sur tous les chemins de la somme des différences entre le nombre de sous-tâches d'un nœud et la marge associée pour les nœuds du chemin, soit :

$$Cr(nœud i) = \max_{tous\ les\ chemins} (\sum_{chemin} n_j^j - M_j) \text{ pour } j \text{ nœud du chemin issu du nœud } i.$$

La criticité d'un nœud peut être perçue comme le chemin critique issu d'un nœud jusqu'à l'atteinte d'une des feuilles du graphe, donc le plus « long » chemin. En d'autres termes, il s'agit de ce qui « attend d'être exécuté » derrière le nœud.

La Figure 4-6 donne un exemple de graphe  $G_{tc}$ . Dans cet exemple, 15 tâches sont à réaliser pour exécuter les 5 tâches ne possédant aucun successeur (sommets orange du graphe de la Figure 4-6), les tâches 8, 15, 17, 18 et 19, dites tâches terminales ou encore feuilles du graphe. Dans cet exemple fictif, aucune tâche n'a été débutée puisque tous les «  $a_i$  » sont à zéro. Le Tableau 4-1 fournit la marge et la criticité de 5 nœuds du graphe de la Figure 4-6.

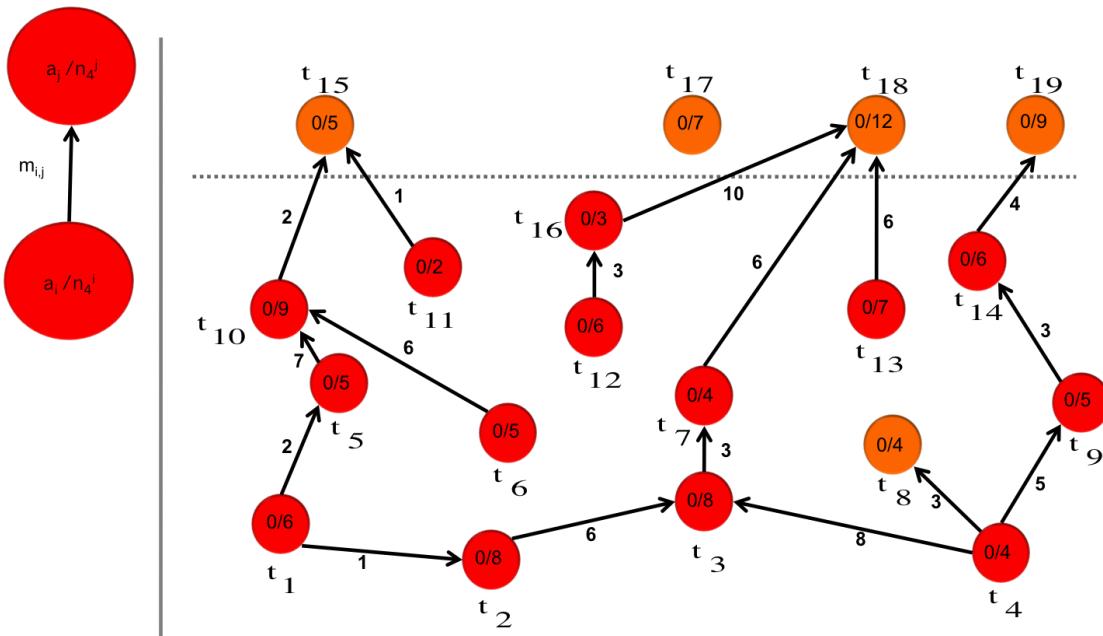


Figure 4-6 : Exemple d'arbre orienté de tâches compactes  $G_{tc}$ .

Tableau 4-1 : Informations fournies par le graphe  $G_{tc}$ 

Nœud	Marge	Criticité
$t_1$	-	$7+2+1+6=16$
$t_7$	$M_7=3-0=3$	6
$t_3$	$\text{Min}(6,8)=6 ; M_3= 6-0=6$	$1+6=7$
$t_{15}$	$\text{Min}(1,2)=1; M_{15}= 1-0=1$	0
$t_{18}$	$\text{Min}(6,6,10)=6;M_{18}= 6-0=6$	0

À partir du Tableau 4-1, il est avancé que 4 tâches peuvent être débutées : la tâche 1 ne possède aucun prédécesseur et les tâches 7, 3 et 18 possèdent une marge supérieure à 1. La tâche 15 est bloquée.

*Remarque :* La Figure 4-7 est reprise sur la page suivante en attribuant une couleur à chaque sommet du graphe, correspondant aux  $z_i$  associées aux tâches. Puisque le  $z_i$  correspond à la zone de réalisation d'une tâche, il est possible de distinguer 5 zones de travail dans cet exemple fictif. À noter qu'une tâche appelée par une autre tâche ne présente pas forcément la même zone de travail.

#### 4.2.4 Activabilité d'une tâche

L'activabilité d'une tâche se définit comme la capacité d'une tâche à être activée. Dans le graphe  $G_{tc}$ , les nœuds représentent les tâches. Ainsi, une tâche est **activable** si et seulement son nœud ne possède aucun prédécesseur ou d'arc entrant de label égal à 1.

Lorsqu'il n'existe aucun prédécesseur, la tâche est dite **indépendante** et ses sous-tâches sont vues comme des opérations élémentaires. L'activabilité peut être partielle ou totale. Lorsqu'un nombre de sous-tâches est réalisable avant l'atteinte d'une sous-tâche bloquante (dont le numéro

est porté par l'arc entrant de label minimum), l'activabilité est partielle. L'activabilité est totale lorsque qu'il n'existe aucun prédécesseur.

Une tâche bloquée signifie bloquée par un ou plusieurs de ces prédécesseurs. La réalisation de toutes les tâches bloquantes permet de débloquer une tâche.

*Remarque :* Le caractère activable des tâches peut être étendu aux sous-tâches. Dans ce cas, une sous-tâche est activable si son numéro d'apparition dans la tâche (« j ») est strictement supérieur à l'arc minimum entrant.

Le plan d'intervention repose sur une succession d'étapes où des tâches et sous-tâches sont réalisées. Une tâche activable n'est pas nécessairement réalisable. L'activabilité des tâches ne dicte pas le plan d'intervention à mettre en œuvre. Lors d'une étape du plan d'intervention, tout ce qui est activable ne sera pas forcément réalisé. La marge d'un nœud renseigne le nombre de sous-tâches réalisables avant d'être bloqué ou non. Le caractère activable des tâches est présenté à l'utilisateur, qui effectue ensuite ses choix de réalisation.

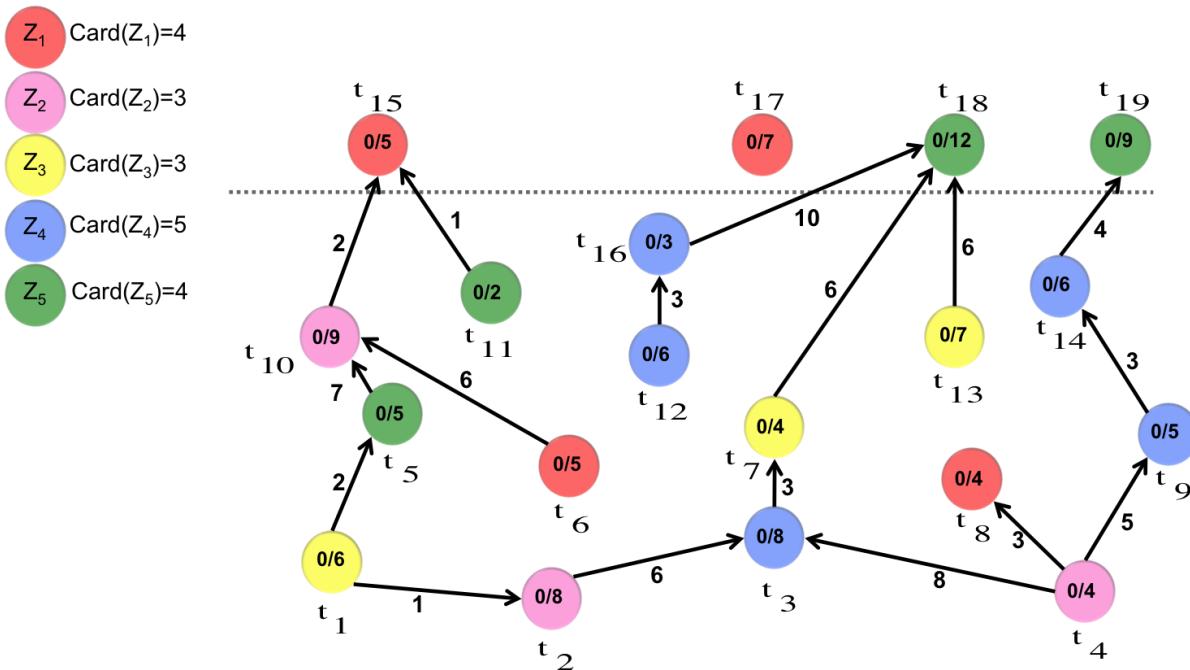


Figure 4-7 : Exemple d'arbre orienté de tâches compactes  $G_{tc}$

Le passage d'une étape du plan d'intervention à une autre doit se retrouver sur le graphe  $G_{tc}$ . À chaque étape le graphe doit être mis à jour :

- Les tâches réalisées disparaissent du graphe  $G_{tc}$  (les nœuds et sommets associés disparaissent).
- Les couples  $a_i / n_4^i$  des tâches sont automatiquement mis à jour en raison de la disparition de prédécesseur(s).

*Remarque :* La valeur des arcs est inchangée au cours des étapes et ne disparaît que lorsque l'arc associé disparaît.

#### **- Ensemble de tâches réalisables**

Le nombre d'étapes d'un plan d'intervention dépend du travail à réaliser, du nombre de tâches, de leurs relations et des choix de l'utilisateur de la méthode.

Puisque le plan d'intervention représente un passage d'étape en étape par le biais de réalisation de sous-tâches et/ou de réalisation de tâches complètes, l'ensemble des tâches réalisables doit varier en fonction (à chaque étape). En d'autres termes, l'ensemble de tâches réalisables doit suivre les mises à jour du graphe  $G_{tc}$ .

L'ensemble des tâches réalisables ( $R$ ) à une étape du plan d'intervention est défini de la façon suivante :

$$R_{\text{étape}} = \{t_i / \text{tel que } \Delta_{\text{entrant}}(t_i) = 0\}$$

Cet ensemble rassemble toutes les tâches n'ayant aucun prédécesseur, représentées par des sommets isolés et de degré nul.

L'évocation de ces propriétés a pour but d'aider l'utilisateur de la méthode dans l'élaboration de son plan d'intervention et de lui permettre l'usage d'outils. Dans l'optique de lui fournir d'avantage d'informations pour la planification des opérations deux autres indices sont avancés. Il s'agit d'indices d'urgence d'activation sur le court terme et sur le long terme, reposant tout deux sur le graphe de tâches  $G_{tc}$ . Le court terme regarde l'influence de la réalisation d'une tâche sur ses successeurs (notion « d'instantanéité »), tandis que le long terme regarde son influence sur le sous-graphe issu de la tâche (notion de « volume » par la criticité).

Ces indices sont suggérés à l'utilisateur, qui décidera de les utiliser ou non suivant ses objectifs et méthodes de planifications.

### - Indice d'urgence sur le court terme

L'indice d'urgence de réalisation sur le court terme (ICT), reflète à quel point la réalisation d'une tâche est urgente pour celle qui lui succède. Cette urgence se quantifie en prenant l'inverse de la marge du nœud visé. Plus la valeur de l'indice est proche de 1, plus la réalisation de la tâche est urgente.

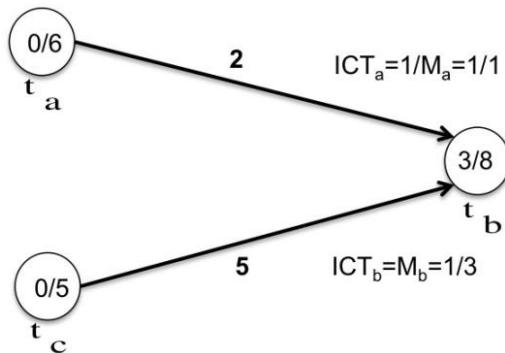


Figure 4-8 : Exemple d'urgence sur le court terme

Sur la Figure 4-8 un exemple d'urgence de réalisation de tâche sur le court terme est présenté. La question est de déterminer laquelle des tâches A et C il est préférable d'exécuter en premier. Sur cet exemple trivial, la réponse est la tâche A, puisque son ICT est égale à 1. Néanmoins, dans le cas où de nombreuses tâches précèderaient la tâche B, il serait aisément d'ordonner la réalisation des tâches précédant la tâche B.

*Remarque :* Si plusieurs tâches possèdent un ICT identique, elles sont jugées par le modèle aussi urgente l'une que l'autre et c'est à l'utilisateur de la méthode d'émettre ses préférences.

### - Indice d'urgence sur le long terme

L'indice d'urgence de réalisation à plus long terme permet d'attribuer un « volume » au travail restant à la suite de l'activation d'une tâche. Cette vision considère le sous graphe engendré par la réalisation d'une tâche dans le graphe sans cycle de tâches compactes  $G_{tc}$ . Ce qui correspond par

définition à la criticité d'un nœud ( $Cr_i$ ) comme défini plus haut. La comparaison des criticités permet d'entrevoir un volume de travail sous-jacent et les chemins critiques associés aux nœuds. Rappelons qu'il est impossible de « peser » une tâche avec le modèle et que la comptabilisation des sous-tâches associées aux chemins critiques des sous-graphes est l'indicateur du travail subséquent à réaliser à la suite de l'activation d'une tâche.

Une nouvelle fois, le choix de l'usage de cet indice appartient à l'utilisateur qui jugera son utilisation adaptée ou non au problème posé.

#### 4.2.5 Bilan des définitions du modèle.

- Définitions des tâches:
  - Une tâche est dite **connexe** à une autre tâche lorsqu'elle est appelée au sein d'une ou plusieurs sous-tâches de cette dernière. Dans le graphe  $G_{tc}$  les tâches connexes se trouvent à l'extrémité origine d'un arc.
  - Une tâche est dite **terminale** lorsqu'elle procure par son exécution un équipement ou une action désirée par le cahier d'intervention sur un avion. Dans le graphe  $G_{tc}$ , il s'agit des nœuds n'ayant aucun successeur (les feuilles du graphe). Par exemple, si 3 équipements sont à extraire d'un avion, les 3 tâches relatives au retrait de ces équipements constituent les tâches terminales du problème.
  - Une tâche est dite **indépendante** lorsqu'elle se satisfait à elle-même et ne demande aucune opération autre que celles dictées par ses sous-tâches ; aucun appel de tâches n'est possible pour une tâche indépendante. Dans le graphe  $G_{tc}$ , il s'agit des nœuds ne possédant aucun prédécesseur.
  - Une tâche est dite **activable** si et seulement son nœud ne possède aucun prédécesseur ou d'arc entrant de label égal à 1.
  - Une tâche est **réalisable** si et seulement si son nœud possède un degré entrant égal à 0
  - La **marge d'une tâche (d'un nœud)**, ( $M_i$ ), est la différence entre la valeur de l'arc minimum entrant et l'état  $a_i$  du nœud. La **marge d'un nœud** est toujours supérieure ou égale à 1.

- La **criticité d'un nœud**,  $Cr_i$ , est le maximum pris sur tous les chemins de la somme des différences entre le nombre de sous-tâches d'un nœud et la marge associée pour les nœuds du chemin.

- Une tâche est **bloquée** lorsque la marge du nœud associée est égale à 1.

- Autres définitions :

- Une **sous-partie** de tâche est un ensemble ordonné de sous-tâches. Les sous-parties considérées sont le JSUI, JSU, P et CO, chacune indexée par le numéro de la tâche associée. L'ordre d'apparition des sous-parties dans une tâche est défini comme énoncé dans cette définition. Les sous-parties peuvent être toutes présentes ou non dans une tâche. Dans la négative l'ordre reste le même avec l'omission des sous-parties manquantes dans cet ordre.

- Une **sous-tâche** rassemble des informations techniques, opérations élémentaires et appel(s) de tâche. Elle constitue un ensemble non ordonné d'appels de tâches s'il y a lieu. Les sous-tâches sont les éléments constitutifs des sous-parties et à plus grande échelle les éléments constitutifs d'une tâche.

- Une **sous-tâche est activable** si son numéro d'apparition dans la tâche (« j ») est strictement supérieur à l'arc minimum entrant (le minimum des  $m_{i,j}$ ).

- Les **indices d'urgence sur le court terme et sur le long terme** sont définis pour apporter des informations supplémentaires à l'utilisateur, qui choisira de les utiliser ou non.

### 4.3 Utilisation du modèle et outils

Le modèle se prête à l'élaboration d'un plan d'intervention aux lignes directrices variables, par exemple avec l'objectif de minimiser les déplacements entre les zones de l'appareil, de privilégier l'exécution de tâches connexes dites de préparation (ou autre) à l'égard de tâches subséquentes, ou encore de peser chaque exécution de tâche à plus ou moins long terme. Le modèle est un outil pour le désassemblage d'équipements d'avions permettant un accès et une visualisation du travail prévu par l'utilisateur. Il est un complément au savoir, aux compétences techniques et au bon sens de celui-ci et de son équipe.

Dans cette partie, deux utilisations du modèle sont réalisées dans l'optique d'organiser un travail de désassemblage d'équipements et de minimiser les déplacements entre les zones de l'appareil. Dans le cadre de ce rapport, l'utilisation du modèle se limite à la recherche d'une séquence minimum de zones touchées.

Pour obtenir cette séquence minimum, une utilisation employant la théorie des graphes est proposée ainsi qu'une autre proposition de résolution basée sur une heuristique.

#### 4.3.1 Méthode d'utilisation du modèle employant la théorie des graphes

L'utilisation du modèle est ici associée à la théorie des graphes, qui grâce à la création de graphes successifs établis à partir du graphe  $G_{tc}$  permettent de simplifier le problème de recherche d'une séquence minimale de déplacements. Les paragraphes suivants présentent les graphes créés successivement jusqu'à l'atteinte d'une ou plusieurs séquence(s) minimale(s) solution.

*Graphe  $G_{tc}$  :*

L'utilisation de la théorie des graphes s'établit sur l'exemple de graphe  $G_{tc}$  ci-dessous.

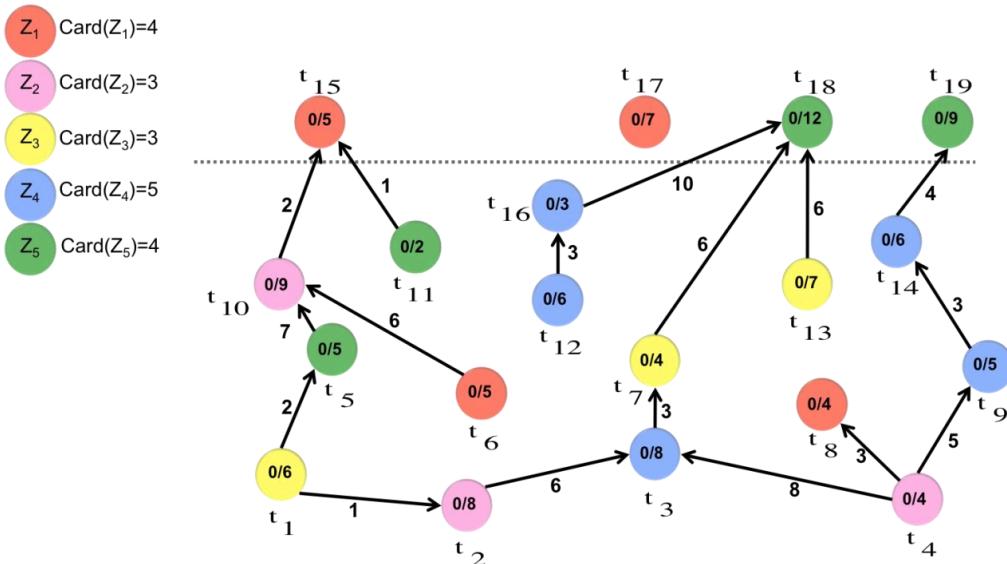


Figure 4-9 : Exemple de graphe  $G_{tc}$

*Chaînes de couleurs :*

À partir du graphe  $G_{tc}$ , l'énumération de tous les chemins du graphe est effectuée. Les chemins sont initialement décrits par une liste ordonnée de tâches. Dans un deuxième temps, ces listes ordonnées de tâches sont remplacées par des listes ordonnées de couleurs : chaque tâche est remplacée par la couleur de sa zone d'appartenance. Les listes de couleurs obtenues pour l'exemple proposé sont les suivantes :

Tableau 4-2 : Obtention des chaînes de couleurs à partir de tous les chemins de  $G_{tc}$

Chemin	Listes ordonnées de couleurs
A	1-5-10-15
B	6-10-15
C	11-15
D	1-2-3-7-18
E	12-16-18
F	13-18
G	4-3-7-18
H	4-8
I	4-9-14-19
J	17

À partir de cette énumération et coloration, il est possible d'obtenir un graphe de dominance (d'inclusion) entre les chemins. En effet, si l'ordre de couleur d'une chaîne X est inclus dans

l'ordre d'une autre chaîne Y, alors l'ordre total de cette chaîne Y est compatible avec l'ordre total de la chaîne X. D'où le graphe de dominance de la Figure 4.10.

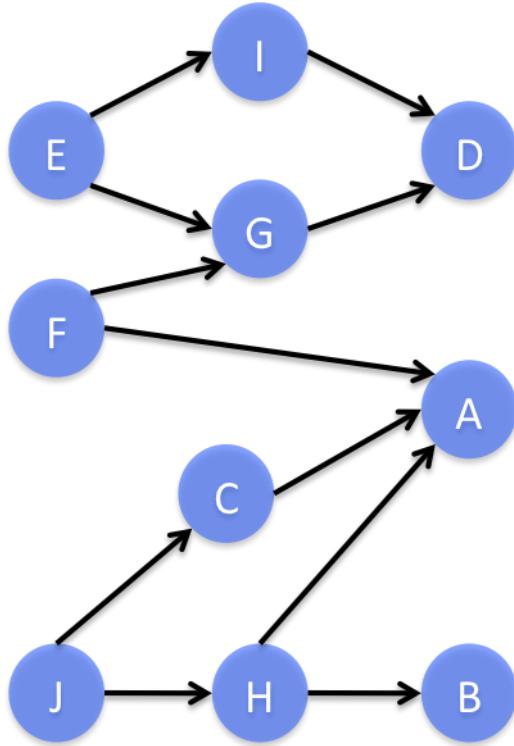


Figure 4-10 : Graphe de dominance

Le graphe de dominance de la Figure 4-10 présente les inclusions d'ordre de couleurs. Il permet d'identifier trois éléments maximaux : les chaînes D, A et B présentant chacune des ordres partiels inclus. Ainsi, solutionner le problème de zonage des activités et de leur exécution avec les chaînes de couleur D, A et B revient à solutionner tout le problème puisque les autres ordres imposés sont inclus dans ces trois éléments maximaux. Le problème est donc ramener à la recherche d'une solution optimale en considérant les trois chaînes suivantes :

*Chaînes D, A et B :*

D : 1-2-3-7-18

A : 1-5-10-15

B : 6-10-15

Les éléments maximaux du graphe de dominance permettent d'obtenir à partir de ces éléments maximaux le graphe de couleurs suivant :

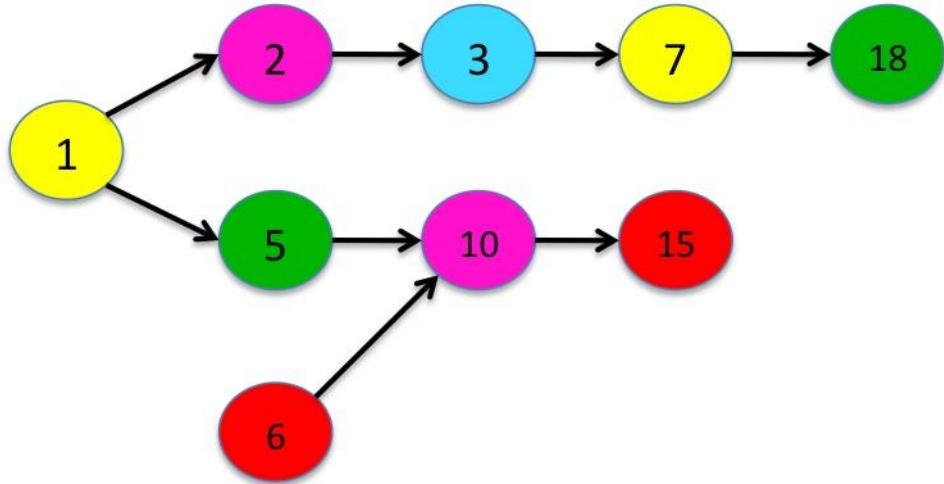


Figure 4-11 : Graphe de couleurs

Les 3 éléments maximaux du graphe de dominance et le graphe de couleurs associé permettent de réduire le problème à l'étude de 9 nœuds au lieu de 19 initialement.

Le problème peut encore se restreindre en rassemblant deux couleurs identiques qui ne sont pas liées par une relation d'ordre (2 couleurs puisque qu'une zone est au maximum visitée 2 fois dans cette exemple). Dans le graphe de couleurs ci-dessus, il s'agit des sommets rose (2,10) et vert (5,18). Deux solutions d'ordre sont alors possibles :

- 1-5-6-2,10-15-3-7-18
- 1-2-3-7-5,18-6-10-15

D'où les graphes d'ordre illustrant les solutions précédentes :

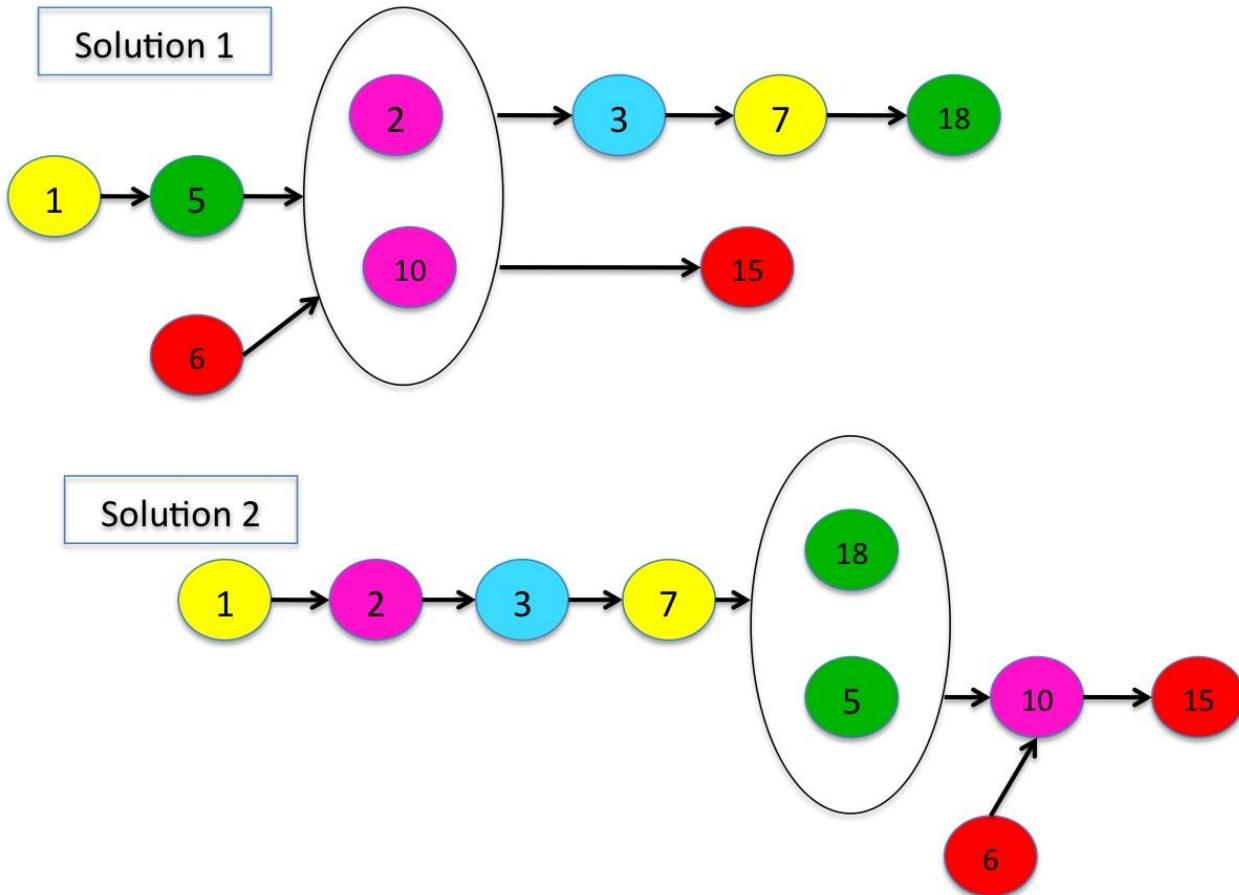


Figure 4-12 : Graphes d'ordre présentant les solutions

Ces solutions présentent deux ordres de 8 éléments, traduisant 8 visites de zones pour résoudre le problème :

$$\{Z_3, Z_5, Z_1, Z_2, Z_1, Z_4, Z_3, Z_5\} \text{ ou } \{Z_3, Z_2, Z_4, Z_3, Z_5, Z_1, Z_2, Z_1\}$$

Dans l'un et l'autre cas, on obtient un ordre tel que toute paire d'objets de même couleur est ordonnée. Tous les ordres totaux compatibles avec l'ordre partiel sous-jacent sont équivalents.

À priori, un graphe d'incompatibilité peut être construit avec tous les groupements possibles et à partir du graphe de couleur, chaque sommet ayant un label égal au nombre de nœuds réunis. Un arc est créé entre deux groupes uniquement si ils sont incompatibles. La solution optimale est le sous-ensemble de sommets non reliés de label maximum.

Dans l'exemple, le graphe est simple : deux sommets sont incompatibles, (2-10), (18-5).

Le résolution du problème est finalement réduite aux étapes d'énumération de tous les chemins du graphe  $G_{tc}$ , de la coloration des chemins, de la construction du graphe de dominance associé (réflétant les inclusions d'ordres partiels dans les ordres totaux), de construction du graphe de couleurs à partir des éléments maximaux du graphe précédent et finalement par la recherche d'un ensemble stable maximum dans le graphe de couleurs.

L'avantage de cette méthode, est qu'elle accorde une liberté d'exécution des tâches, à condition qu'elle respecte l'ordre de visite des zones. En effet, si plusieurs « ordres-solution » sont obtenus, l'utilisateur de la méthode peut émettre des préférences par rapport à l'ordre choisi. Les tâches qui n'apparaissent pas dans les graphes simplifiés sont pour autant à exécuter. Celles-ci vont venir se placer par rapport au reste des tâches (celles retenues pour établir l'ordre) et être affectées suivants les choix, les méthodes et les disponibilités de l'utilisateur et de son équipe. La première contrainte est de réaliser au minimum un passage dans toutes les zones sollicitées. L'utilisation du modèle employé avec la théorie des graphes permet de satisfaire à cette contrainte. De nombreuses solutions d'affectation des tâches non considérées par les graphes simplifiés sont possibles, ainsi l'ajout de nouvelles contraintes permet de hiérarchiser celles-ci et d'obtenir finalement une solution à un problème posé, possédant ses propres contraintes. Ce qui revient finalement à déterminer un ensemble de solutions à priori compatibles.

### **4.3.2 Approche heuristique d'utilisation du modèle**

L'exemple utilisé par les méthodes précédentes est ici repris dans l'optique de développer une heuristique de résolution. La définition d'une heuristique dépend de la complexité du problème. Les paragraphes suivants présentent les étapes de développement d'une heuristique appliquée à cet exemple simple.

- *Définition des zones de l'appareil :*

Chaque tâche sollicitée est associée une zone  $z_i$  ; comme évoqué précédemment lors de la définition d'une tâche. Ainsi, chaque zone représente un ensemble de tâches :

$$z_l = \{t_k\} \text{ avec } l \in N^* \text{ et } k \in N^*$$

Cependant, l'association du nombre de tâches à chaque zone ne reflète pas la disponibilité de ces tâches (en termes de travail pouvant être réalisé) et donc ne peut mesurer l'ampleur du travail associé à chaque zone.

- *Définition de la disponibilité d'une zone :*

La disponibilité d'une zone permet de palier ce manque d'information. Elle permet d'obtenir la quantité de travail capable d'être réalisée dans la zone en termes de sous-tâches activables. Il s'agit de la somme des marges des noeuds appartenant à une même zone. La marge est soustraite par 1, dans le but d'obtenir le nombre juste de sous-tâches réalisables.

La disponibilité d'une zone se définit par :

$$Disp_{z_k} = \sum_{t_i \in z_k} M_{t_i} - 1$$

La quantité de travail capable d'être réalisé dans chaque zone est fournie par la disponibilité. Néanmoins, pour la comparaison du travail propre à chaque zone, il convient de ramener la quantité de travail réalisable à la quantité totale de travail à réaliser. L'ensemble du travail à réaliser dans une zone, correspond à la somme de toutes les sous-tâches et se définit par :

$$Tr_{z_k} = \sum_{t_i \in z_k} n_4^i - a_i$$

Ainsi pour le choix d'une zone de travail, si l'on tient à minimiser les déplacements, il convient de choisir la zone présentant un rapport tel que :  $\left( Disp_{z_k} / Tr_{z_k} \right) \rightarrow 1$

De plus, une sortie de zone ne peut être occasionnée que lorsque l'ensemble du travail réalisable dans la zone a été effectué. Le choix de la zone de travail suivante se réalise par une mise à jour du rapport précédent pour chaque zone.

La Figure 4-13 présente l'exemple considéré avec la localisation des tâches.

La méthode d'organisation de l'exécution des tâches réalisables se base sur l'étude du rapport entre la disponibilité d'une zone et la quantité totale de travail devant y être réalisée. Puisqu'il s'agit de déterminer la séquence minimale de zones visitées, chaque changement de zone doit être dicté par le rapport Disp/Tr, en choisissant la zone possédant le rapport maximum.

Les résultats obtenus dans le Tableau 4-3 permettent d'effectuer le choix de la première zone de travail. Chaque changement de zone est déterminé ensuite de façon analogue et permet d'obtenir la séquence minimale de déplacements suivante : ( $Z_3, Z_2, Z_4, Z_3, Z_5, Z_1, Z_2, Z_1$ ).

Et la séquence : ( $t_1, t_{13}, t_2, t_4, t_3, t_{12}, t_{16}, t_9, t_{14}, t_7, t_{18}, t_{19}, t_5, t_{11}, t_6, t_8, t_{17}, t_{10}, t_{15}$ )

Avec l'heuristique proposée dans cet exemple, une séquence minimale de 8 déplacements est obtenue, tout comme dans les méthodes précédentes. Trois zones sont doublement visitées, les zones 1, 2 et 3.

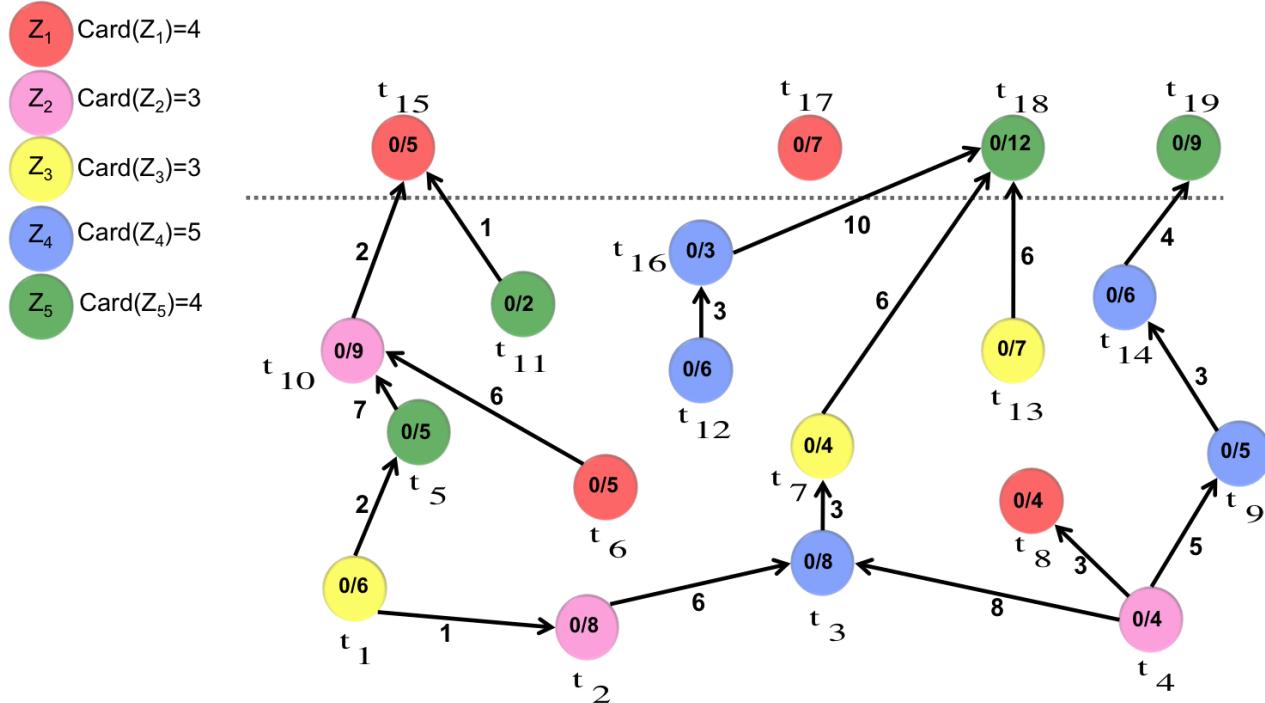
Figure 4-13 : Comptabilisation du nombre de tâches par zone sur  $G_{tc}$ 

Tableau 4-3 : Choix de la première zone d'intervention

Zone	Disp	Tr	Disp/Tr
1	14	21	$14/21 = 0,67$
2	9	17	$9/17 = 0.53$
<b>3</b>	<b>15</b>	<b>17</b>	<b><math>15/17 = 0.88</math></b>
4	20	28	$20/28 = 0.71$
5	11	28	$11/28 = 0.39$

L'Annexe 2 présente l'ensemble des étapes permettant d'obtenir la séquence minimale de zones visitées, et les calculs associés.

## 4.4 Obtention des données

### 4.4.1 Entrées du modèle

Le modèle développé dans ce chapitre se base sur des données réelles et capables d'être lues afin de les utiliser en entrée de celui-ci.

L'AMM rassemble toutes les données nécessaires au modèle, puisque le manuel rassemble toutes les tâches de maintenance, d'entretien, de retrait, d'installation et de manipulation des équipements. Les tâches sont bien distinctes, classées et numérotées comme a su le préciser le chapitre 2. Pour rappel, il s'agit de l'application de la norme ou spécification ATA-2200 complétée par le code AMTOSS.

Le manuel se trouve en format dit « PDF » (en anglais « Portable Document Format »). L'obtention des données se réalise par l'intermédiaire de la lecture de ces documents PDF. La lecture des fichiers repose sur la détection de termes spécifiques se répétant sous le même format au sein des documents. Toutes les entités caractéristiques définies dans le modèle trouvent leur équivalent dans le manuel de maintenance. La synthèse de tous les éléments utilisés en entrée du modèle développé sont rassemblés dans le Tableau 4-4 accompagné de leur équivalent respectif à détecter dans les fichiers PDF du manuel.

Tableau 4-4 : Équivalence des entrées du modèle dans l'AMM

Donnée du modèle	Équivalent du manuel
$t_i$	TASK XX-XX-XX-XXX-XXX
$t_{ij}$	Subtask XX-XX-XX-XXX-XXX
Job Set-Up Information (JSUI)	Job Set-Up Information
Job Set-Up (JSU)	Job Set-Up
Procedure (P)	Procedure
Close Out (CO)	Close-Out

Ces 5 éléments sont les entités principales constitutives d'une tâche, la structure de la tâche est dictée par la rencontre de ces éléments dans le manuel. Le terme « TASK » est suivi du quintuple de nombre établi en juxtaposant le code ATA-2200 de la tâche et son code AMTOSS.

La tâche  $t_i$  est définie lorsqu'un terme « TASK XX-XX-XX-XXX-XXX » est détecté. De plus, le modèle associe une zone d'exécution  $z_i$  à chaque tâche  $t_i$ . Le nombre de zones de travail doit être défini par l'utilisateur en se basant sur le triplet ATA, puisque celui-ci réfère à des zones de l'avion ou encore à des catégories de systèmes. Plus les codes ATA considérés pour les zones sont pris en compte avec précision (au maximum les 6 chiffres peuvent être pris en compte), plus le nombre de zones est important. Le même triplet ATA se répète à travers la tâche par la désignation des sous-tâches.

Une fois la tâche  $t_i$  déclarée, la structure de celle-ci peut s'établir par la reconnaissance des autres termes. En imaginant une tâche complète composée des 4 sous-parties, la première détection à avoir dans le fichier PDF est le terme « Job Set-Up Information ». Une fois détecté, les sous-tâches constitutives de cette sous-partie peuvent être reconnues, en relevant les mentions « Subtask XX-XX-XX-XXX ». La première sous-tâche relevée s'inscrit dans le modèle en  $t_{i1}$ , la suivante en  $t_{i2}$  et ainsi de suite. Tant que le terme « Job Set-Up » n'est pas reconnu dans le PDF, toutes les sous-tâches déclarées appartiennent à la sous-partie « Job Set-Up Information ». Une fois relevé, la borne limitant la sous-partie précédente est définie ; par exemple si la sous-partie contient 4 sous-tâches, le modèle inscrit  $n_1 = 4$ . Ensuite, le processus se répète pour chaque sous-partie et attribue une valeur aux bornes des sous-parties.

*Remarque :* Le compteur de sous-tâches n'est pas réinitialisé à 0 lorsqu'une nouvelle sous-partie débute.

La lecture de la tâche se termine lorsque la désignation de la tâche suivante du manuel apparaît à la lecture des documents PDF.

Ainsi se définit la lecture d'une tâche du manuel pour en dresser la structure au sein du modèle.

Comme mentionné dans les précédents paragraphes du chapitre, une tâche peut faire appel à une ou plusieurs tâches dites connexes par l'intermédiaire de ses sous-tâches. Pour déceler ces appels de tâches au cours de la lecture du document PDF d'une tâche, il s'agit de reconnaître le ou les terme(s) « TASK XX-XX-XX-XXX-XXX » à l'intérieur d'une sous-tâche. Le triplet « XX-XX-

XX » doit cependant être différent de celui reconnu pour la définition de la tâche en cours de lecture.

Finalement, 6 identifications peuvent être réalisées dans la lecture du document PDF de la tâche dans le manuel de maintenance : « TASK XX-XX-XX-XXX-XXX » ( $t_i$ ), « Job Set-Up Information », « Job Set-Up », « Procedure », « Close Out » et « Subtask XX-XX-XX-XXX-XXX ».

D'autre part, l'attribution d'une zone de réalisation d'une tâche est établie par son triplet ATA-2200 (« XX-XX-XX ») et s'impose par cette définition à toutes les sous-tâches constitutives de la tâche. Néanmoins, il est intéressant de regarder le code AMTOSS de chaque sous-tâche (XXX-XXX). Celui-ci vient en effet préciser la nature du travail et/ou sa localisation dans l'avion. Ainsi une sous-tâche demandant une intervention sur les fusibles annoncera un déplacement dans cette zone au cours de la réalisation de la tâche (précisé par le code AMTOSS). Par conséquent, un plan d'intervention voulant minimiser les déplacements peut approfondir ce zonage à l'échelle des sous-tâches.

#### **4.4.2 Considération de l'état de l'appareil pour le désassemblage**

Dresser un plan d'intervention s'établit sur une liste d'équipements à extraire d'un appareil et/ou encore sur une liste de manipulations à opérer sur celui-ci. Cette liste d'équipements et/ou de manipulations correspond à une liste de tâches de l'AMM. Le repérage et la lecture de ses tâches permettent de déceler la nécessité de réalisation d'autres tâches. Ces autres tâches font partie intégrante du plan d'intervention sur l'appareil puisqu'elles permettent l'accès aux tâches terminales et leur réalisation.

Lorsque l'inventaire des tâches sollicitées est effectué et que le graphe de tâches compactes  $G_{tc}$  correspondant est construit, l'état de l'appareil doit être considéré par le modèle.

En effet, un avion entreposé depuis plusieurs années, ou plusieurs mois, ou tout simplement venant d'être mis au sol, ne subira pas les mêmes manipulations techniques puisqu'elles sont

fonction de la durée d'entreposage qui lui a été déclarée (entreposage sur le court terme ou le long terme, dont la durée renvoie à une tâche spécifique de l'AMM). Les opérations de maintenance et de manipulation pour l'entreposage doivent être connues. Ces manipulations correspondent à des tâches de l'AMM. Ces tâches préalablement réalisées peuvent alors être extraites du graphe de tâches compactes  $G_{tc}$  et alléger celui-ci.

D'autre part, en dehors de ces activités de préparation à l'entreposage, l'avion a pu subir au cours de son entreposage de ponctuelles extractions d'équipements (par exemple les moteurs, ou des pièces particulières en vue d'activités de recherche et développement etc.). Ces interventions sur l'appareil doivent être renseignées au modèle (par le biais de numéros de tâches réalisées préalablement au désassemblage), enfin de « libérer » des tâches du graphe de tâches. Par exemple, un graphe  $G_{tc}$  contenant des tâches ayant trait aux moteurs de l'avion, sera allégé de celles-ci si les moteurs ont été extraits de l'appareil préalablement à la création du plan d'intervention.

## **4.5 Validation du modèle. [PARTIE CONFIDENTIELLE]**

### **4.5.1 Volume des données**

### **4.5.2 Application de la méthode au retrait d'un élévateur**

### **4.5.3 Automatisation du modèle**

## **CHAPITRE 5 DISCUSSION ET DÉVELOPPEMENTS FUTURS**

Ce chapitre conclue le mémoire en apportant une discussion du modèle développé et notamment des orientations prises dans sa définition. De plus, à la suite de la discussion du modèle les développements futurs à envisager sont expliqués et leur utilité justifiée.

### **5.1 Fondements du modèle développé**

Le modèle a été développé en fonction des données disponibles à des fins d'exploitation et d'application. Celui-ci a été testé et validé sur l'exemple d'un désassemblage d'élévateur de CRJ-200 présenté dans le chapitre 4. D'autre part, la création du modèle a été réalisé avec la vision du désassemblage de pièces réutilisables sur un aéronef tel qu'opéré en pratique. En effet, ce travail de mémoire a permis l'observation de cette étape du traitement en fin de vie d'un avion (un CRJ-200) et de voir les techniciens à l'œuvre dans cette activité. L'activité observée et discutée avec des professionnels du domaine aéronautique a permis de prendre certaines directions d'élaboration au détriment d'autres qui auraient pu être envisagé sans cette expérience de terrain. Les lignes suivantes décrivent globalement l'étape de désassemblage de pièces réutilisables sur un avion en fin de vie et sont accompagnés des arguments ayant dicté les choix de création du modèle présenté dans ce mémoire.

#### **5.1.1 Observation d'un désassemblage de pièces réutilisables sur un avion**

Un appareil aérien entamant un processus de traitement en fin de vie est disposé sur le tarmac afin qu'une équipe de techniciens puisse opérer sur celui-ci. Un périmètre est défini autour de l'avion. Dans ce périmètre pourront se trouver des techniciens habilités, des caisses à outils, des équipements nécessaires aux opérations de désassemblage, des matériaux et équipements pour la prévention du danger (exemple : de l'absorbant disposé au sol destiné à recevoir des fuites d'huile ou de carburant) et des rayonnages en bordure de zone destinés à recevoir les pièces extraites. Les étapes de sécurisation, de désassemblage et de démantèlement (broyage) sont réalisées sur place, dans la zone du tarmac réservée à l'appareil. L'appareil doit être immobilisé en conséquence et ne

sera pas déplacé durant ces différentes étapes. Pour la sécurisation de l'appareil et donc la vidange des matières dangereuses, des dispositifs de vidange et de récupération de ces matières sont amenés sur place. Les réservoirs remplis des matières extraites sont ensuite récupérés par une entreprise spécialisée afin de subir un traitement adapté. L'aération de l'appareil suite à ces extractions fait partie de la phase de sécurisation. Le désassemblage de pièces réutilisables est opéré dans la même zone du tarmac. Pour des raisons pratiques et sécuritaires, l'avion est immobilisé et les techniciens se déplacent pour réaliser les opérations de désassemblage demandées. L'équipe de techniciens dispose de quelques imposantes caisses à outils (utilisées par plusieurs d'entre eux pendant les opérations) et chacun possède une caisse à outils individuelle plus sommaire. En règle générale, les techniciens travaillent chacun de leur côté en opérant dans une zone de l'avion ou sur une catégorie d'équipements. Néanmoins, au cours de certaines étapes du désassemblage l'extraction de composants peut nécessiter l'intervention de techniciens dans plusieurs zones pour travailler sur un même type de système, comme par exemple lorsqu'ils ont à travailler sur les différents systèmes hydrauliques (au nombre de trois lors de l'observation). D'autre part, le retrait de certaines pièces peut prendre beaucoup de temps malgré une procédure de retrait peu complexe. Par exemple, le retrait des pare-brises est une opération longue puisqu'il s'agit d'une pièce à haute valeur marchande qui nécessite un retrait soigné de toutes les fixations. Concernant le support et l'immobilisation de l'appareil, l'avion est posé sur ses trains d'atterrissement qui sont, bien souvent, retirés en fin de désassemblage. Une fois les trains d'atterrissement retirés, l'avion est disposé sur des cales et immobilisé à nouveau. L'intervention des techniciens sur l'appareil ne nécessite aucun montage d'échafaudage fixe autour de l'avion. Des équipements peuvent néanmoins assister les techniciens dans leurs opérations. Par exemple, l'usage d'équipement type « girafe » pour éléver un technicien au niveau du stabilisateur horizontal d'un avion. Par ailleurs, certains retraits de pièces pourraient nécessiter la remise en marche de systèmes hydrauliques et/ou pneumatiques, comme dans le cas du retrait des trains d'atterrissement. Dans de telles situations des équipements externes sont amenés dans le périmètre du tarmac pour satisfaire les opérations que les systèmes hydrauliques et pneumatiques auraient pu réaliser s'ils n'avaient pas été vidés ou démontés. Lorsqu'un technicien finalise un désassemblage d'équipement, il le dispose sur les rayonnages mobiles prévus à cet effet et disposés en bordure de périmètre. Un personnel autre que les techniciens opérant sur l'avion s'occupe de récupérer les pièces afin de les classer, de les emballer et de les marquer d'une

étiquette de suivi. Ce personnel n'est pas disposé à entrer dans la zone de désassemblage de l'avion.

### **5.1.2 Critères retenus pour la définition du modèle et son utilisation**

Les données disponibles sont les tâches de maintenance rassemblées dans l'AMM. Ces tâches dictent les opérations à réaliser pour le désassemblage de pièces sur un avion. La liste de pièces à récupérer varie en fonction de l'offre et de la demande tout comme du type et du modèle d'avion. Un modèle établi sur une « liste générale de pièces » à désassembler sur un avion en fin de vie ne s'avérait que peu valable. Établir le modèle à partir de l'ensemble des données de l'AMM permet de considérer le caractère aléatoire de la liste de pièces à désassembler. Le modèle est donc flexible et peut s'établir pour n'importe quelle commande de pièces. Le modèle fournit l'ensemble des tâches sollicitées par le désassemblage, les connections entre elles, leur précédence de réalisation et leur localisation sur l'avion. Il convient que des techniciens expérimentés se figurent les relations entre les tâches à réaliser grâce aux années d'expérience, mais un jeune technicien peut par exemple se représenter l'ampleur du travail et les activités à réaliser plus aisément. Le modèle peut servir de support au chef d'équipe chargé des opérations et lui faciliter son travail de répartition et d'organisation des activités.

Dans un deuxième temps, le modèle est présenté dans le chapitre 4 comme un support de stratégies d'utilisation. L'utilisation faite du modèle dans ce mémoire et d'optimiser l'organisation du désassemblage et de ses opérations en minimisant la séquence de zones visitées pour réaliser le désassemblage des équipements figurant sur la liste commandée. Ce choix d'utilisation a été fait en fonction des explications précédentes sur le retour d'expérience qu'a été l'observation du désassemblage de pièces réutilisables. Aucun échafaudage n'est construit autour de l'avion, les techniciens se déplacent sur, dans, autour de l'avion (seul appareil dans sa zone du tarmac). Ils possèdent l'outillage requis à disposition, ne sortent pas de la zone d'activités pendant leurs temps de travail et l'avion est immobilisé. Le développement du modèle et son utilisation ne vont pas à l'encontre des pratiques observées mais s'inscrivent au contraire dans les mêmes lignes directrices.

Ainsi, le modèle a été élaboré à partir de données réelles disponibles, à partir de l'observation de l'activité concrète de désassemblage d'équipements réutilisables et validé sur un exemple. Cependant, dans un problème d'organisation et d'ordonnancement d'activités de désassemblage le modèle proposé possède la limite suivante : il ne considère aucune notion de durée sur l'exécution des tâches et des opérations décrites au sein de celles-ci. Une optimisation sur la durée des opérations n'est donc pas réalisable. Néanmoins, l'optimisation de l'organisation des activités de désassemblage en minimisant le nombre de zones visitées est une façon d'approcher cette optimisation sur la durée de réalisation du désassemblage. En effet, l'avion est un produit de grande taille sur lequel il est conseillé d'éviter les allers-retours inutiles entre des zones d'activités, tout comme d'éviter la gestion individuelle des opérations pour préférer une gestion globale de celles-ci.

## 5.2 Développements futurs

Un développement direct et subséquent à ce travail de recherche est l'automatisation de la lecture des données. Les données disponibles en document PDF (l'AMM) doivent être lues de façon à y repérer des termes spécifiques reconnus par le modèle pour l'élaboration du graphe de tâches.

D'autre part, les utilisations du modèle avancées (employant la théorie des graphes et une heuristique) doivent être validées. Les deux utilisations sont validées dans ce mémoire dans la mesure où elles sont employées sur un cas simple et un graphe de tâches fictif. Il s'agirait de vérifier leur validité sur des cas réels par l'intermédiaire de tests. Dans le cadre de ce travail, il n'a pas été jugé pertinent d'appliquer les utilisations proposées sur des cas générés aléatoirement afin d'entrevoir la possibilité d'une solution optimale. En outre, il serait utile de posséder suffisamment de cas réels (situations de désassemblage) pour voir si les utilisations du modèle conservent leur validité d'application. Le but n'étant pas de résoudre à l'optimum des problèmes qui ne se posent pas mais plutôt de définir la qualité (validité) des utilisations sur des cas réels. Ainsi, avant de programmer des utilisations optimales, il s'agirait de récupérer plusieurs graphes de tâches reflétant des cas réels de désassemblage de pièces sur un avion pour pouvoir réaliser des essais. En considérant l'heuristique, ce n'est pas parce celle-ci n'est pas efficace sur des cas artificiels qu'elle ne l'est pas sur des cas réels et inversement.

Lorsque suffisamment de cas réels se seront prêtés à l'élaboration des graphes de tâches, qui eux-mêmes auront servis à l'évaluation des utilisations qui en sont faites, leur validation sera envisageable. De plus, des améliorations ne pourront que leur être apportées à la suite de ces tests.

Dans ce mémoire, les utilisations du graphe de tâches présentées fournissent une solution optimale, mais qu'en est-il de leur performance sur des cas réels ? Un tel questionnement doit dicter les développements futurs en ce qui a trait à l'utilisation du modèle développé.

## CONCLUSION

Le devenir des aéronefs en fin de vie est un problème complexe en vue des défis technologiques et défis environnementaux associés qu'il suscite. Les législations existantes et émergeantes pour la fin de vie des produits viennent renforcer l'idée d'une gestion intégrée pour faciliter le traitement en fin de vie des aéronefs futurs. À l'heure actuelle, des avions ayant atteint la fin de leur durée de vie utile (environ 25 ans) sont sujets à un processus de traitement en fin de vie. Ce processus comprend les étapes de sécurisation de l'appareil, de désassemblage des pièces et équipements réutilisables, de démantèlement de la carcasse restante, de valorisation des matériaux et/ou leur enfouissement. Dans ce travail, l'étape de désassemblage des pièces réutilisables en vue de leur introduction sur un marché de revente et de réutilisation de pièces pour une seconde vie est étudiée. Le but du travail a été de penser une démarche rationnelle et optimisée pour le désassemblage des équipements. La première étape a été d'analyser la littérature afin d'identifier des méthodes ou aspects de méthode applicables au problème de désassemblage sélectif et non destructif d'équipements sur un avion désuet. De plus, la revue du contexte aéronautique pour ce problème de désassemblage permet le statut suivant : il est primordial que toutes les procédures de maintenance applicables (tâches) soient respectées pour assurer le caractère réutilisable des équipements pour une seconde vie. La fouille de la littérature n'a pas permis de trouver une méthode adaptée ou adaptable au problème traité : les séquences d'opérations fournies par les tâches de l'« Aircraft Maintenance Manual » (AMM) doivent être organisées entre elles et ordonnées. Pour palier cette absence de méthode satisfaisante, un modèle de représentation du désassemblage adapté au contexte et aux données disponibles (manuels techniques) a été développé. Il reprend des aspects de méthodes existantes, et se construit à partir de la lecture des tâches du manuel de maintenance propre à chaque appareil. En effet, à partir de l'AMM et donc des tâches sollicitées par un processus de désassemblage sélectif, le modèle se construit par une lecture des tâches et une reconnaissance de termes spécifiques s'y trouvant. La finalité de cette construction est de représenter l'ensemble du travail à réaliser sur l'avion sous la forme d'un graphe de tâches. Le graphe présente les liens entre les tâches à réaliser et peut alors être le support de différentes stratégies d'utilisation pour l'organisation du désassemblage en fonction d'une liste d'équipements à extraire. Une stratégie basée sur la théorie des graphes et une heuristique illustrent la résolution d'un problème de désassemblage. Les résultats fournis

sont une séquence de zones de l'avion à visiter et une séquence de tâches à réaliser. La séquence de zones visitées est optimale dans la satisfaction de l'objectif de minimisation du nombre de zones visitées et est déterminée en fonction de la liste d'équipements à extraire. Le modèle est un support de stratégies de résolution pouvant s'attribuer des objectifs variés, comme par exemple la minimisation du nombre de zones visitées de l'avion (objectif visité dans ce mémoire), ou encore privilégier (ou prioriser) des interventions dans des zones données.

Des travaux en cours existent à propos d'une utilisation mathématique du modèle dont l'objectif est de remplir la contrainte de minimisation du nombre de zones visitées au cours du désassemblage. Il s'agit d'un problème complexe qui d'après une brève étude de cette utilisation mathématique s'avère être un problème non polynomial. D'autre part, d'autres travaux à propos des autres étapes du traitement en fin de vie des avions s'opèrent également, notamment en ce qui concerne le démantèlement de la carcasse restante et la valorisation des matériaux (à haute valeur marchande).

## BIBLIOGRAPHIE

AFRA. (2009) *Best Management Practice for Management of Used Aircraft Parts and Assemblies* Publié par : Aircraft Fleet Recycling Association.

AFRA, *Welcome to AFRA*. Consulté le 19 mai 2012a. Tiré de :  
<http://afraassociation.org/index.cfm>

AFRA, *About Us*. Consulté le 19 mai 2012b. Tiré de: <http://afraassociation.org/aboutus.cfm>

Airlines for America. *Publications and Subscriptions* Consulté le 20 Mai 2012a, Tiré de :  
<https://publications.airlines.org/CommerceHomepage.aspx>

Airlines for America. *Mission and Vision*. Consulté le 20 Mai 2012b), Tiré de  
<http://www.airlines.org/Pages/MissionVision.aspx>

ATA, Air Transport Association e-business Program. *Welcome*. Consulté le 20 Mai 2012, Tiré de : <http://www.ataebiz.org/home>

Baldwin, D.F., Abell, T.E. Lui, M. M., De Fazio, T.L. and Whitney D.E. (1991). An Integrated Computer Aid for Generating and Evaluating Assembly Sequences for Mechanical Products. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 7(1), 78 –94.

Bourjault, A. (1984). *Contribution to a Methodological Approach of Automated Assembly: Automatic Generation of Assembly Sequence*. Thèse d'État, Faculté Des Sciences Et Des Techniques De l'Université De Franche-Comté, Besançon, France.

CATIA, Dans *Wikipédia*. Consulté le 7 octobre 2012. Tiré de <http://fr.wikipedia.org/wiki/CATIA>

Commission des communautés européennes. (2003). *Règlement (CE) n° 2042/2003 de la Commission du 20 novembre 2003 relatif au maintien de la navigabilité des aéronefs et des produits, pièces et équipements aéronautiques et relatif à l'agrément des organismes et des personnels participant à ces tâches (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE)*. Commission des communautés européennes, Règlement (CE) n°2042/2003 Annexe 2 FR.145.378. Tiré de : <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32003R2042:FR:NOT>

De Fazio, T.L. and Whitney, D. E. (1987). Simplified Generation of All Mechanical Assembly Sequences. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, RA-3(6), 640–658.

Demeulemeester E.L., Herroelen W.S. (2002). *Project Scheduling- A Research Handbook* (International Series in Operations Research and Management Science, vol.49). Dordrecht : Kluwer Academic Publishers.

Dong, J., and G. Arndt. (2003). A Review of Current Research on Disassembly Sequence Generation and Computer Aided Design for Disassembly. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 217(3) 299–312.

ENVIROPEA, « Nos publications », *Projets LIFE Nature financés en France entre 2000 et 2009 : bonnes pratiques, conseils et projets exemplaires* (février 2011). Consulté le 8 octobre 2012, Tiré de : <http://www.enviropea.com/fr/documents/association-enviropea/documents/>

Gottipolu, B.R. (1994). *An Approach for Assembly Sequence Planning using Solid Models*. PhD, École Polytechnique de Montréal, Montréal, Qc., Canada.

Gungor, A. and Gupta, S.M. (1997). An Evaluation Methodology For Disassembly Processes. *Computers & Industrial Engineering* 33(1-2), 329-332.

Gungor, A. and Gupta, S.M. (1998). Disassembly Sequence Planning for Complete Disassembly in Product Recovery. *Proceedings of the 1998 Northeast Decision Sciences Institute Conference* Boston, Massachusetts, 250-252.

Ha, J., Choi, S., Shin, S., Chwa, K. and Chang, S. (1996). On deciding 3D part disassemblability and surface machinability, *IIE Transactions*, 28, 847-854.

Homem de Mello, L.S. and A.C. Sanderson. (1990). AND/OR Graph Representation of Assembly Plans. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 6(2), 188 –199.

Homem de Mello, L.S. and A.C. Sanderson. (1991a). A Correct and Complete Algorithm for the Generation of Mechanical Assembly Sequences. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 7(2), 228-240.

Homem de Mello, L.S. and A.C. Sanderson. (1991b). Representations of Mechanical Assembly Sequences. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 7(2), 211-227.

Howarth, N. (2012). « Dismantling Dynamics », *Aviation Week & Space Technology*, July 16, 52-53.

ISO. *ISO 14000-Management environnemental.* Consulté le 21 mai 2012, Tiré de :  
<http://www.iso.org/iso/fr/iso>

Jabbour, T. et Mascle, C. (1998). A Database for the Representation of Assembly Features in Mechanical Products. *International Journal of Computational Geometry & Applications*, 8, no. 5-6.

Lambert, A. J. D. (2002). Determining optimum disassembly sequences in electronic equipment. *Computers & Industrial Engineering* 43, 553-575.

Lambert, A. J. D. (2003). Disassembly Sequencing: A Survey. *International Journal of Production Research* 41(16), 3721–3759.

Moore, K. E., Güngör, A. and Gupta, S.M. (1998). A Petri Net Approach to Disassembly Process Planning, *Computers & Industrial Engineering* 35(1–2), 165–168.

Moore, K. E., Güngör, A. and Gupta, S.M. (2001). Petri net approach to disassembly process planning for products with complex AND/OR precedence relationships. *European Journal of Operational Research* 135, 428-449.

Murata, T. (1989). Petri Nets: Properties, Analysis and Applications. *Proceedings of the IEEE*, 77(4), 541 –580.

Murayama, T., Oba, F. Abe, S., Yamamichi, Y. (2001). Disassembly Sequence Generation using Information Entropy and Heuristics for Component Replacement. *Proceedings of the IEEE International Symposium*, 208-213.

PAMELA. (2008). *Training Kit*. Publié par : Airbus

Parlement européen. (2000). *Directive 2000/53/CE du Parlement européen et du Conseil du 18 septembre 2000 relative aux véhicules hors d'usage*. Parlement européen et du Conseil du 18 septembre 2012, Directive 2000/53/CE. Tiré de : <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32000L0053:FR:NOT>

Parlement européen. (2003). *Directive 2002/96/CE du Parlement européen et du Conseil du 27 janvier 2003 relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE). Déclaration conjointe du Parlement européen, du Conseil et de la commission relative à l'article 9.* Parlement européen et du Conseil du 27 janvier 2003, Directive 2002/96/CE. Tiré de : <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32002L0096:FR:NOT>

Petri, Carl A. *COMMUNICATION WITH AUTOMATA: Volume 1 Supplement 1*, January 1966.  
 Pinedo M., Chao X. (1999). *Operations Scheduling with Applications in Manufacturing and Services* (International Editions 1999). Singapore : McGraw-Hill Book Co.

Schaeffer S.E. (2007). Graph clustering. *Computer Science Review*, 1(1), 27-64

Sénat Français. (1992). *Projet de loi relatif à la nuisance sonore en zone aéroportuaire.* Commission des affaires économiques, RAPPORT 204(98-99). Tiré de : <http://www.senat.fr/rap/198-204/198-204>

SolidWorks, Dans Wikipédia. Consulté le 7 octobre 2012. Tiré de <http://fr.wikipedia.org/wiki/SolidWorks>

Srinivasan, H. and Gadh, R. (1998). A geometric algorithm for single selective disassembly using the wave propagation abstraction. *Computer-Aided Design*, 30(8), 603-613.

Srinivasan, H., Figueroa, R. and Gadh, R. (1999). Selective disassembly for virtual prototyping as applied to de-manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 15, 231-245.

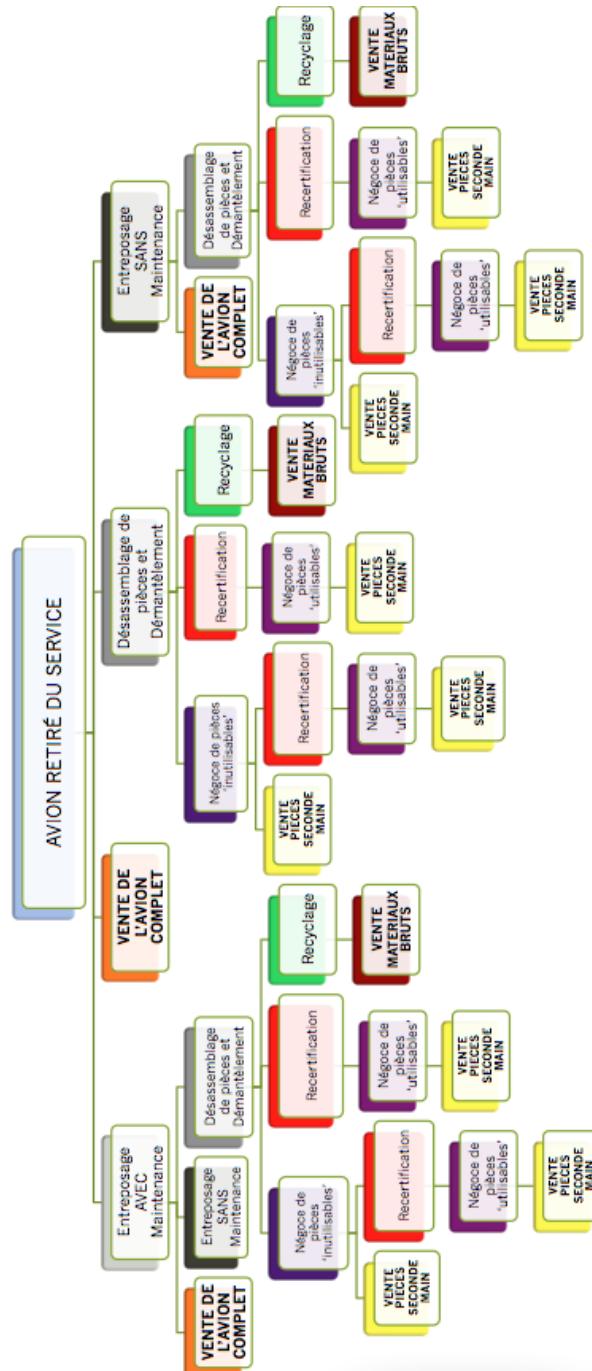
Srinivasan, H. and Gadh, R. (2000). Efficient geometric disassembly of multiple components from an assembly using wave propagation. *Journal of Mechanical Design*, 122, 179-184

Srinivasan, H. and Gadh, R. (2002). A non-interfering selective disassembly sequence for components with geometric constraints. *IIE Transactions*, 34, 349-361

Takeyama H., Sekiguchi, H., T. Kojima, T., Inoue, K., and Honda, T. (1983). Study on Automatic Determination of Assembly Sequence. *CIRP Annals-Manufacturing Technology* 32(1), 371–374.

Tang, Y., Zhou, M.C., Zussman, E. and Caudill, R. (2000). Disassembly Modeling, Planning, and Application : A review. *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3, 2197-2202.

# **ANNEXE 1 – ORGANIGRAMME DES SCÉNARIOS DE FIN DE VIE POUR UN AÉRONEF**



## ANNEXE 2 – EXEMPLE D’UTILISATION DU MODÈLE EMPLOYANT UNE HEURISTIQUE DE RÉSOLUTION

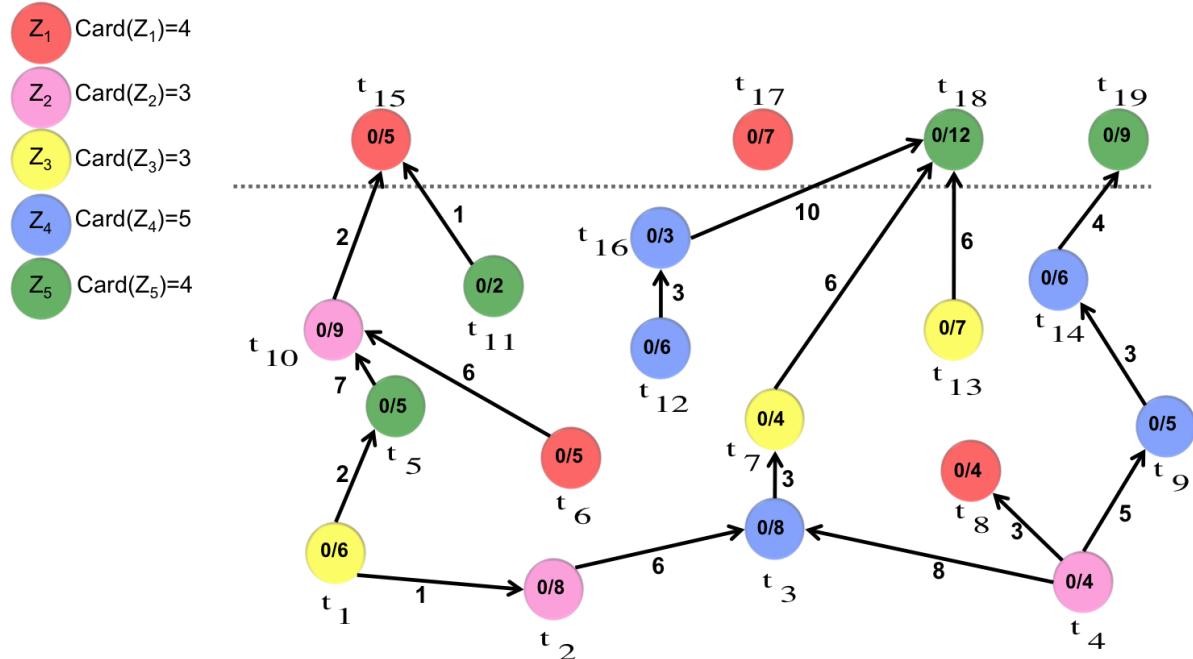


Figure A-1 : Graphe  $G_{tc}$  initial

- *Intervention 1 :*

Tableau A-1 : Intervention 1, choix de zone.

Zone	Disp	Tr	Disp/Tr
1	$7+5+2+0=14$	$7+5+5+4=17$	$14/21 = 0.67$
2	$4+0+5=9$	$9+4+8=21$	$9/21 = 0.43$
<b>3</b>	<b><math>6+2+7=15</math></b>	<b><math>6+4+7=17</math></b>	<b><math>15/17 = 0.88</math></b>
4	$6+3+5+2+4=20$	$8+6+3+5+6=28$	$20/28 = 0.71$
5	$1+2+5+3=11$	28	$11/28 = 0.39$

**Zone = 3 (Jaune)**

**Tâches = {t<sub>1</sub>, t<sub>13</sub>}**

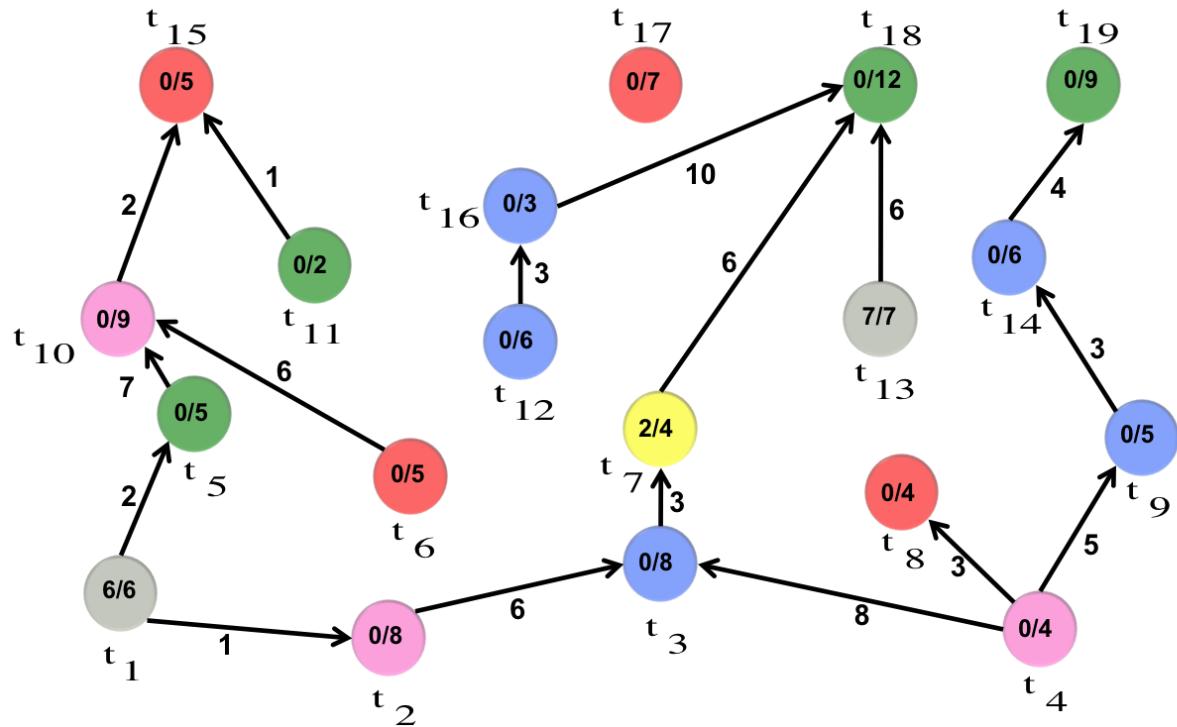


Figure A-2 :  $G_{tc}$  / Intervention 1 en Zone 3

- *Intervention 2 :*

Tableau A-2 : Intervention 2, choix de zone.

Zone	Disp	Tr	Disp/Tr
1	$7+2+5+0=14$	17	$7/16 = 0,4375$
2	<b><math>8+5+4=17</math></b>	<b>21</b>	<b><math>17/21 = 0.81</math></b>
3	0	2	$0/4 = 0$
4	20	28	$20/28 = 0.71$
5	$5+2+5+3=15$	28	$15/28 = 0.53$

**Zone =2 (Rose)**

**Tâches = {t<sub>2</sub>,t<sub>4</sub>}**

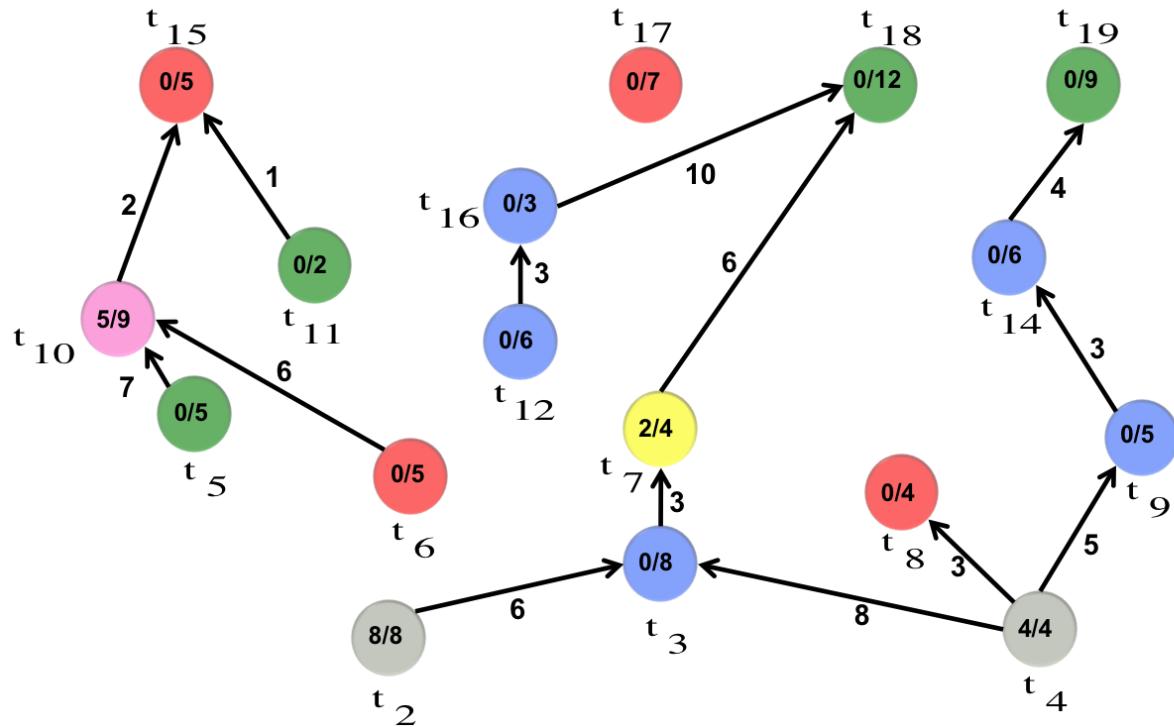


Figure A-3 :  $G_{tc}$  / Intervention 2 en Zone 2

- *Intervention 3 :*

Tableau A-3 : Intervention 3, choix de zone

Zone	Disp	Tr	Disp/Tr
1	$5+0+4+7=16$	21	$16/21 = 0,7619$
2	0	4	$0/4 = 0$
3	0	2	$0/2 = 0$
4	$6+3+8+5+6=28$	28	$28/28 = 1$
5	$5+2+5+3=15$	28	$15/28 = 0.54$

**Zone = 4 (Bleu)**

**Tâches = {t<sub>3</sub>, t<sub>12</sub>, t<sub>16</sub>, t<sub>9</sub>, t<sub>14</sub>}**

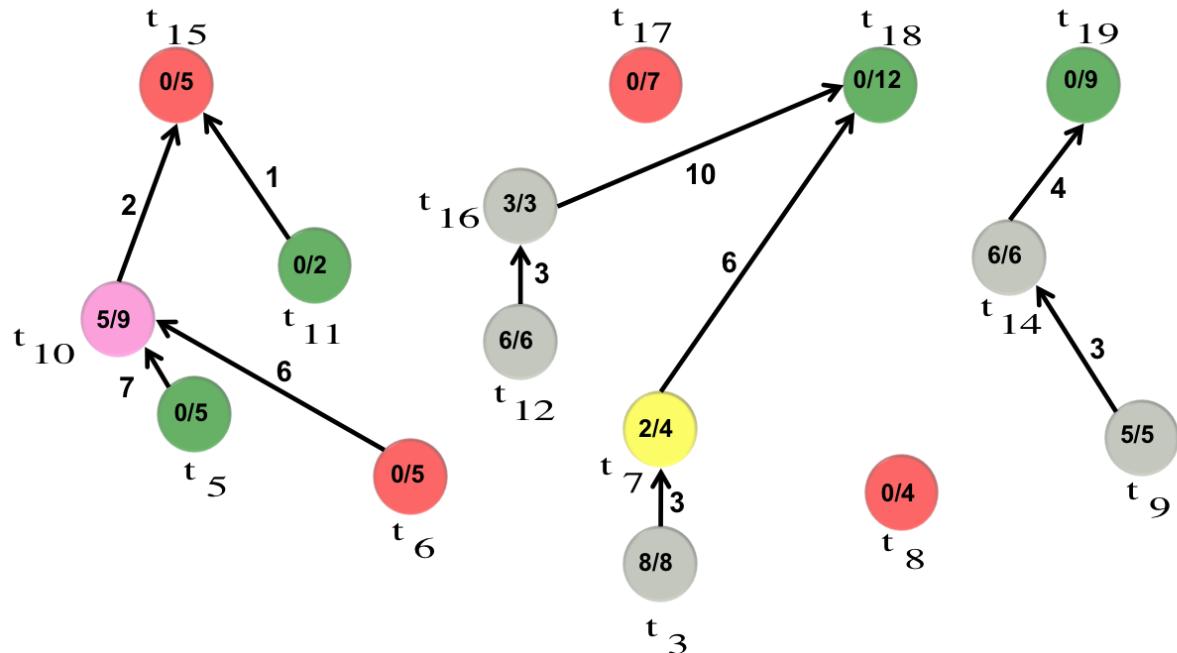


Figure A-4 : G<sub>tc</sub> / Intervention 3 en Zone 4

- *Intervention 4 :*

Tableau A-4 : Intervention 4, choix de zone.

Zone	Disp	Tr	Disp/Tr
1	5+4+7+0=16	21	16/21 = 0,7619
2	0	4	0/4 = 0
<b>3</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2/2 = 1</b>
4	0	0	0
5	5+2+5+9=21	28	21/28 = 0.75

**Zone = 3 (Jaune)**

**Tâches = {t<sub>7</sub>}**

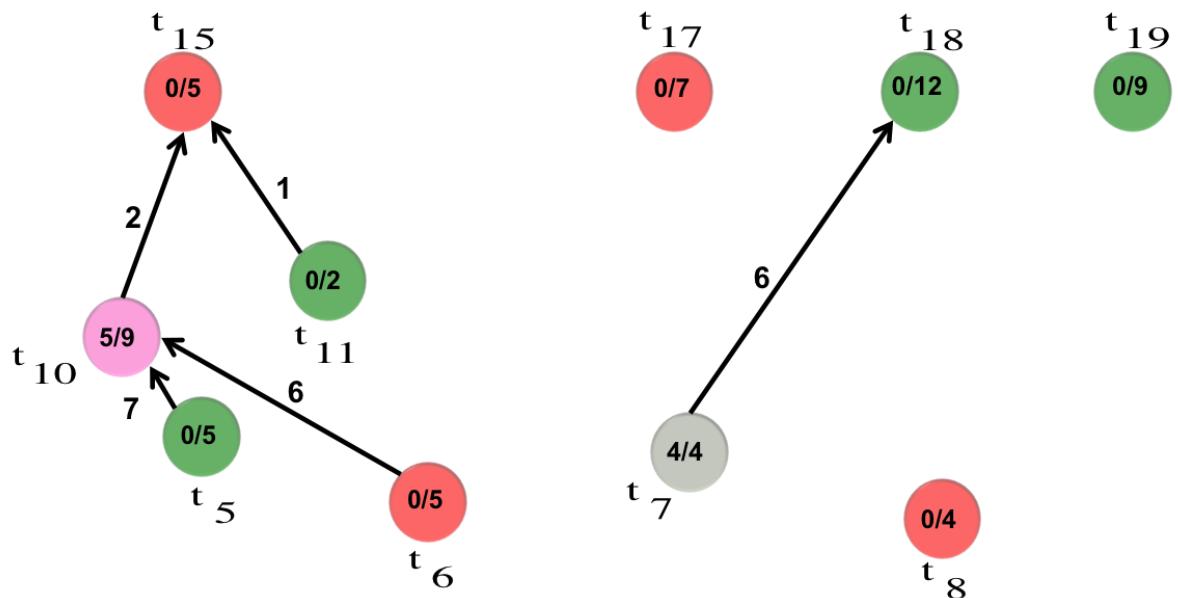


Figure A-5 : G<sub>tc</sub> / Intervention 4 en Zone 3

- *Intervention 5 :*

Tableau A-5 : Intervention 5, choix de zone.

Zone	Disp	Tr	Disp/Tr
1	0+5+4+7=16	21	16/21 = 0,7919
2	0	4	0/4 = 0
3	0	0	0
4	0	0	0
5	2+5+12+9=28	28	28/28 = 1

**Zone = 5 (Vert)**

**Tâches = {t<sub>18</sub>, t<sub>19</sub>, t<sub>5</sub>, t<sub>11</sub>}**

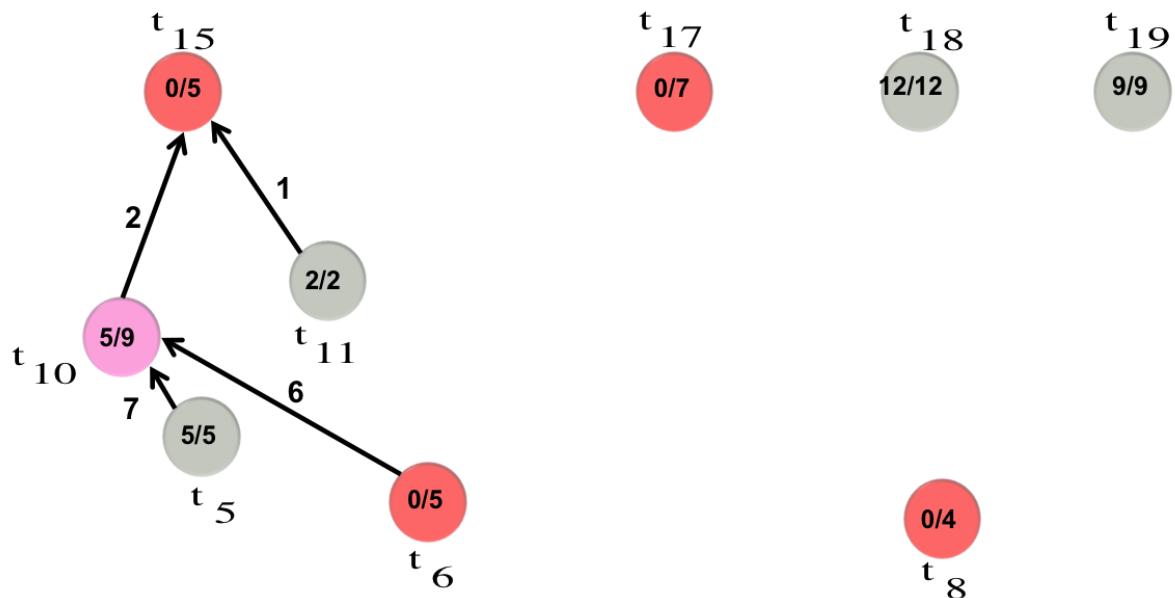


Figure A-6 : G<sub>tc</sub> / Intervention 5 en Zone 5

- *Intervention 6 :*

Tableau A-6 : Intervention 6, choix de zone.

Zone	Disp	Tr	Disp/Tr
1	1+5+4+7=17	21	17/21 = 0,81
2	0	4	0/4 = 0
3	0	0	0
4	0	0	0
5	0	0	0

**Zone =1 (Rouge)**

**Tâches = {t<sub>6</sub>,t<sub>8</sub>,t<sub>17</sub>}**

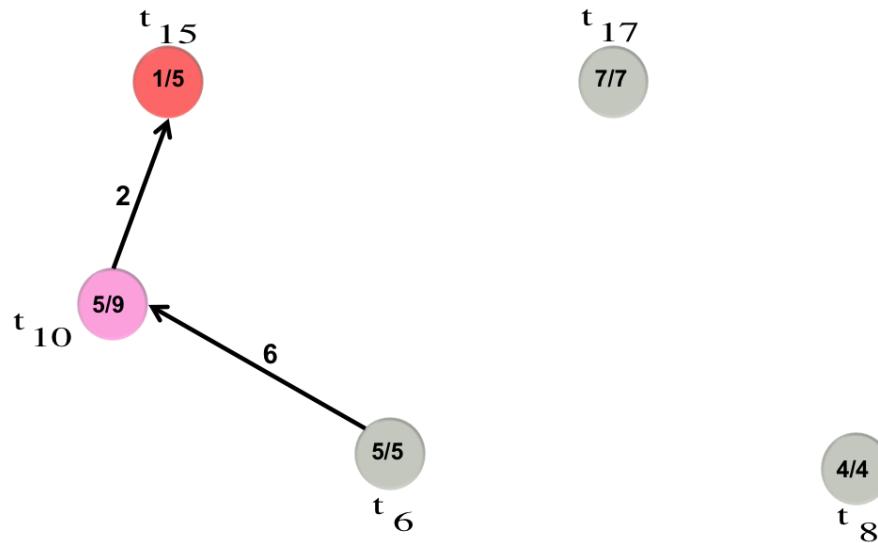


Figure A-7 : G<sub>tc</sub> / Intervention 6 en Zone 1

- *Intervention 7 :*

Tableau A-7 : Intervention 7, choix de zone.

Zone	Disp	Tr	Disp/Tr
1	0	4	0/4=0
2	4	4	<b>4/4 = 1</b>
3	0	0	0
4	0	0	0
5	0	0	0

**Zone = 2 (Rose)**

**Tâches = {t<sub>10</sub>}**

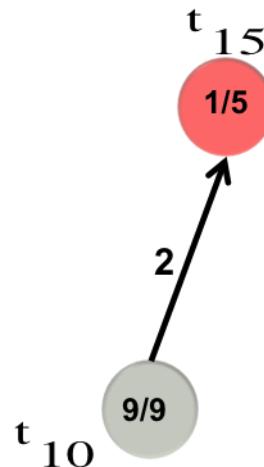


Figure A-8 : G<sub>lc</sub> / Intervention 7 en Zone 2

- Intervention 8 :

Tableau A-8 : Intervention 8, choix de zone.

Zone	Disp	Tr	Disp/Tr
1	4	4	4/4=1
2	0	0	0
3	0	0	0
4	0	0	0
5	0	0	0

**Zone = 1 (Rouge)**

**Tâches = {t<sub>15</sub>}**

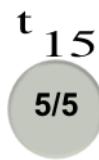


Figure A-9 : Gtc / Intervention 8 en Zone 1

- **Résultats :**

Séquence de zones visitées : ( $Z_3, Z_2, Z_4, Z_3, Z_5, Z_1, Z_2, Z_1$ ) => Longueur = 8

Séquence de réalisation de tâches : ( $t_1, t_{13}, t_2, t_4, t_3, t_{12}, t_{16}, t_9, t_{14}, t_7, t_{18}, t_{19}, t_5, t_{11}, t_6, t_8, t_{17}, t_{10}, t_{15}$ )