

**Titre:** Balancement de ligne et assignation de tâches aux employés :  
Title: modèle mathématique et application au domaine aéronautique

**Auteur:** Sophie Megret  
Author:

**Date:** 2009

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

**Référence:** Megret, S. (2009). Balancement de ligne et assignation de tâches aux employés :  
modèle mathématique et application au domaine aéronautique [Mémoire de  
maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.  
<https://publications.polymtl.ca/167/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**  
Open Access document in PolyPublie

**URL de PolyPublie:** <https://publications.polymtl.ca/167/>  
PolyPublie URL:

**Directeurs de recherche:** Jean-Marc Frayret, & Bruno Agard  
Advisors:

**Programme:** Génie industriel  
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

BALANCEMENT DE LIGNE ET ASSIGNATION DE TÂCHES AUX EMPLOYÉS :  
MODÈLE MATHÉMATIQUE ET APPLICATION AU DOMAINE AÉRONAUTIQUE

SOPHIE MEGRET

DÉPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES ET GÉNIE INDUSTRIEL  
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

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

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

BALANCEMENT DE LIGNE ET ASSIGNATION DE TÂCHES AUX EMPLOYÉS :  
MODÈLE MATHÉMATIQUE ET APPLICATION AU DOMAINE AÉRONAUTIQUE

présenté par : MEGRET Sophie

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

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

M. TRÉPANIER Martin, ing., Ph.D., président

M. FRAYRET Jean-Marc, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. AGARD Bruno, Doct., membre et codirecteur de recherche

M. CHINNIAH Yuvan, ing., Ph.D., membre

## DÉDICACE

*À tous ceux qui m'ont soutenue*

## REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tout d'abord mes directeurs de maîtrise, M. Jean-Marc FRAYRET et M. Bruno AGARD, pour leur aide (académique et financière), leur soutien et leur disponibilité durant les 2 ans passés à l'École Polytechnique de Montréal. Sans eux je n'aurais pu mener ce projet à bien.

Je souhaiterais également remercier M. André LANGEVIN pour son aide lors de la programmation de mon modèle mathématique.

Je remercie tout particulièrement mes amis pour leur soutien moral durant ces deux années au Canada. Leur bonne humeur et leurs conseils m'ont permis de me rendre jusqu'ici. Un grand merci à Lody, Julien, Damien, Polo, William, Pierre-Vincent, Benoit, Jean-Yves et tous ceux que je n'ai pas cités. Je remercie aussi ma sœur et mon père pour leur soutien durant mes études.

Enfin, je tiens à saluer l'accueil de l'École Polytechnique de Montréal, de son équipe d'encadrement des étudiants étrangers, mais aussi le personnel du département de mathématique et génie industriel pour leur aide précieuse.

## RÉSUMÉ

Depuis de nombreuses années, le balancement des lignes d'assemblage et la gestion des ressources humaines sont étudiés par la communauté scientifique. Les chercheurs développent de plus en plus de modèles mathématiques permettant de résoudre des problèmes de plus en plus complexes dans des domaines très variés. Cependant, le projet qui suit porte sur un domaine peu étudié du fait de ses particularités industrielles. Il est vrai que les lignes d'assemblage comme celle de finition intérieure dans l'aéronautique ne se comportent pas comme les lignes d'assemblage traditionnelles. Le faible volume de production est, entre autres, un critère démarquant ce type de ligne.

Ce mémoire va présenter un algorithme permettant d'assigner des tâches à des postes, mais également, un modèle mathématique assignant ces tâches à des employés spécifiques. Ces deux assignations se font sous les contraintes principales de précédence et de compétence de la main-d'œuvre. En effet, l'industrie aéronautique a besoin de main-d'œuvre très qualifiée dans des spécialités précises, n'importe quel employé ne peut exécuter toutes les tâches qui permettront de mener à bien le projet.

Lors de l'élaboration du modèle, un plan d'expérience a été développé afin de voir s'il était robuste et permettait de résoudre des problèmes de taille industrielle. Des facteurs variables ont donc été utilisés afin de couvrir au maximum la réalité industrielle, parmi eux se retrouve le nombre de spécialités sur un même poste de travail, les types d'antécédence et la durée élémentaire des tâches. L'exemple proposé par la suite a été élaboré grâce aux données industrielles fournies par une entreprise de la région. L'objectif à atteindre a été d'organiser au mieux les postes de travail en minimisant le nombre d'employés total du fait des coûts importants que cette main-d'œuvre très qualifiée engendre. La résolution du modèle mathématique s'est faite de façon exacte ce qui a engendré des limitations sur la taille des problèmes pouvant être résolus dans un temps raisonnable.

## ABSTRACT

Since many years, assembly line balancing and human resources management are studied by scientists. Researchers develop, in various contexts, more and more mathematics models to solve more and more complex problems. However, the following project deals with a part less studied due to its industrial constraints. Assembly lines like interior fittings in aerospace industry are admittedly quite different than traditional ones. The low volume of production is, as example, a criterion which makes them different.

This memoir will present an algorithm that assigns tasks to stations and a mathematic model that assigns tasks to a specific employee. Both assignments are under two major constraints: precedence and competency. Indeed, the aerospace industry needs to have really qualified employees in specific specialities. All the employees do not have the skills to complete all tasks that are necessary to succeed in fulfilling the project.

When the model was developed, an experiment plan has been drawn up to test it and see if it can solve industrial problems. Some variables were used to cover as well as possible the industrial reality. Among them, we can find the number of competencies on a station, the kind of precedence and the task time. The proposed example has been developed thanks to industrial data given by a regional company. The objective was to organize stations in minimizing as well as possible the total number of employees. Indeed, they are very expensive because of their competencies. The mathematic model was solved in an exact method, which generated some limitations on the size of the problems that have to be solved in a moderate time.

## TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE .....	iii
REMERCIEMENTS .....	iv
RÉSUMÉ .....	v
ABSTRACT .....	vi
TABLE DES MATIÈRES .....	vii
LISTE DES TABLEAUX.....	xi
LISTE DES FIGURES.....	xii
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS .....	xiv
LISTE DES ANNEXES.....	xv
INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE 1 : REVUE DE LA LITTÉRATURE .....	5
1.1    Les lignes d'assemblage .....	6
1.1.1    La ligne droite et la ligne en U.....	6
1.1.2    Comparaison .....	8
1.1.3    Conception des lignes d'assemblage.....	9
1.2    Les produits .....	10
1.2.1    Ligne mono-produit ( <i>Figure 1.3a</i> ).....	11
1.2.2    Ligne mixte ( <i>Figure 1.3b</i> ).....	11
1.2.3    Ligne multi-produit ( <i>Figure 1.3c</i> ).....	12
1.2.4    Ligne à faible production .....	12
1.3    Balancement des lignes d'assemblage.....	13
1.3.1    Problème général.....	13
1.3.2    Contraintes spécifiques .....	15

1.3.3	Objectifs .....	17
1.3.4	Méthodes .....	18
1.4	Assignation des ressources humaines.....	20
1.4.1	Planification des jours de repos .....	20
1.4.2	Planification des quarts de travail .....	21
1.4.3	Tour scheduling.....	21
1.5	Lien entre les ressources humaines et la production .....	23
1.5.1	Compétences .....	23
1.5.2	Productivité .....	24
1.6	Lien entre l'ordonnancement de production et la gestion de projet .....	25
1.7	Ordonnancement et balancement .....	26
1.8	Méthodes exactes et méthodes heuristiques pour l'assignation de personnel.....	26
1.9	Discussion .....	27
CHAPITRE 2 : DÉMARCHE DE L'ENSEMBLE DU TRAVAIL DE RECHERCHE .		29
2.1	Contexte de l'étude.....	29
2.2	Récolte et analyse des données .....	30
2.3	Définition du problème .....	32
2.4	Élaboration et programmation du modèle .....	32
2.5	Plan d'expérience .....	34
2.5.1	Les critères d'évaluation .....	35
2.5.2	Les facteurs .....	35
2.6	Élaboration du problème numérique .....	37
2.7	Résolution et analyse.....	37

CHAPITRE 3 : INTEGRATED STAFF SCHEDULING AND ASSEMBLY LINE BALANCING IN THE AEROSPACE INDUSTRY.....	39
3.1 Abstract .....	39
3.2 Introduction .....	40
3.2.1 Problem introduction.....	40
3.2.2 Definitions.....	41
3.3 Literature review .....	43
3.3.1 Assembly line balancing .....	43
3.3.2 Staff scheduling and workforce allocation in assembly systems .....	46
3.4 Problem domain and assumption.....	47
3.5 Problem formulation and procedure .....	49
3.5.1 Pre-processing (Step 1) .....	50
3.5.2 Assign activities with precedence constraints (Step 2) .....	51
3.5.3 Scheduling (Step 3) .....	54
3.5.4 Assign activities with no precedence constraint (Step 4) .....	57
3.5.5 Solution improvement (Step 5) .....	59
3.6 Experiments.....	61
3.6.1 Numerical example .....	61
3.7 Analysis and discussion.....	70
3.8 Conclusion and future research .....	72
CHAPITRE 4 : ASPECTS MÉTHODOLOGIQUES ET RÉSULTATS COMPLÉMENTAIRES.....	74
4.1 Méthodologie de résolution.....	74
4.2 Analyse critique du modèle et de la méthode de résolution.....	77
4.2.1 Assignation tâche/poste/employé (Étape 1) .....	77

4.2.2	Assignation des tâches sans précédence (Étape 3).....	78
4.2.3	Amélioration (Étape 5).....	79
4.3	Discussion des indicateurs.....	80
4.3.1	Le nombre d'employés utilisés .....	80
4.3.2	Le taux d'inactivité .....	80
4.3.3	Le temps de résolution de la phase d'optimisation.....	81
	CHAPITRE 5 : DISCUSSION GÉNÉRALE.....	83
5.1	Compétences de la main-d'œuvre.....	84
5.2	Qu'est-ce qu'une allocation et un ordonnancement réalisables ? .....	85
5.3	Le choix de la fonction objectif.....	85
5.4	Les points soulignés mais non pris en compte dans le modèle .....	86
	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS .....	90
	BIBLIOGRAPHIE .....	92
	ANNEXES .....	97

**LISTE DES TABLEAUX**

Tableau 1.1: Avantage de la ligne en U par rapport à la ligne droite .....	9
Tableau 1.2: Type de SALBP selon Becker et Scholl (2004).....	14
Tableau 1.3: Exemples de balancement de ligne dans la littérature .....	19
Tableau 1.4: Résolutions de problèmes d'assignation de personnel .....	27
Tableau 2.1: Plan d'expérience.....	36
Table 3.1: Sets I <sub>j</sub> of tasks of rank j, presented by decreasing order of task time.....	64
Table 3.2: Lower bounds per competency .....	70
Table 3.3: Result for step 4 and 5 by abilities.....	71
Table 3.4: Result step by step and by stations .....	72
Tableau B.1: Temps opératoires de chacune des tâches .....	98

## LISTE DES FIGURES

Figure 1.1:La ligne droite.....	7
Figure 1.2: Types de postes sur une ligne en U .....	7
Figure 1.3: Les différents produits .....	10
Figure 2.1: Représentation des tables de données sous Excel .....	34
Figure 3.1: Precedence graph, rank and critical path .....	42
Figure 3.2: Methodology.....	50
Figure 3.3: Procedure 1 .....	53
Figure 3.4: Procedure 2 .....	58
Figure 3.5: Procedure 3 .....	60
Figure 3.6: Tasks representation .....	61
Figure 3.7: Precedence graph.....	63
Figure 3.8: Schedule step 2, station 1 .....	65
Figure 3.9: Schedule step 2, station 2 .....	65
Figure 3.10: Schedule step 2, station 3 .....	66
Figure 3.11: Schedule step 3, station 1 .....	66
Figure 3.12: Schedule step 3, station 2 .....	67
Figure 3.13: Schedule step 3, station 3 .....	67
Figure 3.14: Schedule step 4, station 1 .....	68
Figure 3.15: Schedule step 4, station 2 .....	68
Figure 3.16: Schedule step 4, station 3 .....	68
Figure 3.17: Schedule step 5, station 1 .....	69
Figure 3.18: Schedule step 5, station 2 .....	69
Figure 3.19: Schedule step 5, station 3 .....	70
Figure 4.1: Détermination du nombre d'employés pour le rang 1 .....	74
Figure 4.2: Assignation des tâches de rang 1 .....	75
Figure 4.3: Assignation des tâches de rang 2.....	76

Figure 4.4: Première solution faisable pour le poste 1 .....	77
Figure A.1: Diagramme de précédence initial .....	97
Figure C.1: Diagramme de précédence après assignation au poste 1 .....	99

## **LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS**

ALBP	Assembly Line Balancing Problem
AMPL	A Mathematical Programming Language
GALBP	Generalized Assembly Line Balancing Problem
GRASP	Greedy Randomized Adaptive Search Procedure
MS Project	Microsoft Project (logiciel de gestion de projet)
SALBP	Simple Assembly Line Balancing Problem
TSALBP	Time and Space constrained Assembly Line Balancing Problem

## **LISTE DES ANNEXES**

ANNEXE A :	DIAGRAMMES DE PRÉCÉDENCE .....	89
ANNEXE B :	DURÉE DES TACHES .....	90
ANNEXE C :	DIAGRAMME DE PRECEDENCE POUR LE POSTE 2 .....	91

## INTRODUCTION

L'environnement économique actuel oblige les entreprises à toujours travailler plus vite tout en conservant la qualité qui fait souvent leur renommée. La compétition entre les compagnies est elle aussi accrue dans cet environnement bien que l'industrie aéronautique demeure assez épargnée puisque très peu d'entreprises se créent dans ce domaine. La sécurité est, elle aussi, un grand facteur qui constraint les constructeurs aéronautiques. Les clients, de leur côté, sont de plus en plus exigeants quant à la personnalisation de leur produit et les délais dans lesquels ils peuvent en profiter. C'est ainsi que les entreprises se retrouvent coincées entre une demande des clients souvent difficile à atteindre et des législations qui les obligent à conserver une politique de travail stricte.

L'industrie aéronautique est très différente des industries dites « classiques ». Son faible volume de production est un premier élément qui en fait un cas particulier. La durée du temps de cycle, lié au grand nombre de tâches à réaliser, est également assez symptomatique. Cependant il existe d'autres industries telles que la production d'ambulances ou d'engins de travaux publics qui peuvent s'y comparer. Dans tous ces domaines précis, la main-d'œuvre se doit d'être très spécialisée surtout concernant l'électricité et les appareils de vol (principalement la partie du cockpit). Dans ce genre d'industrie il est également impossible d'avoir des stocks de sécurité car l'espace nécessaire à cela est trop important, il faudrait doubler la taille de l'usine afin d'avoir un avion « de sécurité » entre chaque poste. Les avions passent donc d'un poste à l'autre directement lors de la fin du temps de cycle. C'est pourquoi les retards de production sont impardonnable sous peine de pénaliser la ligne entière. Enfin, il n'est pas rare que des tâches aient plusieurs contraintes à respecter, par exemple une contrainte d'antécédence et une de ressources humaines couplées, ce qui rend le problème encore plus complexe. Les contraintes sont donc, pour une grande majorité, cumulées.

Dans le milieu de l'aéronautique, les clients, souvent de grandes compagnies, sont extrêmement exigeants. Les jets d'affaires sont des produits de luxe qui leur servent souvent de vitrine et sont le lieu de nombreuses signatures de contrat. Chaque avion doit donc être personnalisé menant à l'unicité de chaque produit. Cette unicité est due à la combinatoire de l'ensemble d'options proposées par les constructeurs et est surtout visible à la sortie de la ligne d'habillage intérieur.

Les produits qui nous concernent sont des avions de petite taille pouvant transporter une dizaine de passagers, ils sont également appelés avions d'affaires puisqu'ils ne servent pas au transport commercial. Ces avions sont fabriqués sur plusieurs lignes, morceau par morceau (également appelé tronçons), sont assemblés sur une ligne d'assemblage puis sont complétés sur la ligne d'habillage intérieur. Sur cette ligne, la carlingue arrive complètement vide et ressort prête pour la livraison. Cette dernière ligne, sur laquelle porte l'étude présentée ici, est très complexe du fait des multiples options proposées par l'entreprise mais également des demandes des clients qui sont toujours très spécifiques. La ligne d'assemblage peut donc être considérée comme une ligne multi-produits puisque la production est unitaire et est toujours différente d'un avion à l'autre. Contrairement à d'autres lignes multi-produit, dans celle-ci la base de travail est toujours la même, la carlingue ne change pas d'un appareil à un autre, c'est pourquoi les infrastructures sont identiques quelque soit le produit. La différence entre deux produits est le nombre et le choix des tâches qu'il faudra effectuer pour habiller la cabine et le cockpit.

La gestion des ressources humaines et l'assignation des tâches sont deux aspects à prendre en compte simultanément du fait de leur importance dans la gestion de production.

Tout d'abord, le balancement de la ligne d'assemblage consiste à assigner les tâches à exécuter aux différents postes afin d'atteindre un objectif de production fixé. L'ordonnancement, de son côté, permet d'organiser le temps de production en assignant

les tâches aux ressources. Les notions essentielles sont : les tâches, les ressources, les contraintes et les objectifs. Les tâches sont donc des activités nécessaires au travail d'assemblage. Elles sont élémentaires et ne peuvent être divisées en plusieurs autres tâches, leur temps d'exécution est donc minimum. Les ressources correspondent aux moyens humains ou matériels permettant d'accomplir les tâches. Les contraintes sont des limites dues à l'environnement, aux clients ou à la politique de l'entreprise. Enfin, les objectifs sont les buts fixés par les managers et les dirigeants. Ils peuvent souvent être représentés comme des coûts à minimiser. Le but ici est donc d'obtenir une solution optimale aux problèmes posés que ce soit la minimisation des coûts ou la maximisation de la production.

Sur une ligne d'assemblage il existe deux grands types de ressources : le personnel et l'outillage. L'outillage est, dans le cas de l'habillage intérieur, assez secondaire. Le personnel, en revanche, doit être très spécialisé et qualifié afin de réaliser les tâches. Le coût qu'il engendre est important, essentiellement dans des pays industrialisés où le travail est soumis à de nombreuses législations. C'est pourquoi la gestion du personnel est une nécessité pour les entreprises et se doit d'être optimale.

L'objectif de ce projet de recherche est de développer et de mettre en place un modèle mathématique pour l'ordonnancement des tâches et le balancement de ligne tout en tenant compte des compétences des employés. Ce modèle se veut pratique puisqu'il a été créé à partir d'un cas réel avec la collaboration d'une entreprise de la région. Il devra permettre de gérer une ligne d'assemblage comportant plusieurs postes et plusieurs employés avec des compétences différentes.

Ce mémoire va se présenter de la façon suivante, tout d'abord une revue de la littérature sera présentée dans laquelle de nombreux aspects seront abordés afin de mieux délimiter le problème et le sujet dans ce qui a été fait jusqu'à présent tout en montrant son caractère novateur. Le chapitre 2 va permettre d'expliquer la chronologie du travail réalisé depuis le choix de la problématique jusqu'aux expérimentations et aux

résultats. L'article, en cours de révision avant sa publication, sera présenté dans le chapitre 3 tel qu'il a été proposé à la revue *International Journal of Production Research*. Le chapitre 4 reviendra sur la méthodologie utilisée pour l'assignation des tâches aux postes et formulera quelques critiques concernant les choix réalisés. Enfin, le chapitre 5 sera une discussion générale de laquelle découleront les conclusions et les travaux futurs.

## CHAPITRE 1 : REVUE DE LA LITTÉRATURE

Depuis le début du XXe siècle, de nombreux industriels ont cherché à accroître la productivité de leurs usines pour faire face à la concurrence et ainsi répondre à une demande croissante. Les plus connus sont sans doute l'ingénieur américain Frederick Winslow Taylor, son compatriote Henry Ford et plus récemment Kiichiro Toyota.

Frederick Winslow Taylor va instaurer le chronométrage des tâches simplifiées (ou indivisibles) afin de définir des cadences de travail et donc éviter la non-productivité des travailleurs, qui sont devenus de simples exécutants. De son côté, Henri Ford va introduire la notion de chaîne de production et de tapis roulant dans l'usine de montage de sa célèbre Ford T. Ces tapis vont augmenter la productivité et la production de l'entreprise en évitant des déplacements inutiles aux ouvriers. Depuis ces deux théoriciens, les usines ont beaucoup évolué et les chercheurs se sont penchés un peu plus sur des méthodes pour augmenter encore la productivité des employés et les utiliser le plus efficacement possible.

Ainsi, ce ne sont plus les moyens de production qui sont maintenant étudiés mais plutôt les employés, leurs assignations et la façon d'agencer leurs tâches. Le projet présenté ici s'inscrit dans cette continuité en étudiant les deux notions, déjà décrites dans la littérature comme nécessaires à l'optimisation de la production, le balancement de ligne d'assemblage et l'assignation du personnel.

Ces deux grandes notions seront traitées dans cette revue de littérature après la présentation des différentes lignes d'assemblage (principalement la ligne droite et la ligne en U) puis les conséquences du type produit sur l'organisation de la ligne seront soulignées. La troisième partie portera donc sur le balancement de la ligne d'assemblage et les différents modèles présents dans la littérature afin de gérer au mieux l'organisation des tâches. Le deuxième grand élément après le produit, les ressources humaines, sera introduit dans la quatrième partie. La gestion des ressources humaines est actuellement un des problèmes les plus difficiles à résoudre du fait, entre autres, de la législation et des syndicats. L'importance des ressources humaines par rapport à la production sera

mise en valeur dans le paragraphe suivant. Enfin, les différents objectifs d'optimisation présents dans la littérature, le problème mixte de gestion des tâches et des ressources humaines et les méthodes de résolution mathématique seront abordés dans la fin de cette revue des publications.

## 1.1 Les lignes d'assemblage

On recense de nombreux types de ligne d'assemblage dans l'industrie. La plus ancienne est la ligne droite où tous les postes sont les uns à la suite des autres. Chaque poste a, au maximum, 2 postes adjacents. Pour le balancement de la ligne, ce type d'agencement ne laisse pas beaucoup d'opportunités c'est pourquoi les chercheurs se sont penchés sur une ligne en proposant plus. Ainsi, Miltenburg et Wijngaard (1994) ont introduit et modélisé le problème de balancement de ligne en U. Cette ligne permet à un employé de travailler sur les deux branches du U et donc de faciliter le balancement en ajoutant des possibilités de mouvement entre les machines. D'autres types de lignes, comme la ligne en S, ont aussi été étudiées mais sont bien moins courante que la ligne droite ou la ligne en U, c'est d'ailleurs la raison pour laquelle ces autres structures de lignes ne sont pas traitées ici. La section qui suit présente donc les deux configurations les plus répandues et leurs différences.

### 1.1.1 La ligne droite et la ligne en U

La ligne droite est la ligne originelle en ce qui concerne les lignes d'assemblage ou de production. Elle est aussi celle qui a été la plus étudiée au commencement des modélisations mathématiques. Actuellement, de moins en moins de chercheurs l'utilisent mais elle reste tout de même la plus simple et est donc un bon point de départ pour les études. Cette configuration rend les déplacements, d'une machine à une autre dans un même poste, plus longs pour les travailleurs. La Figure 1.1 est une représentation d'une ligne droite comportant 9 machines réparties sur 3 postes. Les tâches sont réalisées sur les machines de gauche à droite par un seul employé par

poste. Cette configuration tend à faire penser que les stocks de matière première et de produits finis ne sont pas côté à côté.

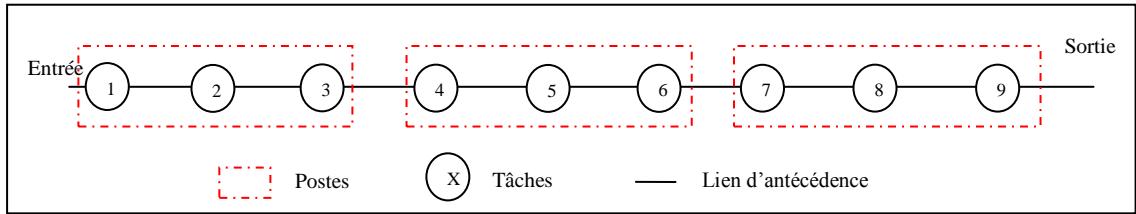


Figure 1.1: La ligne droite

Depuis Miltenburg et Wijngaard en 1994 plusieurs auteurs se sont penchés sur la ligne en U. Cette configuration engendre de nombreux bénéfices par rapport à la ligne droite traditionnelle. Elle permet l'utilisation de deux modèles de travail différent, comme le rappellent Kara et al. (2007) : le travail sur des postes successifs mais également sur des postes implantés sur l'autre branche du U (postes croisés ou crossover) comme le montre la Figure 1.2. Contrairement aux autres, Shewchuk (2008) prend en compte le déplacement des ouvriers qui peut représenter une grande perte de temps. Il propose un plan de ligne en U pour un nombre pair et impair de machines dans lequel il impose des distances fixes entre chacun des postes. De plus, ces distances permettent d'assurer un espace suffisant pour le déplacement des employés car il ne sera pas rare que les ouvriers se croisent et se gênent au centre du U lors de la réalisation de leurs tâches.

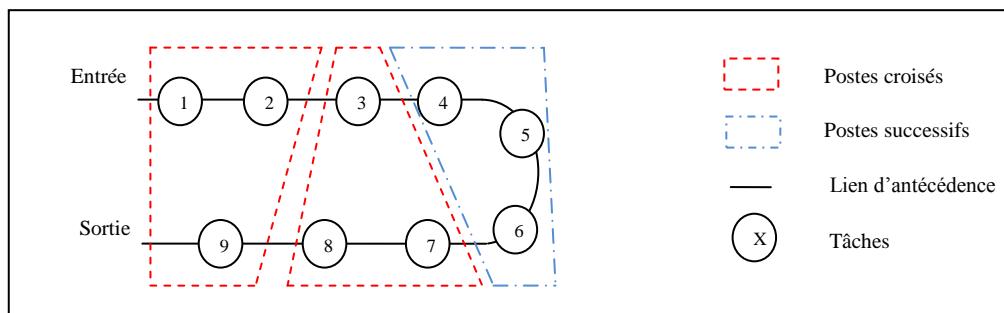


Figure 1.2: Types de postes sur une ligne en U

La Figure 1.1, tout comme la Figure 1.2, montre la disposition de 9 machines et l'assignation de 3 employés. Les postes 1 et 2 sont caractérisés par un déplacement croisé (sur les deux branches du U) alors que le poste 3 se comporte comme le modèle de ligne droite.

### **1.1.2 Comparaison**

La plupart des auteurs traitants des lignes en U donnent des avantages de cette ligne par rapport aux lignes droites. Chacun d'eux a voulu comparer la ligne en U à la ligne droite sur un point particulier.

Cheng et al. (2000) ont réalisé une étude portant sur l'impact de la forme de la ligne sur la qualité des produits. Ils prennent en compte de nombreux paramètres tels que la distance parcourue, le nombre de points de contact entre les opérateurs, le nombre de points d'inspection du travail, la probabilité de détecter un problème lié à la qualité... Bien que la qualité soit, d'après eux, améliorée dans le cas d'une ligne en U, ils soulignent surtout l'importance des postes croisés. Sans eux, la ligne en U n'est qu'une ligne droite courbée. Le seul avantage serait donc d'avoir le point d'entrée et de sortie au même endroit. Ce qui peut être un grand avantage dans les usines dont les produits sont très importants en termes de taille (l'industrie aéronautique par exemple) puisqu'il ne suffirait que d'une seule immense porte pour faire entrer et sortir les produits.

Aase et al. (2004) se sont, pour leur part, penchés sur l'impact de la forme de la ligne sur la productivité. Ils soulignent que le croisement des employés dans le centre du U lorsqu'ils changent de machine pourrait diminuer la productivité. Leurs recherches montrent que même si le passage de la ligne droite à la ligne en U peut augmenter la productivité, il n'est pas obligatoire que cela soit le cas. Dans 77 % de leurs expériences, l'accroissement a été faible, voire nul. Ce qui prouve que même si la ligne passe d'un modèle à l'autre il ne faut pas négliger tout le travail de design et de balancement car la ligne en U seule n'améliorera rien.

Le Tableau 1.1 ci-dessous donne plusieurs avantages, trouvés dans la littérature, de la ligne en U comparativement à la ligne droite.

**Tableau 1.1: Avantage de la ligne en U par rapport à la ligne droite**

<b>Avantages de la ligne en U sur la ligne droite</b>	
Kara et al. (2007)	Cohabitation de deux types de poste Stocks de matière première et de produits finis au même endroit
Scholl et Klein (1999)	Augmentation des aptitudes des employés dues à leur proximité Entraide plus facile Plus grande efficacité de la ligne
Monden (1983)	Flexibilité pour changer le nombre d'employés selon la demande
Hirano (1988)	Réduction des en-cours
Cheng et al. (2000)	Variabilité du taux de production lors de l'augmentation ou la diminution du nombre d'opérateurs Distance entre les postes réduite Plus de possibilités de regroupement de tâches donc moins de postes Taille compacte Pas de lot de production 4 types d'orientation possibles Communication accrue entre les opérateurs Vérification du travail plus présent en cas de poste croisé
Aase et al. (2004)	Plus de possibilités d'assignations de tâches
Erel et al. (2005)	Meilleure en termes de coût total pour le problème de balancement de ligne stochastique

### **1.1.3 Conception des lignes d'assemblage**

Le problème de conception des lignes d'assemblage est un problème moins traité dans la littérature que le problème unique de balancement ou de planification. Falkanauer (2005) tente de décrire les points sur lesquels les chercheurs, principalement en recherche opérationnelle, ont fait l'impasse. En effet, il est bien plus facile d'imaginer créer une ligne plutôt que de travailler sur une qui est déjà existante puisque les contraintes sont bien plus importantes. Rekiek et al. (2001) proposent une description des différentes étapes à suivre lors de la conception d'une ligne. L'optimisation de la

ligne se fait grâce à un algorithme génétique qui ne peut assurer l'optimalité de la solution mais reste un très bon outil de support pour les concepteurs. Ce problème, moins complexe, peut se gérer avec les outils définis pour les lignes existantes tant qu'il ne s'agit pas de choisir un lieu d'implantation ou une configuration.

Battini et al. (2007) listent les différents auteurs dans ce domaine et classifient leurs recherches selon le type de ligne étudiée. Leur recherche s'est portée sur la configuration de ligne d'assemblage semi-automatisée grâce à des convoyeurs circulaires rotatifs.

## 1.2 Les produits

Dans cette partie, l'impact des produits et du type de production sur le balancement et l'étude des lignes d'assemblage va être souligné.

Trois types de production sont présents dans l'industrie et donc dans la littérature. La Figure 1.3 présente les lignes d'assemblage pour les produits uniques ou multiples.

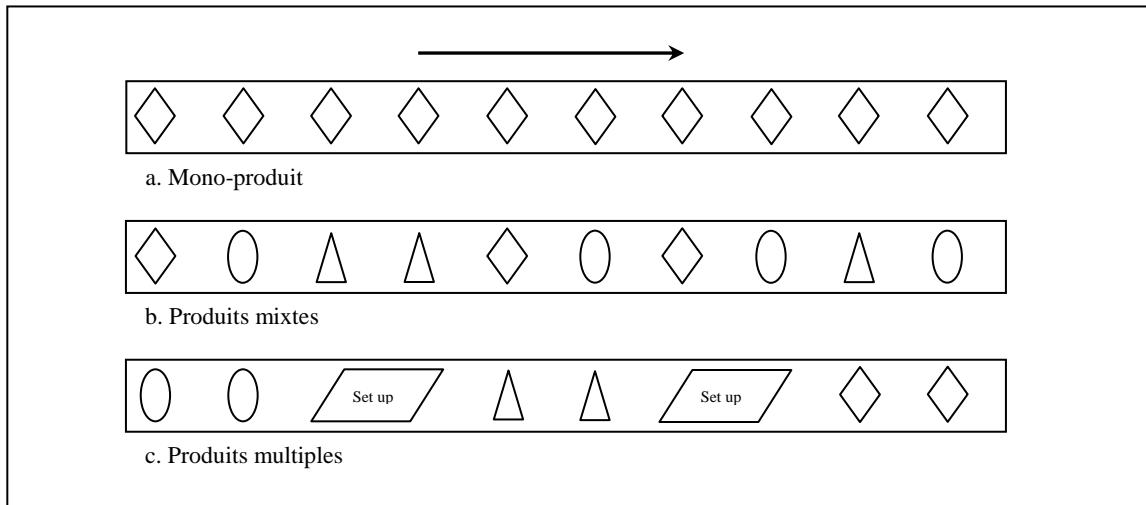


Figure 1.3: Les différents produits

Cette figure montre les trois grands types de production sur une ligne d'assemblage. Tout d'abord, la ligne mono-produit ne permet de fabriquer, comme son nom l'indique, qu'un seul type de produits. Le deuxième schéma représente la ligne de produits mixtes qui permet la réalisation de plusieurs produits assez identiques. Enfin, la

ligne de produits multiples permet l'élaboration de plusieurs produits différents. Une ligne d'embouteillage de sirop serait un bon exemple pour cela. En effet, à chaque changement de goût il est nécessaire de changer de cuve et de nettoyer tous les tuyaux d'où la nécessité de produire par lot puisque le temps de réglage (changement de cuve et nettoyage) peut s'avérer long.

### **1.2.1 Ligne mono-produit (*Figure 1.3a*)**

Becker et Scholl (2004) la définissent comme une ligne où un unique produit est assemblé et donc toutes les pièces sont identiques. Cette configuration n'est plus la plus répandue du fait de la demande croissante des clients en produits personnalisables. Boysen et al. (2008) vont dans ce sens en précisant qu'un produit sans aucune variation n'est que très rarement attractif c'est pourquoi ce type de ligne n'est plus rentable. Si les produits ne nécessitent pas de mise en course ou que leur temps opératoire ne varie pas d'un modèle à l'autre alors Boysen et al. (2008) tendent à considérer la ligne comme une ligne mono-produit.

La facilité que cette ligne apporte dans l'étude du balancement fait d'elle une des lignes les plus étudiées. En effet, contrairement aux deux autres types de lignes, il n'est pas nécessaire d'étudier l'ordre dans lequel les produits sont fabriqués puisqu'il n'y en a qu'une sorte (Boysen et al., 2008).

### **1.2.2 Ligne mixte (*Figure 1.3b*)**

Boysen et al. (2007) décrivent la ligne mixte comme une ligne sur laquelle sont fabriqués des produits semblables pour lesquels les temps de mise en course sont négligeables ou inexistantes.

Becker et Scholl (2004) soulignent qu'il est impossible pour ce type de ligne d'avoir des postes dont le temps de cycle et le besoin en équipement soient le même quelque soit le modèle de produit. C'est pourquoi, d'après eux, la ligne doit être plus flexible que la ligne ne produisant qu'un seul et même type de produits. Ce type de production entraîne souvent un problème d'ordonnancement de produit qui consiste à

trouver une séquence de production optimale afin de couvrir la demande dans le temps imparti.

### **1.2.3 Ligne multi-produit (*Figure 1.3c*)**

Cette ligne réalise également des produits variés, comme l'expliquent Andrès et al. (2008) mais, cette fois-ci, le temps de mise en course n'est plus négligeable c'est pourquoi il est nécessaire de recourir à la production par lot. Boysen et al. (2007) lient ce problème au problème de séquencement mais également à celui du choix de la taille de lot. Cependant, il y a rarement un nombre important de produits différents sur une même ligne. La ligne que Pastor et al. (2002) étudient en comporte quatre. Leur méthode de balancement utilise quatre heuristiques et deux méthodes de recherche taboue.

### **1.2.4 Ligne à faible production**

Peu d'auteurs se sont penchés sur le problème des lignes d'assemblage ou de production de faible volume. Souvent ce sont des produits très spécifiques ou très gros qui y sont fabriqués tels que les ambulances ou les avions (Heike et al., 2001).

Becker et Scholl (2004) proposent pour les produits de grande taille de séparer le produit en deux et d'affecter une tâche par côté d'exécution. Un exemple de cela serait de prendre une voiture que l'on séparerait dans le sens de la longueur, il serait donc possible de monter simultanément le pneu avant gauche et le pneu avant droit. Ainsi, les coûts de déplacement des employés seraient réduits. Dans l'industrie aéronautique, les tâches sont plutôt séparées par tronçons (Heike et al., 2001).

Comme le montrent Gronalt et Hartl (2003) et Heike et al. (2001) les lignes à faible volume de production sont souvent des lignes de produits mixtes. Que ce soit les camions ou les avions, la structure reste la même mais les options changent. Il y a donc des produits qui demandent bien plus de travail que d'autres d'où la nécessité du séquencement des produits afin de ne pas avoir plusieurs produits compliqués d'affilés qui ralentiraient la production.

## 1.3 Balancement des lignes d'assemblage

Comme cela a été défini précédemment, le balancement de ligne consiste à assigner les tâches à réaliser aux différents postes de la ligne afin d'atteindre le volume de production sous des contraintes données. Il existe plusieurs types de balancement de ligne selon les données disponibles et les objectifs fixés.

### 1.3.1 Problème général

Le problème général de balancement de ligne comporte trois types de sous-problèmes se différenciant par leurs hypothèses de départ. Tout d'abord l'ALBP (*Assembly Line Balancing Problem*) puis le SALBP (*Simple Assembly Line Balancing Problem*) qui comme son nom l'indique est le problème simplifié et enfin le GALBP (*Generalized Assembly Line Balancing Problem*) dont les contraintes ont été réduites afin d'englober le maximum de problème industriel et donc de se généraliser.

#### 1.3.1.1 ALBP

D'après Scholl et Becker (2006), le principe de tout ALBP (*Assembly Line Balancing Problem*) est de trouver un balancement de ligne réalisable, soit une assignation pour chaque tâche à un seul poste tout en garantissant le respect des contraintes de précédence et de toutes autres restrictions existantes sur la ligne.

La première modélisation par Salveson en 1955 a lancé la recherche sur ce sujet (Boysen et al., 2007).

#### 1.3.1.2 SALBP

De nombreux auteurs ont centré leurs recherches concernant le balancement de ligne d'assemblage sur la modélisation et la résolution du problème de balancement de ligne d'assemblage simple (SALBP). Scholl et Becker (2006), Boysen et al. (2007), parmi d'autres, ont listé les hypothèses de ce problème. Selon les auteurs, de légères variations peuvent intervenir. Ils proposent :

- Production de masse d'un seul produit homogène
- Toutes les tâches sont réalisées selon un procédé prédéterminé (il n'y a pas d'autre alternative possible)
- Ligne cadencée avec un temps de cycle commun basé sur la quantité à produire
- La ligne est considérée comme droite sans postes affluents ou parallèles
- La séquence de tâches est sujette à des contraintes de précédence
- La durée des tâches est connue, fixe (déterministe) et entière
- Il n'y a pas de contraintes d'affectation outre les contraintes de précédence
- Une tâche ne peut pas être divisée entre deux postes ou plus
- Tous les postes sont équipés avec les mêmes ressources matérielles et humaines

Becker et Scholl (2004) font part des différentes versions du SALBP dépendant des données et de l'objectif et les regroupent dans le tableau suivant :

**Tableau 1.2: Type de SALBP selon Becker et Scholl (2004)**

Temps de cycle $c$		
Nombre $m$ de postes	Donné	À minimiser
Donné	SALBP-F	SALBP-2
À minimiser	SALBP-1	SALBP-E

Ce tableau décrit donc les quatre grands problèmes du SALBP. Tout d'abord, le SALBP-F est un problème de faisabilité puisque le temps de cycle et le nombre de postes sont donnés. Les problèmes 1 et 2 ont pour but de minimiser, respectivement, le nombre de postes ou le temps de cycle en ayant l'autre paramètre fixé. Enfin, le SALBP-E est le problème le plus général puisqu'il cherche à minimiser le temps de cycle (ce qui revient à maximiser le taux de production) tout en minimisant le nombre de postes (Scholl et Becker 2004).

### 1.3.1.3 GALBP

Le problème généralisé (GALBP) est le deuxième type de balancement étudié. Les chercheurs sont moins nombreux à étudier ce problème qui est plus compliqué que le précédent du fait de la relaxation de nombreuses contraintes. Ces relaxations augmentent la difficulté du problème tout en le rendant plus proche de la réalité. Boysen et Fliedner (2008) proposent un algorithme pour résoudre ce problème, ils prennent en compte, pour la partie GALBP, des postes en parallèle, des tâches en parallèle, des alternatives aux procédés, des restrictions d'espace, des temps opératoires variables, de la disposition de la ligne (en U par exemple)...

L'une des modifications les plus régulières du SALBP est la variabilité du temps d'exécution des tâches. Becker et Scholl (2004) l'expliquent par l'instabilité de l'être humain (la motivation, les compétences ou l'apprentissage par exemple).

### 1.3.2 Contraintes spécifiques

Pour plusieurs auteurs, la ligne d'assemblage ne se limite pas à de simples contraintes de précédences. Ils souhaitaient rajouter au problème académique déjà très étudié de nouvelles contraintes, rendant ainsi le problème plus réaliste. Une liste très brève est présentée ici, la méthode de résolution sera, pour sa part, présentée dans un autre paragraphe.

Tout d'abord Kara et al. (2007) ainsi que Chiang et al. (2007) se sont penchés sur le balancement des lignes en U. Ce balancement, introduit par Miltenburg et Wijngaard en 1994, est plus compliqué puisqu'il prend en compte le fait que les ouvriers peuvent se déplacer d'un côté à l'autre des branches du U. Chiang et al. (2007) vont encore plus loin dans le problème en proposant un balancement de ligne en U multiple.

Les problèmes industriels servent souvent à illustrer les nouveaux concepts de la littérature. Corominas et al. (2008) se penchent sur un problème plus industriel encore, puisqu'il s'agit de rebalancer une ligne d'assemblage de moto. Cette usine doit embaucher de nouveaux ouvriers à cause d'une demande très saisonnière, il s'agit donc de gérer la ligne avec des employés qualifiés et connaissant les tâches mais également

avec des ouvriers débutants. Les contraintes sont telles que seulement un sous-ensemble de tâches peut être réalisé par les employés temporaires, de plus un employé permanent doit toujours être présent à côté d'un saisonnier. Enfin, une contrainte d'incompatibilité est présente pour ne pas avoir de tâches salissantes proches de tâches dites « propres ».

Une des contraintes dans la résolution des problèmes dont les auteurs se préoccupent peu est la contrainte d'espace. Bautista et Pereira (2007) la prennent en compte en y associant une contrainte de temps. Ils introduisent la notion de TSALBP (*Time and Space constrained Assembly Line Balancing Problem*). Les contraintes d'espace peuvent être assez diverses, la plus évidente, mais qui ne doit pas être ignorée, est la longueur limitée de la ligne d'assemblage. Ce problème, comme ceux vus dans le paragraphe précédent, peut se décliner en plusieurs autres selon les données et les objectifs. Ainsi, 8 variantes sont présentées, un problème de faisabilité, trois mono-objectifs et quatre multi objectifs. Dans leur modèle, une troisième variable fait son apparition en plus des deux précédentes : l'espace disponible.

Dans l'étude actuelle, les produits sont très volumineux. Dimitriadis (2006) s'est penché sur le travail de plusieurs ouvriers sur un même produit et à un même poste. Pour cela, il explique la nécessité d'établir préalablement le nombre d'ouvriers pouvant travailler en même temps sur un produit sans se gêner ainsi que le sous-espace à assigner à chacun.

Enfin, Miralles et al. (2008) présentent le problème de centre pour personnes handicapées. Dans ce cas précis, la durée des tâches dépend de la personne qui l'exécute. Une autre des contraintes à respecter est l'incapacité de certaines personnes à réaliser certaines tâches du fait de leur handicap. L'objectif est aussi différent des cas traditionnels car ici le travail de tous est privilégié et seul le temps de cycle est à minimiser, la notion de coût du personnel est un peu plus secondaire.

### 1.3.3 Objectifs

Afin de mener à bien tout projet d'optimisation, des objectifs doivent être fixés. C'est pourquoi Boysen et al. (2007) dans leur classification des lignes d'assemblage jugent important de faire état des principaux objectifs que l'on retrouve dans les problèmes de balancement de ligne. Parmi eux se trouvent :

- La minimisation du nombre de postes
- La minimisation du temps de cycle qui est assimilable à la maximisation du taux de production
- La maximisation de l'efficacité de la ligne
- La minimisation des coûts
- La maximisation des profits
- Le lissage des temps de travail à chaque poste (valable pour les lignes à produits mixtes ou multiples)

Becker et al. (2004) font également état de plusieurs cas, tout d'abord les modèles orientés vers les coûts (équipement, salaire, inventaire...), les profits, la capacité, le temps, puis ils traitent des exemples de problème ayant pour objectif la maximisation de l'efficacité, la minimisation de la surcharge de travail, la minimisation des temps morts...

Ces listes ne sont pas exhaustives, chaque problème a son objectif propre. Le tableau 3 dresse une liste de plusieurs articles traitants du balancement de ligne. Pour chacune de ces publications, la méthode et les objectifs pour la résolution du problème sont présentés.

### 1.3.4 Méthodes

Une fois le problème posé et les objectifs définis il reste à définir la méthode de résolution. Pour cela, on trouve dans la littérature deux méthodes différentes : la méthode exacte et la méthode heuristique. La méthode exacte est optimale mais peut demander beaucoup de temps, les exemples les plus importants, résolus avec cette méthode, comportent en général près de 25 tâches (Erel et al., 2005). La méthode heuristique, de son côté, ne permet pas toujours d'obtenir la solution optimale mais le temps de résolution peut être contrôlé.

Boysen et al. (2007) recensent les différentes méthodes trouvées dans la littérature, tout d'abord les méthodes exactes : la programmation dynamique, le Branch-and-Bound, l'approche par graphe, le Branch-and-Cut, la génération de colonne et l'approche par énumération. Les méthodes heuristiques sont pour leur part : la recherche taboue, l'algorithme génétique, le recuit simulé, l'approche en colonie de fourmis et la méthode GRASP. Le tableau ci-dessous fait état de plusieurs problèmes, pour chacun il est précisé sa méthode de résolution et les objectifs du problème.

**Tableau 1.3: Exemples de balancement de ligne dans la littérature**

Auteurs	Heuristique	Exacte	Objectifs ou remarque
Chiang et al. (2007)		Branch-and-Bound	Minimiser les coûts
Gökcen et Erel (1998)		Binaire	Minimiser le nombre de postes utilisés
Miralles et al. (2008)		Branch-and-Bound	Minimiser le temps de cycle
Dimitriadis (2006)	Modification de Hoffmann		Minimiser les temps morts
Bautista et Pereira (2007)	Ant algorithm		Minimiser le temps de cycle ou le nombre de postes ou l'espace disponible ou plusieurs en même temps
Corominas et al. (2008)		Binaire	Minimiser le nombre de postes où sont les employés temporaires
Scholl et Becker (2006)	X	X	État de l'art
Ponnambalam et al. (1999)	X		Comparaison des heuristiques
Erel et al. (2005)	Beam search		Minimiser les coûts
Pastor et al. (2002)	Taboue		Minimiser le taux de production, atteindre un temps de cycle identique pour tous les produits, atteindre une charge de travail égale pour tous les postes et minimiser la répartition des tâches pour chacun des différents modèles

## 1.4 Assignation des ressources humaines

L’assignation des ressources humaines est utilisée dans de nombreux types d’entreprises mais certaines l’utilisent plus que d’autres. Celles-ci sont principalement les systèmes de transport (compagnie aérienne, trains...), les centres d’appel téléphonique, les centres de santé (hôpitaux, regroupement d’infirmières...), les services de protection et d’urgence (ambulance, police et service incendie...) et de nombreux autres secteurs d’activité (Ernst et al., 2004).

Trois grands types d’ordonnancement des ressources humaines sont présentés dans la littérature, chacun d’eux prenant en compte des contraintes différentes et ayant des objectifs différents.

### 1.4.1 Planification des jours de repos

Ce premier type d’ordonnancement prend en compte les jours de congé des travailleurs. Il permet à une entreprise travaillant sept jours sur sept de gérer tous ses employés afin de continuer à avoir une production égale à tout moment. Baker et Magazine (1977) résolvent ce problème en prenant en compte deux types de gestion hebdomadaire soit : deux jours de congé par semaine ou deux jours de congé consécutifs par semaine ; et deux types de gestion mensuelle soit : les deux premières fins de semaine puis quatre jours dans les deux autres semaines de congés ou les deux premières fins de semaine puis deux fois deux jours consécutifs dans les deux semaines suivantes. Dans chaque cas, un nombre minimal d’employés est requis pour la semaine et les fins de semaine afin d’atteindre la demande. De nombreux autres auteurs tels que Burn et Carter (1985) ont repris la même idée en étudiant des cas où la demande en personnel est différente entre la semaine et la fin de semaine. Pour eux chaque travailleur a deux jours de congé par semaine et ne peut travailler plus de six jours consécutifs.

Une autre façon de voir le problème est proposée par Grabot et Letouzey (2000). Ils utilisent non pas les cycles de travail mais le volume horaire et se préoccupent plus de la gestion des temps de pause dans une journée de travail.

### **1.4.2 Planification des quarts de travail**

Ce deuxième type d'ordonnancement consiste à gérer, comme son nom l'indique, les quarts de travail. La première formulation mathématique de ce problème a été faite par Dantzig en 1954.

La gestion de ces quarts de travail se fait souvent en plusieurs étapes comme le rappelle Castillo et al. (2009). La première étape reste la connaissance de la demande puis le calcul de la quantité de main-d'œuvre selon la demande, s'en vient par la suite la planification des quarts de travail puis la vérification pour atteindre les objectifs. Plusieurs auteurs tiennent compte de contraintes qui peuvent être jugées facultatives comme Sabar et al. (2008) pour qui la préférence des employés dans la constitution des quarts est importante. Ces préférences portent sur la durée des quarts de travail, les tâches assignables et le nombre de transferts entre les activités.

Comme pour le balancement de ligne, les objectifs prennent une part importante dans la recherche d'une solution acceptable. C'est pourquoi la littérature met de nombreux objectifs en avant. Easton et Rossin (1996) proposent un modèle minimisant le cout de gestion du système, alors que Mohan (2007) se préoccupe des préférences des employés. Dans son tutoriel, Blöchliger (2004) propose plusieurs objectifs pouvant être pris en considération, parmi eux le coût d'une solution (soit la somme de toutes les assignations de personnel à un quart de travail) que l'on retrouve aussi chez Sabar et al. (2008), l'équité (certains quarts étant impopulaires ne doivent pas toujours être donnés à un même groupe de personnes) et enfin la violation de certaines contraintes.

### **1.4.3 Tour scheduling**

Ce dernier type de problème d'assignation de personnel est la réunion des deux problèmes précédents. Ce problème est vraisemblablement le plus résolu par les entreprises, cependant de nombreuses simplifications sont faisables. Par exemple pour certaines entreprises les jours de travail sont fixes, en général du lundi au vendredi, le problème se résume donc à un problème de gestion des quarts de travail. Pour d'autres,

ce sont les quarts de travail qui sont fixes, le problème se retrouve n'être qu'un problème de gestion des jours de congé.

Les entreprises dont la demande est constante sont aussi des entreprises pour lesquelles ce problème est simplifié car il ne sera résolu qu'une seule fois pour une grande période et ne consistera qu'à des ajustements si des employés se font licencier ou embaucher.

Cependant, il est possible que malgré ces simplifications il soit nécessaire de résoudre ce problème. En effet, Mohan (2007) s'est penché sur le problème des ouvriers à temps partiel. Il souligne que ce problème n'est pas solvable avec les algorithmes utilisés pour les travailleurs à temps complet car les contraintes ne sont pas les mêmes, il propose donc une nouvelle formulation prenant en compte également les préférences des employés. D'après lui, les employés auront plus envie de travailler pour une entreprise qui prend en compte leurs choix. Il dénonce aussi la recherche que font les entreprises pour minimiser le nombre d'employés à temps partiel.

Soumis et al. (2005) présentent la gestion des horaires et l'affectation du personnel selon deux groupes, le travail par tâches non interruptibles et le travail par tâche interruptibles ; dans ce dernier un employé peut être remplacé à tout moment par un autre. Pour chacune des deux catégories, ils proposent un modèle et des méthodes de résolution afin d'optimiser le travail et donc d'obtenir des équipes plus productives. Pour les tâches non interruptibles, la programmation en nombre entier est proposée puis résolue par la génération de colonne. Le problème de tâche interruptible reste assez simple puisqu'il n'est pas obligatoire d'utiliser un nombre entier de tâches par quarts de travail.

Mercier, Benoist et al. et Jacquet-Lagrèze (2005) ont présenté un problème dans un domaine particulier (horaires d'équipage aérien, centre d'appel téléphonique et horaire de chauffeur de bus) traitant de planification de ressources humaines. Chacun d'eux a présenté une ou des méthodes permettant de résoudre les problèmes, elles sont pour la plupart heuristiques.

Ernst et al. (2004) soulignent que plusieurs logiciels d'aide à la planification sont commercialisés mais ont souvent été développés pour un domaine industriel en particulier et ne peuvent pas toujours être utilisés pour d'autres industries.

## 1.5 Lien entre les ressources humaines et la production

Les ressources humaines jouent un grand rôle sur la production. En effet, ce sont les premiers acteurs du bon déroulement de la production tel que cela a été établi par les gestionnaires. Leurs compétences, leur facilité à travailler en groupe ou leur sérieux sont déterminant pour atteindre les objectifs fixés c'est pourquoi il est tant nécessaire de s'en préoccuper.

### 1.5.1 Compétences

Il n'est pas rare qu'une ligne d'assemblage doive se munir de personnel avec certaines compétences particulières. Sur les lignes automobiles ou aéronautiques, deux corps de métiers sont quasiment obligatoires : les mécaniciens et les électriciens.

La réalité industrielle fait que la compétence du personnel joue sur le temps d'exécution, cependant les chercheurs utilisent souvent un modèle où tous les employés ont les mêmes compétences et donc où le temps de tâche est indépendant des employés. Erel et al. (2005) proposent pour être plus proche de la réalité d'utiliser au moins trois niveaux de compétences et donc d'indexer le temps d'exécution sur celles-ci. Le terme compétence peut être vu sous deux angles différents. Il peut représenter la spécialisation d'un employé (électricien, mécanicien...) ou la connaissance qu'il a du travail, en effet un employé juste embauché travaillera moins vite qu'un autre présent dans l'entreprise depuis plusieurs années.

Les compétences ne sont donc pas uniquement liées au temps de réalisation mais également à la capacité de réaliser les tâches. Miralles et al. (2008) étudient le cas d'un centre de production employant des personnes handicapées, l'assignation des tâches est préétablie du fait de leur handicap. En effet, certaines tâches ne peuvent être effectuées par certains travailleurs, par exemple soulever des charges pour une personne en fauteuil

roulant. De leur côté Sabar et al. (2008) présentent un modèle tenant compte des compétences de chacun des employés afin de n'assigner que des gens compétents à une tâche. Dans le même objectif, Blöchliger (2004) donne l'exemple dans son tutoriel d'un hôpital dans lequel chaque personne a des compétences et donc un groupe de tâches qui lui sont assignables.

## 1.5.2 Productivité

### 1.5.2.1 Variation des temps de tâche

L'effet le plus mesurable sur le taux de production est la variabilité du temps opératoire de chaque tâche. En effet, plusieurs éléments entrent en jeu et font que ce temps peut être plus ou moins long. Plusieurs raisons sont citées par les auteurs pour expliquer cette variation du temps d'exécution des tâches. Becker et al. (2004) parlent de variabilité de l'être humain, ils mettent en cause la motivation, les compétences et l'effet d'apprentissage afin d'expliquer la fluctuation des temps de tâche. Toksari et al. (2008) traitent de l'effet d'apprentissage qui a lieu lorsque les employés exécutent une tâche régulièrement. Après un certain moment, ils s'habituent et réalisent cette tâche plus rapidement, le temps de tâche varie. Ceci est remarquable pour les tâches très répétitives.

Enfin, Corominas (2008) fait part de l'importance d'embaucher des travailleurs temporaires, et donc non qualifiés, lorsque la demande augmente sur une courte période (cela se produit sur des produits saisonniers par exemple). Dans ce cas, il est normal de constater une augmentation du temps d'exécution des tâches que ces intérimaires ont à réaliser. D'après lui, certaines entreprises instaurent un coefficient de 2 entre le temps d'exécution d'un employé normal et celui d'un employé temporaire.

### 1.5.2.2 Travail en groupe

Il n'est pas rare que les gestionnaires aient à gérer le problème du travail d'équipe, Falkenauer (2005) s'est penché sur ce problème assez compliqué. Il fait part de plusieurs points pour lesquels les employés, ou plutôt la mauvaise gestion des

employés joue sur la productivité de la ligne. Tout d'abord lorsqu'une tâche requiert plusieurs employés, il est nécessaire de gérer les plannings des ouvriers pour faire en sorte que l'un des deux ne se retrouve pas à ne rien faire pendant un temps important. Il expose aussi le problème des groupes d'ouvriers tout comme l'a fait Dimitriadis (2006). Falkenauer souligne le fait que le temps à un poste où un ouvrier est seul est la somme des temps des tâches qu'il a à accomplir mais dans ce cas il faut tenir compte des employés les plus lents. De ce fait, le temps total est donc plus long. De plus, ces deux auteurs soulignent le fait que les précédences des tâches font qu'il est possible d'avoir des temps morts inévitables pour certains employés. Dimitriadis indique l'obligation préalable de se poser la question du nombre maximum de personnes dans une section physique pour qu'ils ne s'empêchent pas de travailler.

Encore une fois, l'importance de la bonne gestion des travailleurs temporaires est soulignée par Corominas et al. (2008), dans son étude il est imposé que pour tout travailleur temporaire il y ait un travailleur permanent pour lui fournir de l'assistance en cas de problème. Les employés permanents vont laisser leur travail si cela est nécessaire et donc prendre du retard.

## **1.6 Lien entre l'ordonnancement de production et la gestion de projet**

Il existe un lien non négligeable entre le balancement de ligne et la gestion de projet. En effet, un projet est en fait une suite de tâches à exécuter dans un ordre plus ou moins établi et demandant une quantité de ressources précises. Giard (2003) décrit le modèle traditionnel « comme une séquence d'étapes successives confiées à des experts différents ». De plus, il stipule que le projet a été créé pour résoudre des problèmes de type unitaire. Ces problèmes peuvent être assimilés aux produits à faible volume de production pour lesquels il est obligatoire d'avoir des employés spécialisés pour accomplir les tâches. L'ordonnancement de projet vise à atteindre les objectifs de délais, de coûts et de performances techniques tout comme dans une usine de production.

Artigues et al. (2008) décrivent un problème de gestion de projet dans lequel trois approches selon la connaissance des perturbations liées aux ressources sont étudiées, en effet il est possible qu'un employé soit absent ce qui perturbe tout le projet. Dans ce problème  $n$  activités doivent être programmées pour  $m$  ressources. En gestion de projet, il n'est pas rare que le nombre de ressources soit donné en fonction du temps. L'exemple fourni par ces auteurs montre un contrat de maintenance, pour cela un nombre de personnes doit être mobilisé à une certaine période. Ici aussi les employés peuvent avoir plusieurs compétences alors qu'une tâche n'en demande qu'une seule.

## 1.7 Ordonnancement et balancement

Comme cela a été montré précédemment de nombreux auteurs traitent de l'ordonnancement du personnel mais pour la plupart, tels que Gronalt et Harlt (2003), Sabar et al. (2008), Schewchuk (2008), ils ne considèrent que la partie de planification et non toute la partie d'ordonnancement de production. Ces auteurs prennent un modèle pour lequel le balancement de ligne a déjà été réalisé.

## 1.8 Méthodes exactes et méthodes heuristiques pour l'assignation de personnel

Tout comme pour les autres problèmes évoqués dans les sous-parties précédentes, le choix de la méthode de résolution est important. La résolution des problèmes d'assignation de personnel se fait selon les deux grandes méthodes vues au préalable, la méthode exacte et la méthode heuristique. Ces méthodes ont les mêmes caractéristiques que pour le balancement de ligne.

Le Tableau 1.4 expose pour plusieurs publications la méthode de résolution.

De ces publications, il ressort que seulement un petit nombre d'entreprises utilisent réellement des algorithmes mathématiques pour la planification. Un certain écart se retrouve entre les recherches académiques et le monde industriel. Boysen et al. (2007) expliquent cela en premier lieu par le fait que les chercheurs n'ont pas réellement étudié le vrai problème industriel puis par le fait que le problème couvert n'est pas

toujours résolu jusqu'à un résultat satisfaisant, enfin les résultats scientifiques ne sont pas souvent généralisables à tous les problèmes industriels. Il en va de même dans le balancement de ligne comme le souligne Falkenauer (2005).

**Tableau 1.4: Résolutions de problèmes d'assignation de personnel**

Auteurs	Exacte	Heuristique
Easton et Mansour (1999)		X algorithme génétique
Ernst et al. (2004)	X	X
Miralles et al. (2008)	X Branch-and-Bound	X
Blöchliger (2004)	X Programmation linéaire en nombre entier	X Recherche taboue, algorithme génétique, recuit simulé
Easton et Rossin (1996)		X Programmation par but
Mohan (2008)	X Branch-and-Bound	
Gronalt et Hartl (2003)	X	
Miltenburg (2002)		X Algorithme génétique
Sabar et al. (2008)	X	
Shewchuk (2006)	X	

## 1.9 Discussion

Cette revue de la littérature a permis de mettre notre problème dans le contexte de la recherche académique. Maintenant, beaucoup de choses sont remarquables telles que l'utilisation d'une ligne en U pour des questions de place, l'utilisation d'heuristique pour résoudre des problèmes de taille industrielle, etc.... Les choix faits par la suite sont souvent guidés par un besoin de simplicité comme cela a été également fait dans la littérature. Les problèmes industriels sont souvent bien trop compliqués et demandent la prise en compte de nombreuses contraintes afin d'être résolus. Ces contraintes peuvent

être, pour un petit nombre, relaxées, c'est pourquoi avant de se lancer dans la résolution d'un problème de balancement ou d'assignation il est nécessaire d'étudier la ligne en questions et de ne pas seulement se fier à l'avis des gestionnaires.

## CHAPITRE 2 : DÉMARCHE DE L'ENSEMBLE DU TRAVAIL DE RECHERCHE

La revue de littérature a montré que de nombreux auteurs se sont penchés sur des problèmes similaires au nôtre mais sans jamais combiner les différentes dimensions. Chacun ne prend en compte qu'un seul des différents aspects liés à la problématique de ce projet. Aucun d'eux ne traite simultanément du balancement de ligne et de l'assignation de tâches aux employés. L'étude réalisée ici porte sur une industrie assez particulière que peu d'auteurs ont étudiée. Le fait de travailler sur des produits de grande taille dont le volume de production est faible et tous différents les uns des autres est également assez peu étudié.

Le problème présenté ici doit prendre en compte les plannings des employés, l'assignation des tâches aux postes ainsi que le balancement de la ligne, les contraintes jouent un rôle important dans la résolution. La contrainte majeure est que toutes les tâches ne sont pas réalisables par tous les employés. En effet, chacune d'elle nécessite des compétences très propres à une profession en particulier. Sur la ligne étudiée, cinq types de métier sont présents : les mécaniciens, les électriciens, les opérateurs avionique, les opérateurs de structure et enfin les opérateurs de finition.

Le travail sur ce projet est décrit dans la partie suivante par ordre chronologique de réalisation. Il va sans dire que les étapes de réalisation se sont recoupées et affinées au cours de cette maîtrise. Le travail a été divisé en sept grandes étapes.

### 2.1 Contexte de l'étude

L'idée de ce projet est venue après la visite des usines d'une entreprise aéronautique de la région. L'organisation de l'usine et de la production nous ont paru intéressante à étudier. Nous avons alors pris contact avec l'entreprise afin de discuter de leurs hypothétiques besoins et de nos idées. L'objectif visé pour ce projet était l'étude d'un problème concret dans un milieu industriel. À la suite des premières réunions avec

un des responsables de la ligne d'habillage intérieur, il est ressorti que la direction avait décidé de raccourcir le temps de cycle le faisant passer d'un avion tous les huit jours à un avion tous les six jours, ce qui nécessite donc un rebalancement de la ligne d'assemblage. Il ne faut pas oublier que chaque avion est unique donc qu'un balancement de ligne sera nécessaire pour chacun des avions entrants sur la ligne. Au moment de nos rencontres, le balancement avait déjà été réalisé pour l'avion comportant le plus d'options. En effet, les managers ont conclu que si l'avion le plus complexe était faisable en six jours alors les autres avions le seraient aussi. Cependant, il sera nécessaire de réaliser le balancement de la ligne pour chaque avion afin de voir la charge de travail de chacun des employés et ainsi leur donner leur planning pour la durée du temps de cycle. Les objectifs du rebalancement ont été discutés et les responsables nous ont fait part des contraintes liées à l'industrie aéronautique. Cela nous a amenés à l'étape suivante, soit la récolte des données.

## 2.2 Récolte et analyse des données

Pour cette première étape, quelques rencontres ont été effectuées afin de voir où en étaient le projet de leur côté, les données nécessaires à la réalisation du projet et afin de définir les contraintes liées à cette industrie.

Les données obtenues lors de ces rencontres ont été les plannings de chaque poste pour chaque jour avec une assignation à un groupe métier. Ces plannings ont été réalisés avec l'outil de planification MS Project. Chaque tâche y est détaillée avec sa durée d'exécution, le métier qui lui est rattaché, le tronçon dans lequel elle doit être réalisée, ses antécérences ainsi qu'un code propre à l'entreprise permettant de prioriser certaines tâches par rapport aux autres.

La première difficulté pour les managers a été la définition des temps de tâche puisqu'il a fallu les réduire afin de ne pas dépasser le nouveau temps de cycle. Les ouvriers et les chefs d'équipe ne voulaient pas voir les temps diminuer alors que les managers de leur côté voulaient les réduire au maximum. Ce fut après de nombreuses

discussions que les deux parties sont arrivées à un accord sur le temps d'exécution de chacune des tâches élémentaires.

Le plus gros problème de l'affectation réalisée par l'entreprise est qu'elle est partitionnée par journée. On remarque que pour chaque tâche il y a une date de début et une date de fin qui ne sont pas forcément au même jour. De plus, cet ordonnancement n'est pas fait pour une unité de temps raisonnable (une journée). Les tâches sont ici seulement assignées à une journée de travail. Si le total du nombre d'heures de travail dépasse le temps de travail de l'équipe au complet alors une tâche est divisée pour tenir sur deux jours. Lorsqu'il s'agit de tâches longues, il n'est pas problématique de les diviser en deux d'autant que les temps de travail sur cette tâche sont assez importants durant les deux jours. Une tâche de sept heures dont il faudrait exécuter trente minutes un jour et six heures et demie le lendemain ne sera en fait réalisée que le deuxième jour. En effet, les ouvriers préféreront exécuter la tâche en entier sur une seule journée plutôt que d'à peine la commencer un jour et la finir le jour suivant. Il résulte de ces choix une perte de temps dont les managers ne tiennent pas vraiment compte puisque, sur le planning prévu, les tâches devraient être commencées.

On remarque également que les plannings qui ont été fournis n'assignent pas un employé à une tâche mais des tâches à des ensembles d'employés ayant un même code métier. L'assignation se fait uniquement sous la contrainte de ne pas dépasser le nombre d'heures disponibles pour le groupe de travailleurs, mais comme certaines tâches requièrent deux personnes pour leur exécution, il est parfois impossible de faire par la suite une assignation tâche/employé sans dépasser les sept heures trente de travail hebdomadaire.

La récolte de données a permis d'obtenir toutes les informations sur les tâches élémentaires mais aussi de dresser un portrait du style de tâches présentes dans l'entreprise. Cela sera utile lors de l'exemple numérique présenté plus loin dans l'étude.

Pour des questions d'utilisation future, les données récoltées sur les plannings ont été synthétisées dans une base de données. Celle-ci pourra être très utile lors de la programmation du problème afin que le logiciel d'optimisation puisse aller y chercher

les données et les traites lors de la résolution. Cette base de données permet également de trouver tous les renseignements concernant une tâche, un code métier ou une zone de l'avion.

## 2.3 Définition du problème

Le problème a été cerné grâce à plusieurs visites dans l'usine, aux rencontres avec les managers mais également grâce à la récolte et l'analyse des données.

L'objectif finalement choisi est de minimiser le nombre d'employés. Pour cela il est possible de minimiser ce nombre sur chaque poste ou sur la ligne entière.

Il est nécessaire de respecter les nombreuses contraintes d'antécédence, de temps de cycle, de compétence mais pour des raisons de simplicité d'autres contraintes telles que celles d'espace n'ont pas été prises en compte dans cette étude.

L'étude des données a également permis de mettre en avant les points négatifs de l'assignation actuelle et donc de prendre des décisions telles que la découpe du temps ou l'assignation par employé et non par code métier.

La question du type de résolution a également été soulevée. Il a fallu choisir entre une méthode exacte et une méthode heuristique. N'ayant pas trop d'idée sur les limites de la méthode exacte, il a semblé intéressant de commencer par cette méthode pour ensuite se lancer dans une méthode heuristique si le temps qu'il restait le permettait.

## 2.4 Élaboration et programmation du modèle

Afin d'élaborer le modèle, il a été nécessaire de lister les variables et les données. Le choix du logiciel a permis de définir la forme des données. Les antécérences seront donc représentées sous forme matricielle et binaire alors que les métiers seront représentés par un code numérique.

Pour résoudre le modèle, il est nécessaire de créer des tables afin qu'AMPL puisse avoir les données et renvoyer le résultat. L'une des méthodes les plus faciles à mettre en place est de créer un fichier Excel. Quatre tables, comme le montre la Figure 2.1, ont été créées dans la première feuille : *tache*, *personnel*, *précédence* et *double*. La

table *tache* va permettre d'entrer toutes les données concernant les tâches. On y retrouvera donc : son numéro, sa durée (d) et son code métier (c). La table *personnel* contiendra le nom des employés de ce poste ainsi que leur spécialisation (m). La table *précédence* est la matrice carrée binaire représentant le graphe d'antécérence. Le chiffre 1 est inscrit si dans le couple (a, b), la tâche *a* doit être effectuée avant la tâche *b*. Dans le graphe d'antécérence *a* sera directement avant *b*. Comme cela a été précisé précédemment seules les antécérences directes sont prises en compte, les autres sont déductibles. La table *double* permet quant à elle de donner le numéro des deux tâches devant se faire simultanément, s'il y a lieu.

Ces quatre tables sont les données du problème et correspondent à un poste. Il est obligatoire de les créer afin de résoudre le problème. AMPL va donc, grâce à un script, aller chercher ces données dans le fichier Excel et les utiliser. Grâce à ce même script, AMPL renverra les résultats dans le même fichier Excel, ce qui permettra de mieux analyser les résultats. Les tables renvoyées sont chacune sur une nouvelle feuille. Cinq tables apparaissent à la fin de la résolution : *T*, *beta*, *résultat*, *gamma* et *epsi*.

La table *T* donne la date de début de chacune des tâches. La table *beta* permet d'identifier les employés utilisés dans le poste tandis que la table *résultat* assigne chaque tâche à un employé. Ces trois tables de sortie permettent de tracer le diagramme de Gantt pour chaque poste étudié.

Les tables *gamma* et *epsi* renvoient les résultats de chacun des paramètres. Ces deux dernières tables n'ont pas d'utilité pour l'analyse en tant que telle mais permettent de faire des vérifications si cela est nécessaire. Les trois premières tables sont les tables les plus importantes pour l'assignation et l'allocation des tâches et du personnel.

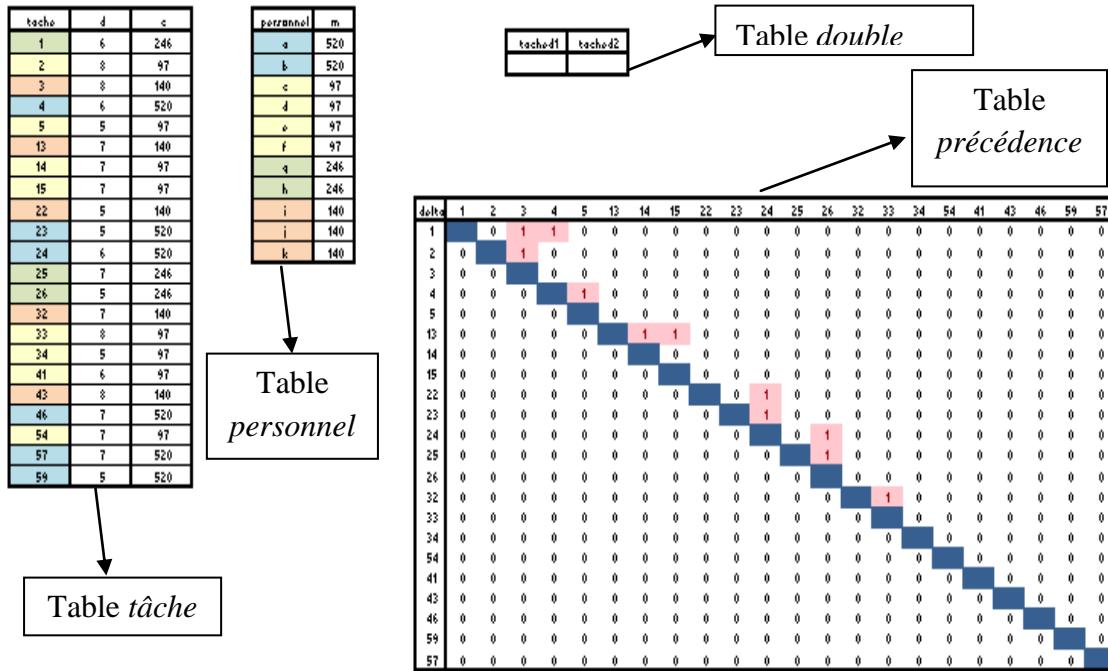


Figure 2.1: Représentation des tables de données sous Excel

## 2.5 Plan d'expérience

Le modèle mathématique ainsi trouvé a été testé grâce à plusieurs exemples. Ceux-ci vont permettre de voir si le modèle est robuste et peut résoudre le problème cité précédemment. Le plan d'expérience a été réalisé afin de couvrir un maximum de possibilités connues dans le contexte industriel.

Une première évaluation a permis de voir que selon le nombre de codes métier présent dans l'exemple, une solution optimale était trouvée plus ou moins rapidement. De plus, afin de garder un temps de résolution convenable, le nombre de tâches a été réduit pour n'en garder que 19.

Comme cela a été précisé, il a fallu trouver les critères importants dans l'évaluation du modèle mais également les facteurs influents sur ces critères.

### 2.5.1 Les critères d'évaluation

Ces critères vont permettre d'évaluer les différents exemples et de voir le comportement du modèle.

**Le temps de résolution.** Ce critère est très important dans le contexte industriel car les entreprises veulent la meilleure solution le plus rapidement possible.

**Le nombre d'employés utilisés.** Celui-ci est le critère à minimiser

**Le taux d'inactivité** des personnes utilisées. Ce critère va permettre de mesurer la qualité de la solution selon la politique de l'entreprise et l'application future du modèle.

### 2.5.2 Les facteurs

Les facteurs sont les paramètres à modifier afin d'influer sur le nombre de contraintes et donc sur la solution et le temps de résolution.

**Le nombre de codes métier.** Dans ce plan d'expérience, le nombre de codes métier est d'au maximum 4, ce qui est assez proche des données industrielles. De plus, aux vues du nombre de tâches il n'est pas cohérent d'en utiliser plus.

**La durée des tâches.** Trois types de durée ont été retenus : des durées courtes (de 1 à 5 unités de temps), des durées longues (de 5 à 8 unités de temps) et des durées quelconques (de 1 à 8 unités de temps).

**Les antécérences.** Trois types ont été étudiés : aucune antécérence, des antécérences entre même code métier et des antécérences entre tous les codes métiers.

La combinaison de tous ces critères, sur un ensemble de 19 tâches, est une représentation assez réaliste du problème industriel. Tous les cas de figure y sont représentés. Si un échantillon de 19 tâches est pris au hasard dans les données industrielles, il tombera obligatoirement dans un des cas de figure du plan d'expérience.

Afin de réaliser le plan d'expérience, tous les facteurs ont été combinés pour garder au total 42 exemples tests. Le Tableau 2.1 donne le numéro de l'expérience et les

critères auxquels il est assujetti. Pour l'expérience n° 8 (encadrée en gras) par exemple, les tâches n'ont aucune antécédence entre elles, leur temps d'exécution varie aléatoirement entre 5 et 8 unités de temps et les quatre codes métiers sont représentés mais deux d'entre eux sont bien plus présents.

**Tableau 2.1: Plan d'expérience**

Pas d'antécédence	1 code	4 codes	4 codes, 2 importants	2 codes	2 codes, 1 important
d petit	1	4	7	10	13
d grand	2	5	8	11	14
d quelconque	3	6	9	12	15

Antécédence sur 1 code	1 code	4 codes	4 codes, 2 importants	2 codes	2 codes, 1 important
d petit	16	19	22	25	28
d grand	17	20	23	26	29
d quelconque	18	21	24	27	30

Antécédence sur tous les codes	4 codes	4 codes, 2 importants	2 codes	2 codes, 1 important
d petit	31	34	37	40
d grand	32	35	38	41
d quelconque	33	36	39	42

Remarques :

- Dans ces tableaux, un code métier est dit « important » lorsque celui-ci est majoritaire parmi les 19 tâches.
- Pour la dernière catégorie il n'y a que 12 expériences car s'il n'y a qu'un seul code métier les antécédences sont donc toutes sur ce code ce qui correspond à la catégorie précédente.
- Pour chacune des expériences, les termes « petit », « grand » et « quelconque » représentent les mêmes plages de valeurs numériques.

Le plan d'expérience a pour but de valider le modèle d'optimisation en le testant sur plusieurs situations. Par la suite un problème numérique va permettre d'illustrer le processus de résolution.

## 2.6 Élaboration du problème numérique

Le problème numérique a été très inspiré des données réelles de l'entreprise. Cependant, la littérature et notre plan d'expérience ont montré les limites de la méthode exacte sur le temps de résolution du problème. Il ne faut pas oublier le contexte qui est la résolution d'un problème industriel pour chaque avion qui entre sur la ligne. Pour créer ce problème, il fallait donc :

- Moins de 25 tâches par résolution
- Des tâches de durée assez longues
- Un assez grand nombre de précédences entre tous les codes métier
- Peu de code métier (il n'y en a que 5 différents sur la véritable ligne)

Le choix du petit nombre de postes est plus un choix de facilité et de rapidité puisque le modèle est résolu indépendamment pour tous les postes.

## 2.7 Résolution et analyse

Comme cela a été mentionné précédemment, la résolution a été faite poste par poste selon le mode de résolution décrit dans le chapitre 3. Tout d'abord, une allocation tâches/postes grâce à la procédure présentée Figure 3.3 est réalisée puis le problème est optimisé grâce à AMPL.

La solution résultant de la première étape est une solution de départ réalisable mais non optimale, c'est pourquoi il est nécessaire de passer par la résolution mathématique. En effet, le nombre d'employés, dans ces premières étapes, est considéré comme infini ce qui n'est pas le cas dans la réalité. Cependant, cela pourrait être le cas si l'étude portait sur l'ouverture d'une usine où le recrutement des équipes serait fait plus tard. Ici, il n'est nécessaire que de rebalancer la ligne existante et donc d'optimiser le travail des employés pour que l'entreprise les utilise correctement. La première étape (Step 1) permet également de définir une borne qui, même après la résolution optimale, ne pourra pas être dépassée. La première solution faisable n'est pas optimale mais ne

consiste pas non plus à donner une seule tâche à exécuter aux employés. C'est pourquoi il est certain qu'il n'y aura pas besoin de plus de personnes que pour cette première solution faisable.

## **CHAPITRE 3 : INTEGRATED STAFF SCHEDULING AND ASSEMBLY LINE BALANCING IN THE AEROSPACE INDUSTRY**

### **3.1 Abstract**

This paper proposes a practical integrated staff scheduling and assembly line balancing procedure in the context of a complex product assembly line. More specifically, this procedure was developed for the interior fitting activities of a business jet assembly line, which involves highly personalized activities. Typically, the assembly line is made up of several assembly stations, where several workers with different competencies work to carry out the scheduled activities. The cycle time lasts generally several days. In this context, the proposed procedure first involves a line balancing procedure which aims at assigning tasks to work stations. Next, a mathematical programming model, solved with Cplex for each station independently, aims at assigning and scheduling tasks to workers. The objective of this procedure is to minimize the number of workers on the assembly line. The proposed mathematical model takes into account all activities with precedence constraints, the workers' competencies, as well as the requirements of the assembly activities in terms of competency, precedence constraint and number of workers required per activity. Activities with no precedence constraint are assigned to workers and integrated into the schedule in a second phase. The fitting activities of each airplane's customized interior are planned independently and sequentially according to the final assembly schedule. This procedure is illustrated and tested with a simple instance of a problem involving 3 stations and 60 activities.

Keywords: worker scheduling, workers' ability, assembly line balancing, aerospace industry, optimization, mathematical modeling.

## 3.2 Introduction

In the fierce international competition, manufacturers of luxury products, such as business jets, must design and produce high quality products for customers' who demand highly customized product. In order to meet such high levels of product personalization, manufacturers usually propose product platforms that can be configured through a great deal of options in order to meet each customer's individual requirements. In this context, assembly lines become very complex to both design and managed, while manufacturers must remain competitive by reducing their cost and using their resources efficiently in order to meet their customers' and shareholders' satisfaction. This section, first introduces the decision problem addressed in this paper. Next, a set of definitions is presented in order to formally describe the problem on hand.

### 3.2.1 Problem introduction

In the business jet industry, product customization goes further than assembling-to-order. Indeed, manufacturers propose designed-to-order interiors, on the top of proposing a great deal of options to be chosen from (see Lampel and Mintzberg, 1996 and Montreuil and Poulin, 2005 for a review of the concepts of product customization). This level of customization implies that the interior of every aircraft is specifically manufactured and assembled to meet the design requirements of each customer.

This type of manufacturing problem is usually addressed in a project manufacturing mode, where each aircraft remains on a specific location until the interior is completed and the plane ready to be delivered. However, in order to improve logistics and resource utilization, the industrial partner of this project developed a fixed assembly line that is specifically designed to transformed semi-finished aircraft, into finished luxury business aircraft. Each aircraft remains a few days in each station in a given sequential order according to a final assembly schedule. Each station is then supplied just-in-time with all necessary parts and sub-assemblies according to the particular schedule of each aircraft at each assembly station. Thanks to an organizational structure

that takes advantage of the physical organization of the line, operations control in general and the delivery schedule, in particular, are more tightly managed.

In such a complex context of assembly line operations, there are several decision problems to be addressed with respect to operations scheduling and human resource management, among which line balancing is of particular importance. Because the interior of each aircraft is unique, line balancing becomes an operational decision that must be made for each aircraft entering the line. Furthermore, it has a direct impact on the level and rate of assembly resource requirement and utilization, as well as the delivery performance.

This paper focuses on the development of a decision procedure to assign tasks to assembly station and schedule workers' work. The structure of the line and the cycle time are considered given.

Although the problem could be seen as a mixed model assembly line balancing problem, the problem must be addressed for each aircraft individually due to their highly personalized characteristics. Furthermore, as discussed later, this line balancing problem requires addressing the scheduling of each task to be carried out in each station. Consequently, the problem could also be seen as a project scheduling problem in the context of an assembly line.

### **3.2.2 Definitions**

Originally, assembly lines were developed in order to take advantage of the high efficiency of work standardization in the context of mass production of highly standard products (Boysen, Fliedner and Scholl, 2007). An *assembly line* is a series of work stations where products spend a certain time to be transformed, or assembled, and where generally one worker carries out standardized tasks. Products start on the line at the first station and moves forward towards the next station in a cadenced manner. The *cycle*

*time* is the amount of time between two product moves on the line (except with assembly line with parallel work station). The cycle time is a function of the production capacity and the desired throughput of the line. The *task processing time, or task time*, (number in top right corner of the task in Figure 1) is the time required (or planned) to complete the task. A *task* is an elementary activity of the overall work to do. Work is thus divided into task, which requires certain equipments or *abilities*. An ability can be defined as a competency or work speciality (e.g., electrician, mechanic). A worker can have several abilities.

In the integrated staff scheduling and line balancing problem, many constraints can be taken into account; the most important are *precedence constraints*, which specify that certain tasks must be carried out before others. They are mainly due to technical conditions and design specifications. Such constraints can be summarized in a *precedence graph* (see Figure 1). Each task is represented by a node whereas the arcs represent the precedence links. In a precedence graph, we can define a *rank* graphically as the set of all the nodes located in the same column, where each task occupied the column according to the maximum number of tasks on the path that must be completed before that task. For instance, in Figure 1, 3 paths lead to task 4 (1-3-4, 1-6-4 and 5-6-4). The maximum number of tasks on either of these paths is 3 (including task 4). Thus, task 4 is of rank 3. We also assume that there is no cycle in the precedence graph.

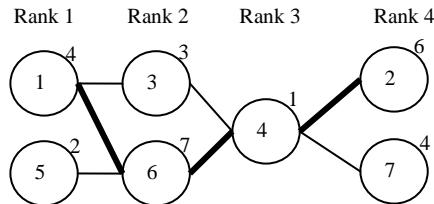


Figure 3.1: Precedence graph, rank and critical path

The *critical path* (bold line in Figure 3.1) is the longest path in term of time. If a set of tasks is assigned to a station, the sum of task times of the critical path must be shorter than the cycle time. In the context of complex products assembly such as aircraft

or motorcoach, more than one worker usually works in the work stations (Frayret *et al.*, 2001). Some tasks may even require to be carried out simultaneously by several worker (if two workers are need, it is referred to as a *double task* in the remainder of this paper). Furthermore, some tasks may also require specific competencies, which dramatically increase the complexity of managing such assembly lines.

The paper is organised as follows. Section 2 proposes a review of the literature of the domains relevant to this problem. In Section 3, the problem and the assumptions are presented. The procedure and a mixed integer programming model are described in Section 4. Section 5 presents an illustrative example of the overall procedure and the results of quantitative tests carried out with the mathematical programming model. Finally, Section 6 discusses the results before concluding and proposing further researches in Section 7.

### **3.3 Literature review**

Many publications deal with line balancing, staff scheduling and workforce allocation. However, only a few addresses simultaneously several issues. Furthermore, there are only a few articles dealing with the aerospace industry. In this review, we first propose to address the assembly line balancing problem. Next, we address the staff scheduling and workforce allocation in assembly systems.

#### **3.3.1 Assembly line balancing**

Since the first developments of assembly lines for the manufacturing of standard products, the need to accommodate the increasingly diversifying needs of customers have led to the development of more complex assembly lines capable of assembling products to order in a mass customization context. The design of such assembly lines has interested several generations of researchers. In particular, the assembly line balancing problem has been considerably studied. It is a problem of great relevance for the

industrial practice, yet there is a gap between the research output and the industrial requirements (Boysen *et al.*, 2007).

Ponnambalam *et al.*, (1999) define the Assembly line balancing (ALB) problem as a set of tasks of a given duration and precedence relations which must be assigned to an ordered set of stations. The early academic efforts to solve this problem have led to a drastic simplification of the practical industrial problem, which is why it was later labelled as the Simple Assembly Line Balancing Problem (SALBP) (Boysen *et al.*, 2007). These simplifications includes the consideration of only one standard product, one assembly process, paced line with fixed cycle time, deterministic operation times, and no assignment constraint besides the precedence relationship between the assembly tasks (Scholl and Becker, 2006). In the SALBP, the objective is usually to assign tasks to stations in order to minimise the cycle time or to minimise the number of work station (Gronalt and Hartl, 2003). However, Scholl and Becker (2006) describe four version of SALBP, which include the SALBP-1, the SALBP-2, the SALBP-E and the SALBP-F. The two firsts aim at minimizing the cycle time or the number of station when the other is given. The SALBP-E represents the problem when none of these parameters is given. Finally the SALBP-F is a problem of feasibility. Although these families of problems are simplified versions of what is generally found in practice, the SALBP remains a NP-hard problem, for which several heuristics and exact procedures have been developed over the years (see Scholl and Becker, 2006 for a recent literature review). However, exact methods are generally not suitable for industrial problems (Ponnambalam *et al.*, 1999). Indeed, Gökcen and Erel (1998) and Erel *et al.*, (2005) show that only small problem instances in term of tasks number can be solved (with no more than 25 or 40 tasks depending on the constraints). Consequently, these procedures are not relevant to the problem addressed here since complex and customized products assembly line involves a more complex line structure (e.g., multiple workers per station) and assignment constraints (e.g., competency requirements, task simultaneity).

In order to close the gap between research and practice, many developments have been proposed to account for more complex assembly lines designs, such as two-sided assembly lines, u-shaped assembly line or assembly lines with parallel work stations. These are generally referred to as the *general assembly line balancing problem* (GALBP). The reader is referred to Scholl and Becker (2006) for a recent literature review. These ALB problems more generally aim at configuring the assembly line in terms of activity and resource assignments on the line in order to meet production targets. However, the objective on the ALB problem addressed in this paper is to minimize workforce requirement without changing the structure of the line (number of station) or the cycle time.

In such context, Corominas *et al.* (2008) address a version of the SALBP where the goal is to minimize the total number of temporary workers assigned to an assembly line. The authors propose a mixed linear programming model which is solved to optimality for small problem instances. Yet, only one worker per station is considered in this problem. Along this line, Miralles *et al.* (2008) address a line balancing problem where task and workers must be assigned to stations. This problem, referred to as the Assembly Line Worker Assignment and Balancing (ALWAB) Problem considers that task time is different depending on who executes the task, as well as task-worker incompatibilities. Yet again, only one worker per station is considered. Differently, Andres *et al.*, (2008) introduce task scheduling in the assembly line problem by including a constraint of sequence dependent setup in the SALBP. In their approach, worker assignment is not addressed and, again, only one worker or machine per workstation is considered.

In the context of complex products assembly lines with large cycle time, such as aircraft assembly lines, several workers with specific competencies are required. However, even if in this context, setup times are negligible with respect to the cycle

time, it is necessary to assign task to worker and schedule all tasks assigned to each station in order to properly assess workload and optimize the workforce level required.

### **3.3.2 Staff scheduling and workforce allocation in assembly systems**

Human resources management is a complex issue for many industries or services. Managers have to deal simultaneously with holidays, breaks, hiring or firing workers, scheduling workers' shift and maximize worker preferences in terms of task assignment and production constraints. Blöchlinger (2004) explains that staff management in the context of a hospital is a good example of such a complexity. Indeed, there are many tasks which require specific qualifications. For instance, in the nurse scheduling problem, the author lists soft and hard constraints and gives a simple model to solve the problem. It is necessary to take into account workers' abilities and competencies, as not all tasks can be completed by anybody. Also he explains that there are again, exact and heuristic approaches to solve such a problem.

In the context of a truck assembly line, Gronalt and Hartl (2003) address the problem of workforce planning and allocation. In this problem workforce is divided into workers (restricted to some stations over several shifts and to one station within each shift) and floaters (with no such restrictions). In this problem, the authors consider the sequence of truck to be assembled and their respective workload. Yet, only an aggregated figure of the workload per station and per truck is considered to smooth the necessary workforce level. Tasks scheduling is not part of the problem, only workforce allocation.

Similarly, Shewchuk (2008) considers the problem of workforce allocation in the context of a U-shaped production line with multiple station allocation. The objectives of the heuristics procedure proposed by the authors are to minimize the number of worker on the line and to maximize full workload. Yet the problem only involves one-manned station/machine and task scheduling is not an issue. Along the same line, Heike *et al.*,

(2001) analyse labour requirement in the context of the aerospace industry where several models of aircraft are assembled on a paced line. The objective is to minimize total cost as a function of labour cost and inventory cost. Although the context is similar to the problem addressed in this paper, task-to-station assignment is not addressed here, only workforce allocation is considered. However, the authors study several allocation policies where workforce is permanently assigned to stations (i.e., non-flexible crew allocation) and, by opposition, policies where the workforce is flexible (i.e., flexible crew allocation). The authors explain that a flexible crew policy can reduce overtime by as much as 24%. The next section delves further into the presentation and the classification of the ALB problem addressed in this paper.

### **3.4 Problem domain and assumption**

In the problem addressed here, the assembly line already exists and its configuration is not to be changed. Therefore, the problem is not to design the line neither to change the cycle time. All stations along the assembly line are equipped with all necessary material and resources (other than workers). Each aircraft remains in a station for a fixed time, which is generally a few days. Each aircraft moves forward to the next station after each cycle time. There is no overlap as suggested by Heike *et al.*, (2001), where two aircrafts can remain at the same time in a station. During the cycle time, workers complete their set of tasks. Task time is also determinist. Furthermore, the assembly of the interior of the aircrafts requires workers with specific competencies controlled by union regulations. Thus, each worker has a given competency, which limits the set of tasks he can be assigned to. In practice, each worker can combine several competencies. However, we consider that each worker only possesses one competency, which is generally the case.

As mentioned earlier, the number of worker in each station is not fixed, and the objective is to minimize the number of workers given a number of stations and a cycle time. Because the aerospace industry involves low production volume (i.e., long cycle

time), as well as a large number of skilled labour-intensive assembly tasks, we propose to consider the assembly line balancing and staff scheduling of each aircraft separately. We assume that the sequence of aircraft to be finished is given. We also assume that workers can be assigned anywhere on the line (i.e., flexible crew allocation). In this context, in order to simplify the problem, we consider that, even though there are several aircrafts in the assembly line simultaneously, there is no dependency between the workforce allocation problems of each aircraft. This aspect remains for future work.

Therefore, the ALB problem address in this paper adds new dimensions to the GALBP discussed in the previous section. Using the classification scheme proposed in Boysen *et al.*, (2007), the context of the assembly line balancing problem addressed in this paper involves the following characteristics:

Precedence graph characteristics:

- a mixed-model assembly line: although the line only process one model of aircraft, fitting activities, which result from the customized interior design, are different for every aircraft. Consequently, fitting activities are assigned to stations for each aircraft separately;
- the precedence graph structure only presents no cycle;
- the task processing times are deterministic;
- there is no sequence-dependent task time increments;
- the assignment restrictions are:
  - all tasks must be carried out by a worker of a specific competency (union regulation);
  - some tasks must be carried out by multiple workers (equivalent to multiple tasks of the same task time being processed simultaneously);
  - some tasks cannot be carried out simultaneously because of space restriction in the aircraft (access is physically limited to one or two people);
- there is no process alternative (the process is designed specifically for each aircraft);

Line characteristics:

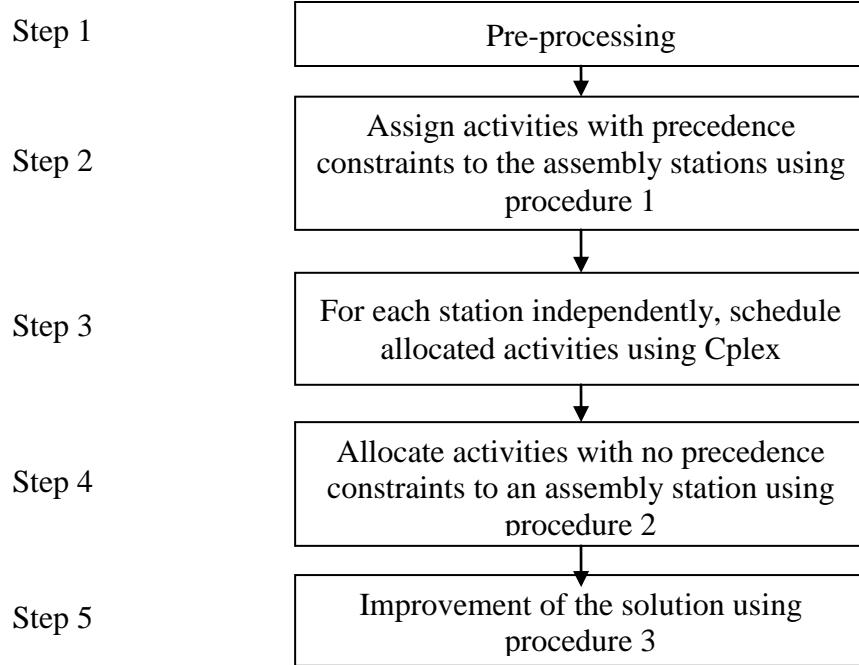
- there is a unique and strict cycle time which paced the movement of all aircraft on the line;
- the stations are arranged in a serial manner with no cross-over station;
- there is no parallelization (there is no parallel work station);
- each station can use several workers with similar or complementary competencies (the goal of the problem on hand is to assign the right mix of workers in each station taking into account the specific tasks to be carried out);
- each station possesses several generic equipments that do not constraint task assignment;
- there is no station-dependent time increments;

The objective of the assembly line balancing problem addressed in this paper is to minimize the number of workers assigned to each station (equivalent to maximizing the effective workload of workers) by assigning tasks and workers to assembly stations, and by simultaneously assigning and scheduling tasks to workers. Both the cycle time and the number of stations are fixed. The next section presents a formulation of the problem as well as a heuristic procedure to solve it.

### 3.5 Problem formulation and procedure

Given the obvious complexity of the problem addressed in this paper, we propose to decompose it into a series of embedded heuristic and exact procedures. This general procedure first addresses heuristically the ALB problem by considering only tasks with precedence constraints. Then, for each station separately, we solve to optimality (for small problem instances) the staff scheduling problem, which results in fewer workers being required. Next, we include the tasks with no precedence constraints into the schedules. Finally, because the initial line balancing solution was not necessarily the most interesting, we improve both the scheduling and line balancing simultaneously by considering the assignment of all tasks of the entire line. This general procedure is

described in Figure 3.2. There are more specifically 5 steps, which are each described in the following sub-sections.



**Figure 3.2: Methodology**

### 3.5.1 Pre-processing (Step 1)

The pre-processing step consists in creating the precedence graph and in calculating the lower bound of the number of workers required as presented in equation (1).

$$LB_c = \left\lceil \frac{\sum_{i|c_i=c} d_i}{\theta} \right\rceil, \forall c \in C \quad (1)$$

With

$c$  a competency;

$i$  a task;

$LB_c$  minimum required number of worker for competency  $c$ ;

$c_i$  competency required for task  $i$ ;

$d_i$  task time of task  $i$ ;

$\theta$  cycle time, and

$\lceil \cdot \rceil$  returns the nearest superior integer.

In other words,  $LB_c$  is the nearest superior integer value of the sum of the task times of all tasks requiring competency  $c$ , divided by the cycle time  $\theta$ . In practice, this bound is not always reachable because of the precedence, the task times and the cycle time constraints. It may be therefore necessary to use more workers because of our inability to fill all time gaps between tasks. However, it is an indicator to evaluate the solution's quality and to give a first idea of number of workers required per competency. It is the minimum number of workers required to complete the project.

### 3.5.2 Assign activities with precedence constraints (Step 2)

In order to solve this complex problem, it has been decomposed into several more simple steps, solved either heuristically or to optimality. According to this decomposition (see Figure 3.2), we propose to first assign all tasks with precedence relationships to a station, because they involve complex precedence constraints that must be dealt with. Since there is no method found in the literature which takes into account the complexity of both precedence constraints and competency requirements, we propose a simple heuristics procedure, as presented in Figure 3.3.

In brief, this procedure is a greedy forward assignment approach, which contains three embedded loops. First, we consider the stations by the increasing order on the line, which we progressively load with tasks and workers. In order to do that, for each station iteratively, we assign tasks to workers according to their increase task rank. In other

words, we first try to assign the tasks with the smallest rank to the first station, then, we progressively try to assign the remaining tasks of higher ranks until no more tasks can be assigned to that particular station (because of the cycle time constraint). Then, we consider the next station, and so on and so forth. In this step it is assumed that human resources are unlimited, in other words we can use as many workers as we need.

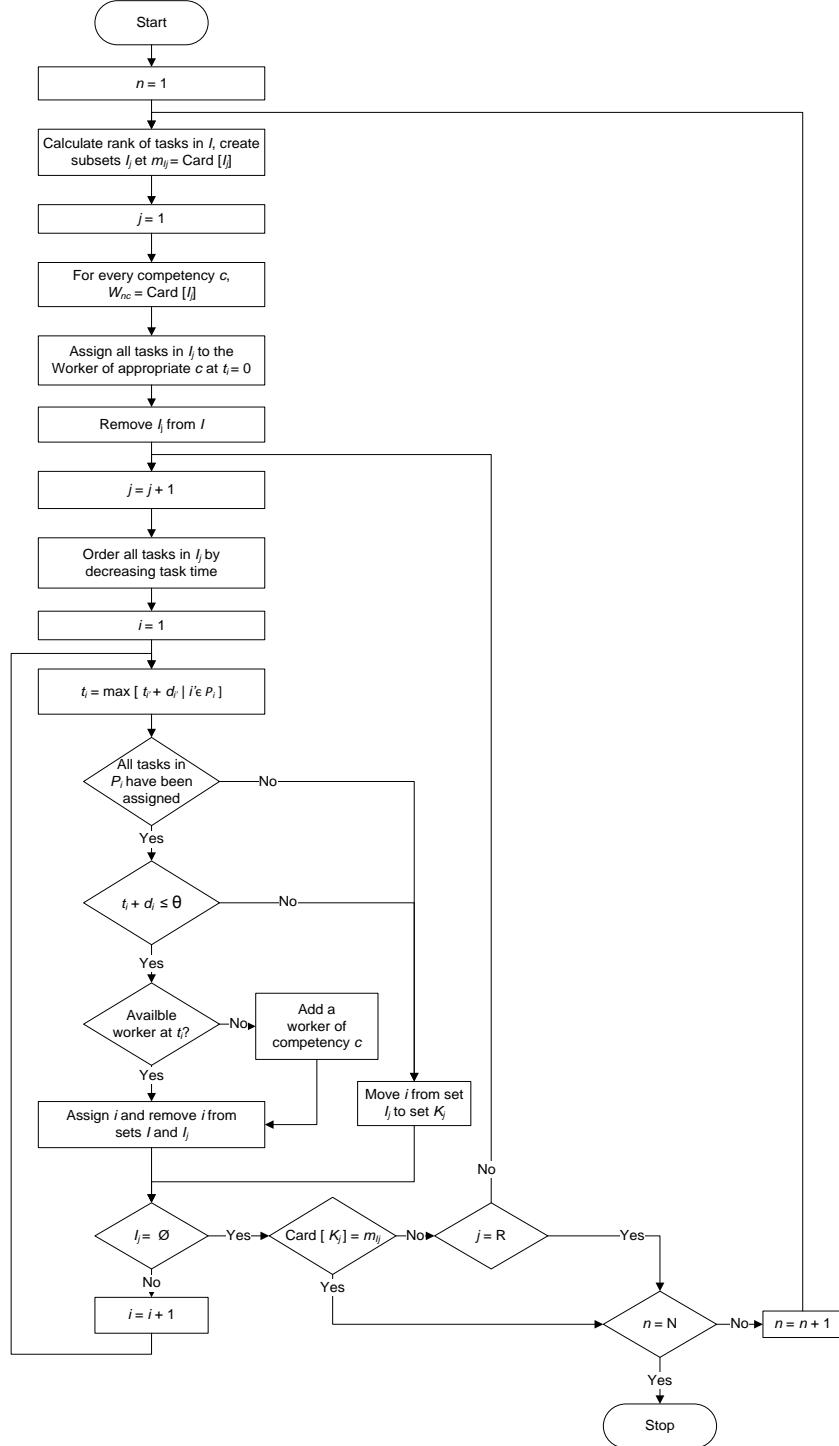


Figure 3.3: Procedure 1

with:

$n$  work station;

$i, i'$  task;

$I$  set of all tasks;

$P_i$  set of all predecessors of task  $i$ ;

$K_j$  set of all tasks that cannot be assigned  $i$ ;

$j$  rank index;

$I_j$  subset of all tasks of rank  $j$ ;

$m_{I_j}$  number of tasks of rank  $j$ ;

$W_{nc}$  number of worker in station  $n$  and competency  $c$ ;

$t_i$  start time of task  $i$ ;

$d_i$  task time of task  $i$ ;

$\theta$  cycle time;

$R$  largest rank number;

$N$  number of stations.

In order to accelerate the procedure, we have introduced two tests, which aim at avoiding trying to assign tasks if they cannot be assigned. For instance, if not all predecessors of a task have been already assigned to a station, it is unnecessary to try to assign this particular task because it would automatically violate a precedence constraint. Similarly, if the procedure was not able to assign any task of a particular rank, then it is unnecessary to try to assign any task of superior rank because it would again violate a precedence constraint.

### 3.5.3 Scheduling (Step 3)

When a first partial solution of the ALB problem is found using the previous procedure for the tasks with precedence relationships, the number of workers in each station is not optimal because we set  $W_{nc}$  (*i.e.*, number of worker in station  $n$  and competency  $c$ ) as being the maximum number of worker required according to the rank.

In other words, it is the number of worker if all tasks of rank 1 had to be done with a different worker. Therefore, it is necessary to optimize this workforce allocation by scheduling these tasks for each station separately using the mixed integer programming model presented hereafter. This model is solved with Cplex to optimality. This model is used station-by-station to schedule the tasks identified in step 1 and 3.

### Notations

#### Set :

- A Tasks
- E Workers
- D Tasks which require two workers

#### Parameters :

- $d_i$  Task time of task  $i$
- $c_i$  Competency required for task  $i$
- $m_j$  Competency of worker  $j$
- $\delta_{i,k}$   $\in \{0,1\}$ ,  $\delta_{i,k} = 1$  if  $k$  is an immediate successor of  $i$ , 0 otherwise,  $\forall i \in A, \forall k \in A$
- $\theta$  Cycle time
- M Big value

#### Decision variables :

- $\alpha_{i,j}$   $\in \{0,1\}$ ,  $\alpha_{i,j} = 1$  if worker  $j$  is assigned to task  $i$ , 0 otherwise,  $\forall i \in A, \forall j \in E$
- $\beta_j$   $\in \{0,1\}$ ,  $\beta_j = 1$  if worker  $j$  is assigned to any task, 0 otherwise,  $\forall j \in E$
- $T_i$  start time of task  $i$
- $\gamma_{i,k,j}$   $\in \{0,1\}$ ,  $\gamma_{i,k,j} = 1$  if worker  $j$  is assigned to both tasks  $i$  and  $k$  and  $T_i \leq T_k$ , 0 otherwise,  $\forall i \in A, \forall k \in A, \forall j \in E$ ;
- $\varepsilon_{i,k}$   $\in \{0,1\}$ ,  $\varepsilon_{i,k} = 1$  if  $T_i \leq T_k$ , 0 otherwise,  $\forall i \in A, \forall k \in A$ .

Objective function:

$$\text{Min } \sum_{j \in E} \beta_j + \frac{1}{M} \sum_{i \in A} T_i \quad (1)$$

subject to :

$$\sum_{j \in E} \alpha_{i,j} = 1, \forall i \in A \quad (2)$$

$$\alpha_{i,j} \times c_i = \alpha_{i,j} \times m_j, \forall i \in A \ \forall j \in E \quad (3)$$

$$\sum_{i \in A} \alpha_{i,j} \leq M \times \beta_j, \forall j \in E \quad (4)$$

$$\frac{\alpha_{i,j} + \alpha_{k,j} + \varepsilon_{i,k}}{3} \leq \gamma_{i,k,j} + \frac{2}{3}, \forall i, k \in A \ \forall j \in E | i \neq k \quad (5)$$

$$3 \times \gamma_{i,k,j} \leq \alpha_{i,j} + \alpha_{k,j} + \varepsilon_{i,k}, \forall i, k \in A \ \forall j \in E | i \neq k \quad (6)$$

$$2 \times (\gamma_{i,k,j} + \gamma_{k,i,j}) \leq \alpha_{i,j} + \alpha_{k,j}, \forall j \in E \ \forall i, k \in A | i \neq k \quad (7)$$

$$\frac{\alpha_{i,j} + \alpha_{k,j}}{2} \leq \gamma_{i,k,j} + \gamma_{k,i,j} + \frac{1}{2}, \forall i, k \in A \ \forall j \in E | i \neq k \quad (8)$$

$$\delta_{i,k} \leq \varepsilon_{i,k}, \forall i, k \in A | i \neq k \quad (9)$$

$$T_i + \delta_{i,k} \times d_i \leq T_k + M \times (1 - \varepsilon_{i,k}), \forall i, k \in A | i \neq k \quad (10)$$

$$T_i + \gamma_{i,k,j} \times d_i \leq T_k + M \times (2 - \alpha_{i,j} - \alpha_{k,j}) + M \times (1 - \gamma_{i,k,j}), \forall j \in E, \\ \forall i, k \in A | i \neq k \quad (11)$$

$$T_i + d_i \leq \vartheta \quad (12)$$

$$\alpha_{i,j} - \alpha_{k,l} = 0, \forall i, k \in D, \forall j, l \in E | j \neq l \text{ and } c_i = m_l \text{ et } c_k = m_j \quad (13)$$

$$T_i - T_k = 0, \forall (i, k) \in D \quad (14)$$

$$\alpha_{ij} \in [0,1] \ \forall i \in A, \forall j \in E \quad (15)$$

$$\beta_j \in [0,1] \ \forall j \in E \quad (16)$$

$$T_i \in [0, \vartheta] \ \forall i \in A, \quad (17)$$

$$\gamma_{i,k,j} \in [0,1] \ \forall i, k \in A, \forall j \in E, \quad (18)$$

$$\varepsilon_{i,k} \in [0,1] \ \forall i, k \in A, \quad (19)$$

The objective function (1) minimizes the number of workers and the weighted sum of start times of tasks, in order to schedule task as soon as possible. Then, constraints (2) make sure that every task  $i$  is assigned to a single worker  $j$ . Constraints (3) similarly ensures that every task is done by a worker who has the required competency. Constraints (4) are used to know if worker  $j$  has been assigned to do a task or not. Constraints (5) to (9) guaranty the integrity of the scheduling in terms of assignment to workers. In other words, these constraints aim at forcing the binary variables to take certain values in order to control the assignment of tasks to workers, and, eventually with the next set of constraints, to control the precedence constraints. Constraints (10) and (11) are used to enforce the precedence relationships between tasks  $i$  and  $k$ , where  $i$  is a predecessor of  $k$ . Constraint (12) enforces the cycle time. Constraints (13) and (14) refer to double tasks, which must be done by two different workers and on the same time, by enforcing their simultaneity. Because the solution found at this step does not include the tasks without precedence relationships, the next step (Step 4) aims to integrate these tasks into the schedule.

### **3.5.4 Assign activities with no precedence constraint (Step 4)**

In the proposed general procedure, so far only tasks with precedence constraints have been assigned. In order to produce a feasible solution, it is necessary to include in the schedules the remaining tasks. In order to do that, we propose the procedure in Figure 3.4.

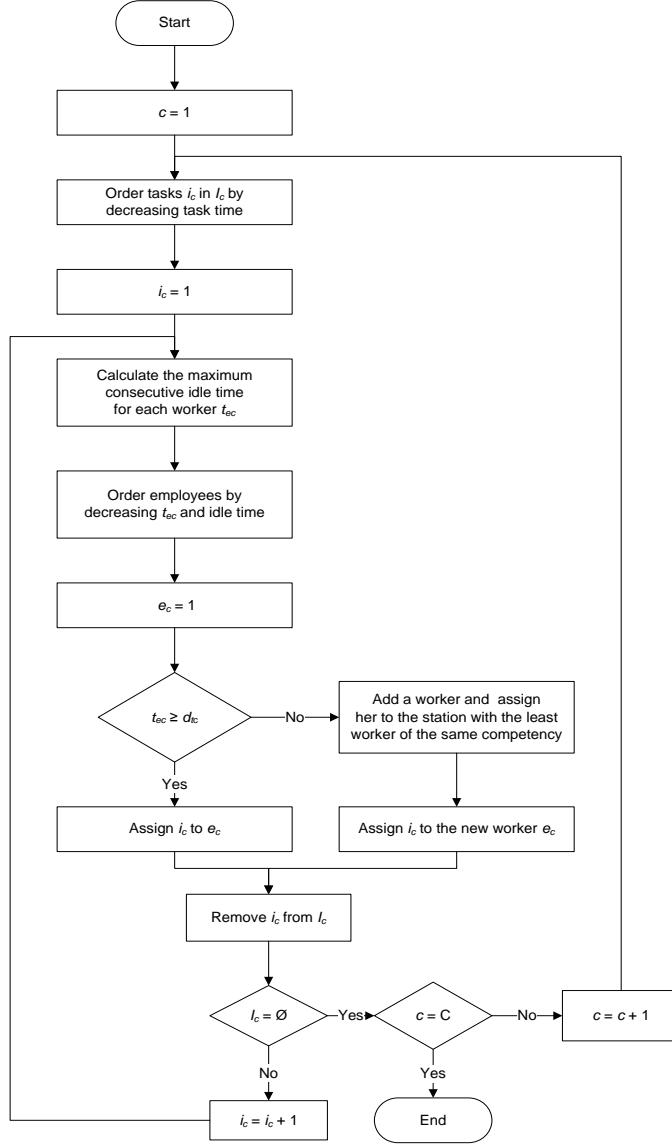


Figure 3.4: Procedure 2

with:

$c$  competency;

$i_c$  task of competency  $c$ ;

$I_c$  set of all tasks of competency  $c$ ;

$e_c$  worker of competency  $c$ ;

$t_{ec}$  maximum consecutive idle time for worker  $e$  of competency  $c$ ;

$d_{ic}$  task time of task  $i$  of competency  $c$ ;

This procedure considers iteratively each competency and each task of that competency. Next, the procedure considers all workers of that particular competency by decreasing order of idle time, regardless of her assigned station, and tries to assign her the longest remaining task. If a task cannot be assigned, then the only way to assign this particular task is to add a worker of this competency. Here, we propose to add a worker in the station with the least worker of this particular competency. We could also add a worker to the station with the least worker.

### **3.5.5 Solution improvement (Step 5)**

Because the initial balancing of the line calculated with procedure 1 may not be the most interesting in terms of worker requirement, we propose a local search procedure which aims at improving the line balancing and the schedules obtained so far. Furthermore, the quality of this solution depends also on the quality of the assignment of the tasks without precedence relationships. Therefore, we propose a third procedure, which aims at trying to schedule tasks with precedence constraints of higher ranks as late as possible in order to create idle time periods in the middle of the schedules, so as to move tasks and eliminate workers. In order to do that, we first order competencies by decreasing total idle time. Then, we use the lower bound calculated previously to see which competency uses too many people. Again, we only consider here task with precedence constraint because they are the most complex to assign. Then, regardless of the station, we start with the tasks of highest rank as calculated initially. Next, we try to assign these tasks as late as possible without adding any worker. Then, we consider the next rank, and so on and so forth until all tasks have been investigated. At the end of the procedure, we reassign with procedure 2, the tasks with precedence constraints.

It is assumed that this procedure is useful only for competencies which have not reached their lower bound. The improvement affects the objective, its aim is not to have a better schedule in term of idle time but to try to eliminate idle workers.

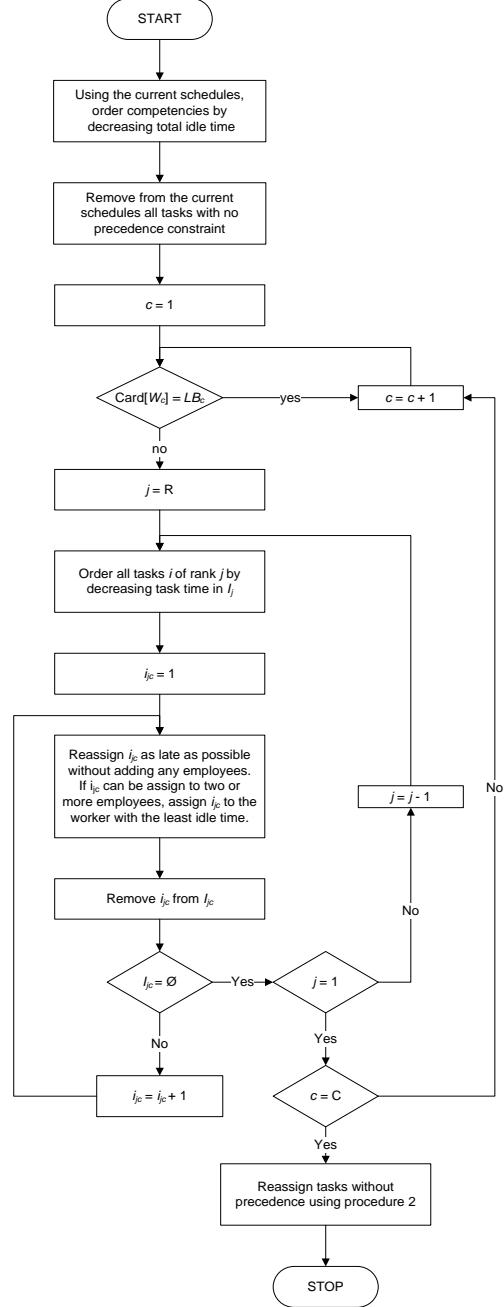


Figure 3.5: Procedure 3

with:

$c$  competency;

$LB_c$  minimum required number of worker for competency  $c$ ;

$W_c$  total number of workers of competency  $c$ ;

- $j$  rank index;
- $i_{jc}$  task of rank  $j$  and competency  $c$ ;
- $I_{jc}$  set of all tasks of rank  $j$  and competency  $c$ ;
- R largest rank number;
- C total number of competency;

## 3.6 Experiments

In order to demonstrate the applicability the general line balancing and workforce allocation procedure, this section presents an illustrative application on a relatively small problem instance compared to the real size problem, which contains over 600 tasks.

### 3.6.1 Numerical example

In order to illustrate the proposed approach, we used an example based on realistic data obtain from the project industrial partner. In this example, there are 4 competencies. Task times are rather long with respect to the cycle time, and the precedence relationships are set between tasks of the all type of competency. However, in this illustrative example, we only consider 60 tasks, instead of 600 tasks. Personnel data were generated randomly.

#### 3.6.1.1 Data

The precedence graph represents which task must be completed before others. We use a PERT like representation in order to present in the same graph the number of the task, the task time and the ability code (i.e., competency), as show is Figure 3.6.

task number	
task time	competency

Figure 3.6: Tasks representation

For the integrity of the example, the number of station has been found using the critical path, 32-33-36-38-39-40, which is of a length of 45 time units. The cycle time is fixed to 20 units. Therefore, the assembly line is made of three work stations. In each station, number of workers is not given and is unlimited.

The scheduling of the tasks assigned to each station has been carried out with AMPL Studio version 1.6.J with Cplex 10 on an Intel Core 2, CPU 1.86GHz with 1.97Go RAM.

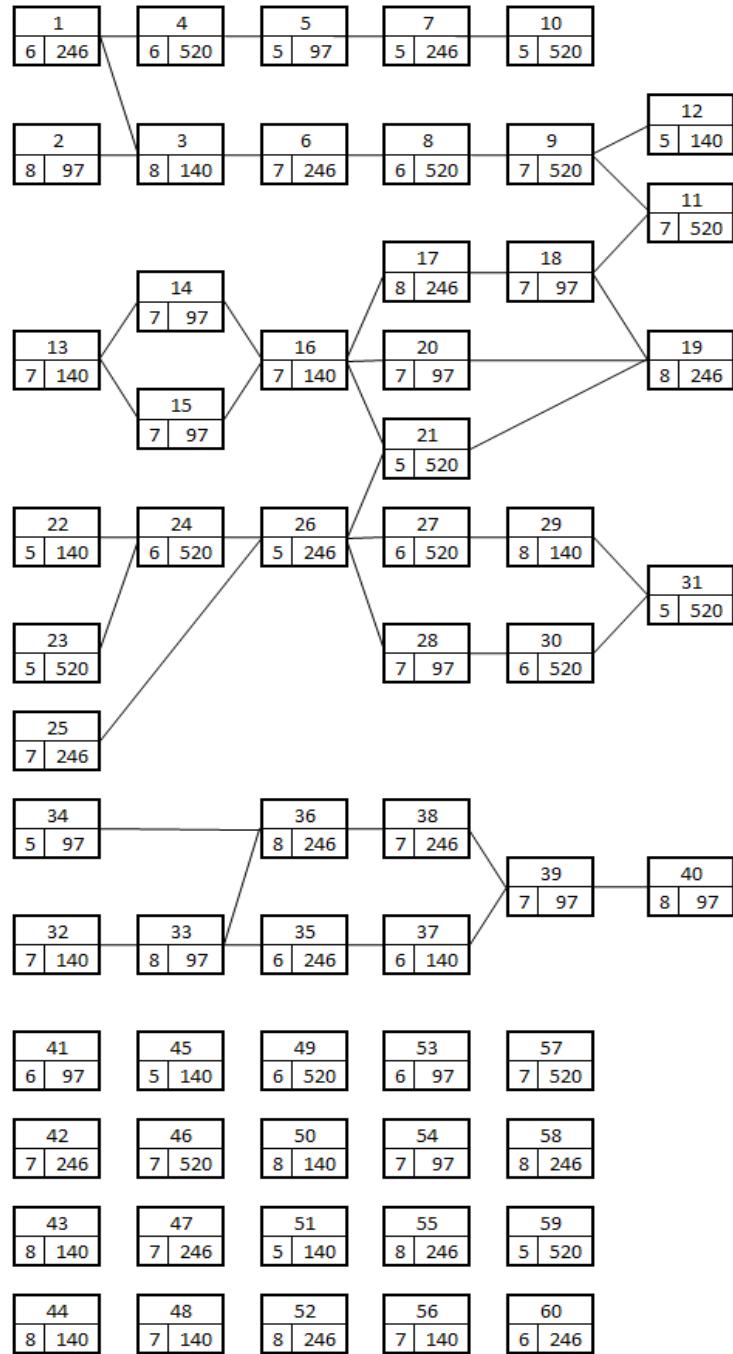


Figure 3.7: Precedence graph

### 3.6.1.2 General procedure illustration

Using the data presented previously, we have applied directly all procedures and optimization in order to exemplify and test as well their applicability. This sub-section illustrates this application.

Step 1: during this step, we defined the precedence graph and calculated the lower bound of the solution in terms of number of worker per station. These data are used by the procedure and presented in Section 6 to discuss the results.

Step 2: this step assign to all tasks with precedence constraints to each station in a forward scheduling approach. During this step, it is necessary to define iteratively the sets of tasks of each rank, in order to try to assign the tasks with the smallest rank first (see Table 3.1).

**Table 3.1: Sets  $I_{kj}$  of tasks of rank  $j$ , presented by decreasing order of task time**

Rank	Station $n=1$ (first iteration)	Station $n=2$ (second iteration)	Station $n=3$ (third iteration)
$I_1$	2, 13, 25, 32, 1, 22, 23, 34	36, 6, 16, 28, 27, 35, 7	18, 39, 12
$I_2$	3, 33, 14, 15, 4, 24	17, 29, 20, 38, 8, 30, 37, 10, 21	19, 40, 11
$I_3$	36, 6, 16, 35, 5, 26	9, 18, 39, 31	
$I_4$	17, 20, 28, 38, 8, 27, 37, 7, 21	19, 40, 11, 12	
$I_5$	29, 9, 18, 39, 30, 10		
$I_6$	19, 40, 11, 12, 31		

The resulting partial line balancing is presented for each station, respectively through Figure 3.8, Figure 3.9 and Figure 3.10. Letters in the left hand side of these

tables represent each worker's code. At this step, the workload of each worker is rather low as some tasks are missing and the scheduling is not optimal.

STATION 1																				
a	23					4														
b						24														
c							15													
d							14													
e	34						33													
f	2										5									
g	25										26									
h	1																			
i	22																			
j	13						3													
k	32																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

Figure 3.8: Schedule step 2, station 1

STATION 2																				
l							30					31								
m							21													
n					10															
o	27						8					9								
p						29														
q						37														
r	16																			
s	28					20														
t	7																			
u	35																			
v	6					17														
w	36					38														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

Figure 3.9: Schedule step 2, station 2

STATION 3																				
x								11												
y								19												
z	12																			
aa	39							40												
bb	18																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

Figure 3.10: Schedule step 2, station 3

We can see that the initial solution is not optimum and that many workers execute only one task. It is due to the assignment rules in Procedure 1. Indeed, a task is assigned just after the end of its longest predecessor, if nobody is available, we add a new worker. The aim is just to put as many tasks as possible in the first stations. The cycle time is the major constraint as well as the precedence constraints, and it is not the number of workers.

Step 3: This step consists in taking the previous line balancing, and in optimizing using Cplex, the schedule. We applied the mathematical programming model presented previously. The results are presented through Figure 3.11 to Figure 3.13.

STATION 1																				
a	23				4															
b					24															
c	2											33								
d							15					5								
f	34						14													
h	1				25			26												
i	22			32																
k	13						3													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

Figure 3.11: Schedule step 3, station 1

STATION 2																				
l	27							30						9						
n								8						31						
o								10						21						
p								29												
r	16													37						
s	28							20												
t	7			35																
u	6				17															
w	36							38												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

Figure 3.12: Schedule step 3, station 2

STATION 3																				
x								11												
y								19												
z	12																			
aa	18							40												
bb	39																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

Figure 3.13: Schedule step 3, station 3

In this step, we can underline that we need, after optimization, 6 less employees. Indeed, tasks are not assigned just after its longer predecessor but when an employee is available (in its required competency). The objective here is indeed to minimize the number of employees. During step 2, we obtained a feasible initial solution for the assignment of the tasks with predecessor. In step 3, the solution becomes optimal.

Step 4: When the schedules are optimized, it is necessary to include the remaining tasks with no precedence constraints in order to have a feasible solution. We applied procedure 2. The results are presented through Figure 3.14 to Figure 3.16.

STATION 1																				
a	23					4					59									
b						24					49									
c	2										33									
d	41					15					5									
f	34					53					14									
h	1					25					26									
i	22					32					44									
k	13										3									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

Figure 3.14: Schedule step 4, station 1

STATION 2																				
l	27					30					9									
n							8					31								
o	57										10					21				
p	51					29														
r	16					45										37				
s	28					20														
t	7					35					55									
u	6					17														
w	36					38														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

Figure 3.15: Schedule step 4, station 2

STATION 3																				
x	46										11									
y						52					19									
z	12					43					56									
aa	18					40														
bb	39					54														
cc	58					42														
dd	47					60														
ee	50					48														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

Figure 3.16: Schedule step 4, station 3

This step permits to first assign tasks without predecessor to the least loaded employee. The total workload is thus smoothed and none of the employees are either fully loaded or unfairly loaded compared to the others. This policy is a company choice who prefers to load equally all its employees.

Step 5: Finally, in order to improve the solution we use Procedure 3. This step permits to improve the solution by trying to eliminate the least loaded workers. We use the procedure for each competency iteratively, which have not reached their lower bound. We thus try to move tasks to the following station and thus to create a gap so as to insert tasks and potentially free workers to improve the objective.

STATION 1																			
a	23			4			49												
b	59			24				57											
c	2																		33
d	41						15												5
f	34			53															14
h	1				25														26
i	22			32															44
k	13					3													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
	20																		

Figure 3.17: Schedule step 5, station 1

STATION 2																			
l	27				8														9
o	46						10												21
p	51			29															
r	16			45															37
s	28			20															
t	7			35				55											
u	6				17														
w	36			38															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
	20																		

Figure 3.18: Schedule step 5, station 2

STATION 3																			
x				30				31				11							
y					52					19									
z	12			43					56										
aa	18				40														
bb	39				54														
cc	58				42														
dd	47				60														
ee	50				48														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
	20																		

Figure 3.19: Schedule step 5, station 3

The improvement is useful in this particular case, but not necessary for others because of the particular antecedences. Here, one worker has been freed. After this step, it can be interesting to use a simple mathematic procedure to finally assign tasks as soon as possible. Indeed, in case of delays, it is preferable to have some idle time at the end to catch up.

### 3.7 Analysis and discussion

The objective of this study is twofold; at first the model gives an optimal solution for one station at a time and improves the stations' performance. Then, in a second time, the performance of the assembly line including the three stations is considered. In order to characterize the quality of the final solution, we use two parameters: number of worker used and the idle rate by worker and by station. We also use the lower bounds per competency as discussed earlier, as presented in Table 3.2.

Table 3.2: Lower bounds per competency

Competency code	246	520	97	140	total
Number of worker	6	5	5	6	22
Idle time	9	11	5	19	44

Table 4 shows that the last step can be important. It often permits to eliminate one worker. Next, Table 3.3 summarizes the results and shows the evolution of the number of worker and idle time per station for each step. We can notice that for each station, the average idle time decreases. Between step 1 and step 2, the numbers of worker decreases, which demonstrate the need for an optimization technique to schedule the tasks.

**Table 3.3: Result for step 4 and 5 by abilities**

	Competency code	246	520	97	140	total
	$LB_c$	6	5	5	6	22
<b>Step4</b>	Number of worker	7	6	6	6	25
	Average idle time by worker	20,71%	25,83%	20,83%	15,83%	
<b>Step5</b>	Number of worker	7	5	6	6	24
	Average idle time by worker	20,71%	11%	20,83%	15,83%	

Step 3 integrates the tasks without antecedence. This is why it is necessary to add workers. We introduce them in station 3 to have the same number of worker on each station. We can also notice that we use 25 workers while the lower bound is 22. There is one extra worker for each competency, except for competency 140, which reaches its lower bound. As we already said, the lower bound is not necessarily reachable because of the antecedences and indivisible tasks.

**Table 3.4: Result step by step and by stations**

station	Step 2			Step 3			Step 4			Step 5		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Number of worker	11	12	5	8	9	5	8	9	8	8	8	8
Average idle time rate per worker	53.64 %	51.67 %	58%	36,2 5%	35,56 %	58%	16,8 8%	21,67 %	23,75 %	12,5 %	18,13 %	21,25 %
	53,57%			40,91%			20,8%			17,29%		

We can notice that step 1 provides in this example a near final tasks assignment. Indeed, after the first optimisation with all tasks, the number of worker does not change very much. Furthermore, in this illustrative example, the objective was to minimize the number of workers, all the while adopting a procedure that tends to fairly distribute the workloaded.

### 3.8 Conclusion and future research

The aim of this procedure is to minimize the number of skilled workers needed to carry out the assembly tasks. Although the procedure is effective for rather small problem instances, the experiment shows that a reasonable number of tasks can only be solved relatively quickly with an exact method. If the problem has more than 25 tasks per station, it is necessary to use a heuristic method, which needs to be developed. Furthermore, we have not taken into account the space constraints, which prevent several workers to be located at the same time in different parts of the aircraft. This constraint is very important because of safety issues as well as loss of time when workers are too crowded in the plane. Consequently, further research may include new constraints such as space constraints or shift constraints (e.g., breaks, shift, and vacation). Next, another issue to be solved is to take into account the labour dependencies due to the need to assemble several aircraft simultaneously by allowing worker to move from one aircraft to the other. This would allow managers to assign

floaters, and further decrease the need for workers, by increasing flexibility, which is pointed out by many researchers to improve solutions.

## CHAPITRE 4 : ASPECTS MÉTHODOLOGIQUES ET RÉSULTATS COMPLÉMENTAIRES

### 4.1 Méthodologie de résolution

Cette partie va illustrer, pas-à-pas, à l'aide de l'exemple pour la station n°1, la méthode de pré-assignation des tâches, décrite par le logigramme de la Figure 3.3.

Le diagramme d'antécérence est rappelé dans l'Annexe A. Contrairement à la Figure 3.7, ici ne sont représentées que les tâches et les codes sont identifiés par des couleurs. La durée de chacune des tâches est indiquée dans l'Annexe B.

La première étape consiste à mettre sur le poste le même nombre d'employés qu'il y a de tâches au rang 1 du diagramme de précédence, soit 8 employés (3 roses, 2 jaunes, 2 verts et 1 bleu).

a																				
e																				
f																				
g																				
h																				
i																				
j																				
k																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

Figure 4.1: Détermination du nombre d'employés pour le rang 1

Le planning est fait sur une longueur de 20 unités de temps (qui est le temps de cycle). Chacun des employés embauchés a une compétence particulière qui est représentée ici à l'aide de couleur.

L'étape suivante consiste à assigner les tâches de rang 1 aux employés. On obtient alors le planning suivant :

a	23																			
e	34																			
f		2																		
g		25																		
h		1																		
i		22																		
j		13																		
k		32																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

Figure 4.2: Assignation des tâches de rang 1

La Figure 4.2 montre une affectation des tâches de rang 1. La seule contrainte prise en compte pour ces assignations est la compétence requise. Il serait donc possible que la tâche 1 soit assignée à l'employé h ou à l'employé g indifféremment.

Une fois le rang 1 assigné il faut assigner les tâches du rang 2 pour cela la procédure assigne les tâches dont la durée est la plus élevée soit 3 puis 33 puis 14... ainsi de suite jusqu'à ce qu'une tâche pose problème. Si cela est le cas, il faut mettre cette tâche de côté pour l'assigner dans le poste suivant. Pour cette affectation, il est très important de bien planifier les tâches au plus tôt quitte à employer une nouvelle personne. Si un rang est totalement affecté à un poste sans problème, il suffit de passer au suivant. Dans le cas présent, toutes les tâches du rang 2 peuvent être assignées.

L'assignation à la fin du rang 2 est telle que présenté à la Figure 4.3. Il a fallu rajouter 3 personnes afin d'assigner les tâches au plus tôt. Par exemple, la tâche 14 devait être juste après 13 cependant à la fin de la période 7 aucun employé du code 97 n'était disponible (l'employé f n'est disponible qu'à la fin de la période 8), il a donc fallu ajouter un employé. Notons que l'ajout d'un employé se fait de façon incertaine. Il

n'est pas sûr qu'après la résolution mathématique cet employé ait encore des tâches à accomplir.

a	23					4														
b						24														
c						15														
d						14														
e	34					33														
f	2																			
g	25																			
h	1																			
i	22																			
j	13					3														
k	32																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

Figure 4.3: Assignation des tâches de rang 2

L'affectation du rang 3 débute par la tâche 36, ses prédecesseurs directs sont 33 et 34. Entre celles-ci, 33 se termine le plus tard donc 36 ne sera pas assignable avant la fin de 33. Sa date de fin au plus tôt est à la période 15 or la tâche 36 a une durée de 8 unités de temps, elle n'est donc pas affectable à ce poste ( $15 + 8 = 23 > 20$ ). Il est donc nécessaire de la mettre de côté afin qu'elle soit affectée au poste suivant. Il en va de même pour les tâches 6, 16 et 35, cependant les tâches 5 et 26 peuvent être assignées au poste 1.

L'étape suivante permet de voir si des tâches du rang suivant sont assignable encore à ce poste. Cela sera possible si tous les antécédents sont déjà assignés à ce poste et si la tâche ne se finit pas après le temps de cycle. Ici, il est clair que les seules tâches susceptibles d'être assignées à ce poste sont les tâches 7, 27 et 28. Cependant, aucune d'entre elles n'a un temps opératoire permettant de tenir dans ce poste. Finalement, on remarque qu'à partir du rang 3 aucune tâche des rangs suivants n'est assignée au poste 1 il faut donc changer de poste.

La Figure 4.4 présente une solution faisable pour le poste 1 :

a	23					4																		
b						24																		
c							15																	
d							14																	
e	34					33																		
f	2													5										
g	25												26											
h	1																							
i	22													3										
j	13																							
k	32																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20				

Figure 4.4: Première solution faisable pour le poste 1

Lorsque l'on change de station, il est nécessaire de reprendre le diagramme d'antécérence afin de remettre les tâches au bon rang. Ce nouveau diagramme est présenté dans l'Annexe C. Une fois les tâches à leur nouveau rang la méthode d'assignation au poste est la même que celle qui vient d'être présentée. Le Table 3.1 classe les tâches à affecter selon leur rang et leur durée, ainsi il suffit de suivre cet ordre pour réaliser l'affectation.

## 4.2 Analyse critique du modèle et de la méthode de résolution

### 4.2.1 Assignation tâche/poste/employé (Étape 1)

La méthode présentée dans ce mémoire est une méthode permettant de trouver manuellement une première solution faisable. Elle ne garantit pas l'optimalité de la solution. L'exemple présenté dans le chapitre 3 le montre parfaitement. Cette méthode permet d'assigner un maximum de tâches au poste 1 en ne garantissant que le respect des antécérences, du temps de cycle et des compétences. En effet, elle considère un nombre illimité de ressources humaines, ce qui n'est pas vrai dans la réalité des

entreprises et encore moins lorsqu'il s'agit de réaménager les plannings des employés pour chaque avion. Comme cela a été souligné précédemment, les tâches sont assignées à la première personne disponible sans tenir compte d'une quelconque préférence. Si une tâche peut être assignée à deux employés, il n'y a pas de règles de priorité.

Le deuxième point critiquable est le choix de réaliser les tâches au plus tôt. En effet, ce choix aurait pu être de planifier les tâches au plus tard, voire d'équilibrer tous les postes pour qu'il y ait, soit le même nombre d'employés, soit le même nombre de tâches à exécuter. Le fait de réaliser les tâches au plus tôt peut permettre de gérer bien mieux les retards, de livraison ou d'exécution des tâches. Il est logique qu'une autre méthode donne un résultat final différent car le modèle ne gère pas le déplacement de tâches d'un poste à l'autre. Il est probable qu'en assignant les tâches au plus tard, c'est-à-dire en commençant à assigner les tâches de plus haut rang au dernier poste, la solution finale soit meilleure que celle trouvée ici. Des études seraient donc à prévoir pour mieux voir l'impact de ce choix.

#### **4.2.2 Assignation des tâches sans précédence (Étape 3)**

La procédure 2 présentée à la Figure 3.4 permet d'assigner les tâches les plus longues aux employés les moins chargés et cela de manière itérative. Cette règle d'affectation lisse la charge de travail pour chacun des employés. Aucun des employés présents sur la ligne n'a de temps morts trop importants. Il aurait été possible de faire un choix différent et de charger au maximum certains employés pour laisser à d'autre la possibilité d'être mobile sur d'autres postes du fait des grands temps libres qu'ils auraient eu. Ce choix aurait permis de limiter le nombre total d'employés sur la ligne au complet et non poste par poste.

Une autre méthode d'assignation pourrait être d'assigner une tâche au premier employé dont le temps mort consécutif est égal à la durée de cette tâche. Il n'est pas ici possible de dire quelle méthode permettrait d'obtenir les meilleurs résultats mais il serait intéressant de tester une à une les méthodes pour ainsi savoir si l'une d'entre elles peut améliorer la solution finale plus rapidement. Malgré les résultats qu'il serait possible

d'avoir avec ces tests, il ne faut pas oublier que la politique de l'entreprise aura le dernier mot vis-à-vis des choix d'allocation. En effet si elle ne souhaite pas avoir de personnels mobiles sur ses lignes, la méthode présentée ici sera donc la meilleure.

Soulignons finalement que la procédure 2 permet d'ajouter les nouveaux employés aux postes les moins chargés en termes de nombre d'employés. Ainsi, le nombre d'employés par poste est lissé et tend à devenir uniforme d'un poste à l'autre. Cependant, ceci est encore un choix à faire puisqu'il serait possible sur des postes qui seraient plus dangereux (dans une usine utilisant des produits chimiques par exemple) de limiter le nombre d'employés à certain poste.

#### **4.2.3 Amélioration (Étape 5)**

La procédure 3 proposée à la Figure 3.5 permet de cibler un premier code métier sur lequel des améliorations seraient possibles. Comme cela a déjà été souligné, l'amélioration ne porte que sur la fonction objectif et non sur un choix de politique d'entreprise face aux temps morts. C'est d'ailleurs pourquoi les améliorations ne portent pas sur les codes métiers ayant déjà atteint leur limite inférieure calculée à l'étape 1.

Il est important de noter que lors de cette procédure il ne faut en aucun cas embaucher un nouvel employé sur aucun poste sauf lors du rajout des tâches sans antécédence si la première partie de la méthode a permis de supprimer des employés. Si cela devenait nécessaire, il faudrait revenir en arrière car la solution finale serait moins bonne que la précédente.

Le processus d'amélioration peut être long selon le nombre de tâches avec antécérences de chaque code métier. Il serait possible de croire que l'amélioration devrait avoir lieu avant l'affectation des tâches sans antécérences puisqu'il est nécessaire de les enlever pour mettre en place la procédure 3. Cependant, il ne serait pas possible de savoir quelle compétence a atteint sa limite inférieure et laquelle a le plus de difficulté.

La procédure 1 ne permet pas, lors de l'amélioration, à une tâche de se déplacer vers le poste précédent, de même l'affectation au plus tard se retrouve souvent bloquée

par le chemin critique. Il est donc rare de voir des tâches aller du poste 1 au poste 2. Ainsi, la méthode d'amélioration crée des trous dans le planning des employés du poste 2. Ces trous laisseront plus d'espace aux tâches sans antécédence et libèreront des employés si cela est possible.

Enfin, il est nécessaire de souligner que cette procédure ne garantit pas une amélioration. En effet, la limite inférieure du nombre d'employés n'est pas toujours atteignable car elle ne tient pas compte des antécérences.

### **4.3 Discussion des indicateurs**

Dans la partie 2.5.1, des indicateurs ont été présentés afin d'évaluer d'une part la performance d'une solution aux diverses procédures de balancement, et d'autre part la performance du modèle de programmation mathématique en fonction de la structure du problème. Ces indicateurs ont notamment été utiles lors de la création de l'exemple industriel puisqu'ils ont permis de mettre en avant certaines limites du modèle mathématique. Ces indicateurs sont classés ci-dessous par ordre croissant d'importance.

#### **4.3.1 Le nombre d'employés utilisés**

L'objectif du projet présenté a été de minimiser ce chiffre pour chaque poste. En gardant les ouvriers assignés à leur poste (sans possibilité de changer de poste durant un temps de cycle), cet objectif, poste-à-poste, a été élargi à la ligne entière. Une borne inférieure a été calculée pour chaque compétence permettant de comparer la solution trouvée à ce minimum, celui-ci n'étant atteignable que dans le cas où les tâches n'auraient aucune antécérence. Il n'est donc pas possible d'avoir moins de personnes sur les postes que cette borne.

#### **4.3.2 Le taux d'inactivité**

Ce taux d'inactivité a été calculé pour chacun des employés sur chacun des postes. Grâce à lui, il a été possible de déterminer une politique d'assignation des tâches sans antécérences, mais également de définir une règle pour la procédure d'amélioration

de la solution. Ce taux est le rapport des temps morts sur le temps de cycle pour un employé donné. Le taux d'inactivité total pour une compétence est lié au nombre d'employés et à la durée de toutes les tâches de cette compétence. On remarque qu'avec l'exemple du chapitre 3 ce taux varie de 0 à 45% à la fin de l'étape 4 et qu'il varie de 0 à 35% après l'amélioration.

Ce taux est donc un indicateur correct permettant de voir si la solution trouvée est bonne, cependant il serait judicieux de voir si celui-ci peut devenir une borne à partir de laquelle des améliorations sont possibles ou non.

### **4.3.3 Le temps de résolution de la phase d'optimisation**

Le temps de résolution est un des facteurs les plus importants car il donne les premières limites du modèle. Il est possible que la mémoire de l'ordinateur soit une limite cependant le temps de calcul deviendra irraisonnable avant. En effet, il ne faut pas perdre de vue l'application industrielle du problème soulevé ici. Chaque avion demande un nouveau balancement, soit tous les 6 jours, il n'est donc pas intéressant pour l'entreprise que le calcul de ce balancement prenne plusieurs jours. Les expériences faites dans le plan d'expérience ont permis de mettre en avant le fait que plus il y a de tâches et de personnel, plus la durée du calcul est longue. Cependant s'il y a beaucoup de codes métiers différents alors cela accélérera le calcul. Le temps de calcul est lié au nombre de combinaisons possibles, c'est pourquoi, si sur le poste, il y a trop d'employés par rapport aux tâches à effectuer le temps de calcul sera plus long car l'arbre de décision sera plus étendu. Les expériences proposées dans la section 2.5 ont été pour la plupart résolues dans un temps variant de 1 seconde à plus de 7 heures. Pour une dizaine d'entre elle, aucune solution n'a été trouvée dans un temps inférieur à 10 heures.

Grâce à cet indicateur, le nombre maximum de tâches à assigner a été limité à 25 afin d'avoir un temps de résolution inférieur à 10 minutes. Comme cela a été souligné, le fait d'ajouter une tâche au poste augmente le temps de résolution pouvant parfois le multiplier par 10.

Finalement, le plan d'expérience a permis de valider le modèle d'optimisation et d'en trouver les limites pour finalement proposer un exemple solvable rapidement mettant en pratique la méthodologie élaborée au cours de cette maîtrise.

## CHAPITRE 5 : DISCUSSION GÉNÉRALE

Dans le domaine de l'aéronautique et particulièrement dans les avions d'affaires, les clients sont de plus en plus exigeants concernant les produits. La personnalisation de ce type de produit est l'une des parties les plus importantes et les plus complexes. Le client souhaite un appareil qu'il sera le seul à posséder mais qui répondra aussi au mieux à ses attentes. C'est pourquoi l'entreprise étudiée propose un grand panel d'options qui doivent être souvent adaptées aux demandes des clients. Dans ce type d'industrie, le produit est tellement cher que le client veut être totalement satisfait, l'entreprise doit donc s'adapter.

Afin de satisfaire les clients en garantissant la qualité des produits, il est nécessaire de gérer au mieux le balancement de la ligne. Celui-ci est très important pour la rentabilité de la ligne. Une ligne mal balancée aura de gros problèmes pour tenir les délais annoncés ce qui peut coûter beaucoup à une entreprise et principalement dans l'industrie aéronautique où les pénalités de retard sont importantes. De même, la bonne gestion du personnel va permettre de réduire les coûts de main-d'œuvre puisque seul le bon nombre de personnes sera utilisé en minimisant au maximum les temps morts.

Souvent les options proposées sont les plus nombreuses à l'intérieur de la cabine, ce qui complexifie principalement la ligne d'habillage intérieur. Cette ligne, sur laquelle porte l'étude présentée ici, doit donc être revue pour chaque produit et il n'est pas question de redessiner la ligne d'assemblage mais plutôt de la rebalancer et de revoir les plannings du personnel.

## 5.1 Compétences de la main-d'œuvre

Face à l'allocation d'une ressource à une tâche, les managers doivent se poser plusieurs questions. La plus importante est « l'employé a-t-il les compétences pour réaliser cette tâche dans un temps raisonnable ? ». En effet, il est probable que pour des tâches assez simples, n'importe lequel des employés puisse réaliser la tâche mais celui dont ce sera la spécialité la réalisera bien plus vite. Dans le cas de l'entreprise étudiée, les employés et les tâches ont un code métier qui leur est attribué afin de permettre une allocation tâche/personne la meilleure possible.

La main-d'œuvre dans ce genre d'industrie de pointe est très spécialisée et donc très dispendieuse. Il est donc nécessaire de l'utiliser adéquatement et de ne pas laisser de temps morts inutiles dans les agendas des employés. La gestion rigoureuse de la main-d'œuvre est nécessaire. Cependant, une autre question se pose, le nombre d'employés optimal a été déterminé pour l'avion le plus complexe mais que faire des employés superflus pour les autres appareils moins compliqués ? Aux vues de leurs taux horaires, il n'est pas possible de les laisser de côté, mais il n'est pas non plus possible de les renvoyer pour des raisons syndicales. Aucune solution n'est vraiment définie pour ces cas de figure. Il serait peut-être envisageable d'employer ces ouvriers pour d'autres tâches en dehors de la ligne ou d'employer des ouvriers intérimaires pour les avions comportant plus de travail. Il a cependant été vu au cours de cette étude que la solution d'utiliser des employés moins qualifiés pouvait poser problème. Il est donc nécessaire de ne pas mettre cette question de côté lors de l'application industrielle puisqu'elle peut entraîner des coûts supplémentaires.

## 5.2 Qu'est-ce qu'une allocation et un ordonnancement réalisables ?

Boysen et al. (2007) définissent le balancement de ligne faisable comme une affectation des tâches aux stations qui garantit qu'aucune contrainte de précédence n'est violée.

Cette définition peut être complétée en ajoutant qu'une assignation est réalisable si l'entreprise à des employés ayant les bonnes compétences pour réaliser les tâches et s'ils sont disponibles au moment de réaliser la tâche. Dans le problème étudié ici, le but est de minimiser le nombre d'employés utilisé sur chaque avion. Cependant à aucun moment la notion de capacité finie de ressources humaines ne rentre en compte comme si l'entreprise avait un nombre illimité d'employés. Il est possible de considérer cela si l'entreprise engage des intérimaires mais cela risque de jouer dans la productivité des équipes comme cela a été vu dans la revue bibliographique. C'est pourquoi cette contrainte devrait être prise en compte lors de la résolution.

## 5.3 Le choix de la fonction objectif

Comme cela a été souligné dans la revue de littérature, de nombreux objectifs peuvent être utilisés lors d'un balancement de ligne ou une assignation de personnel. Lors de cette étude, l'objectif a été de minimiser le nombre d'employés par poste. Ce choix permet d'obtenir une solution basée sur le temps de cycle puisqu'il est nécessaire d'exécuter toutes les tâches durant ce temps. Si cette charge de travail est réalisable par ce nombre minimum d'employés alors, elle le sera aussi par un nombre plus important d'employés. Cette minimisation est aussi un point de départ pour des études futures ou pour la gestion du personnel dans l'entreprise.

Cependant, d'autres objectifs auraient pu être proposés afin d'être plus proches de l'industrie. En général, une entreprise a un nombre d'employés donné et elle ne peut donc pas le faire varier à chaque temps de cycle. Nous aurions donc pu choisir de lisser la charge de travail pour que tous les employés soient occupés durant le temps de cycle.

De même, la fonction objectif aurait pu porter sur la minimisation des coûts engendrés par l'utilisation de chacun des employés selon leur taux horaire.

Le choix de la fonction objectif fait varier la solution mais ne change pas les contraintes du problème. De plus, il n'est pas rare de voir deux fonctions objectifs différentes donner le même résultat, en effet la minimisation des coûts et la minimisation du nombre d'employés sont assez liées.

## 5.4 Les points soulignés mais non pris en compte dans le modèle

De nombreux paramètres vus dans la littérature ou dans des applications industrielles ne sont pas pris en compte dans la modélisation présentée ici. Une liste des points les plus remarquables est dressée dans cette sous-partie, sans être exhaustive. Elle propose également des pistes pour les points soulevés afin qu'ils soient pris en compte dans les études à venir.

- *Les temps de pauses et les vacances* : dans une entreprise telle que celle étudiée le nombre d'employés est important. Il est donc nécessaire de prendre en compte les temps de pause et les vacances car cela entre en compte dans la rentabilité. En ce qui concerne les pauses, une solution acceptable serait de les enlever du temps de cycle, celui-ci servant lors de la résolution tiendrait compte des pauses journalières que ce soit les repas ou les pauses café. Pour les vacances, une solution serait de stopper la production durant un moment ce qui permettrait à tous les employés d'être en vacances en même temps, il n'y aurait donc plus ce problème de prise en compte des désirs de chacun et donc l'embauche d'intérimaires qui risqueraient de ralentir la production du fait de leur inexpérience.
- *Les préférences* : Les employés ont souvent des préférences concernant les tâches qu'ils réalisent. Bien qu'ils aient les compétences pour réaliser toutes les tâches de leur code métier, il est possible que certaines ne leur plaisent pas.

Les préférences peuvent aussi concerner les équipes ou les quarts de travail. Si certaines tensions ont été senties entre des employés, il est préférable de ne pas les faire travailler ensemble car leur productivité sera moindre.

- *Les quarts de travail* : De nombreuses entreprises d'assemblage, surtout celle dont les délais doivent être raccourcis, mais qui ont un nombre de tâches important, utilisent au minimum deux quarts de travail. Ces quarts sont en général de jour et de soir. Ce qui permet d'avoir deux fois huit heures de travail et donc de raccourcir les délais.
- *Les ressources matérielles* : Dans certaines industries de pointe ou dans celle demandant le déplacement de charges, il est souvent nécessaire de tenir compte des ressources matérielles (chariot élévateur, palan...). Dans cette étude, ce point n'a pas été examiné car l'entreprise elle-même considérait cela comme annexe et n'avait pas les données concernant ces ressources et leurs utilisations. Pour en tenir compte, il est obligatoire de relier chaque tâche à la ressource dont elle a besoin et de faire les plannings d'utilisation de ces ressources.
- *Les retards de livraison* : L'entreprise travaille en Juste-à-Temps (JAT), les meubles sont faits sur mesure et selon le choix des clients. En général, le bois utilisé est rare et le sous-traitant ne peut se permettre de faire des stocks. Il est donc obligatoire de gérer l'approvisionnement en même temps que la production et le balancement de la ligne. Les retards de livraison ne sont pas pris en compte ici, mais peuvent être un facteur très important pour le retard sur la ligne. Pour éviter de prendre trop de retard à cause des livraisons, deux solutions sont envisageables. Tout d'abord, prévoir un plan de secours quelque temps avant afin de rebalancer la ligne grâce aux informations du moment. Il a été montré dans l'exemple numérique que de nombreuses tâches sans antécédence sont présentes et donc très facilement déplaçables. La deuxième solution serait de placer au plus tard les tâches nécessitant l'intervention d'acteurs extérieurs à l'entreprise tout en gardant la même date de livraison. Il serait cependant nécessaire d'avoir un espace de stockage s'il n'y a pas de retard.

Ces deux solutions sont donc envisageables pour la gestion quotidienne. Le modèle présenté dans ce projet ne tient pas compte des retards par manque d'information. Les objectifs du projet n'allait pas non plus dans le sens de la gestion des crises telles que les retards. Souvent ces entreprises font payer de lourdes pénalités à leurs fournisseurs si ceux-ci les livrent en retard. Ceci permet de n'avoir que très peu de retard à gérer.

- *La réparation* : Cette étape est l'étape suivant l'inspection. Les avions sont finis et doivent donc être inspectés afin qu'ils soient livrés aux clients sans défauts. En effet lorsque les employés montent les meubles et travaillent dans la cabine il est possible, vu l'espace réduit, que les équipements déjà en place soient abimés. Le dernier poste est donc un poste de démonte et remonte de meubles puisqu'il n'est pas concevable de livrer un appareil dont les équipements sont, ne serait-ce que légèrement, abimés ou rayés. Cette partie non planifiable au début ne rentre pas dans l'étude actuelle. Comme le point précédent, elle fait partie de la gestion d'urgence ou de crise.

- *Temps opératoire variable* : Dans cette étude, le modèle déterministe a été retenu mais dans la réalité le modèle est plutôt stochastique. En effet, la durée opératoire réelle des tâches varie. Cela peut être dû à de nombreuses raisons. Dans la durée de la tâche, le temps de déplacement au magasin, par exemple, est comptabilisé. Cependant, il est possible qu'il y ait de l'attente, qui n'est, elle, pas prise en compte. Il est très difficile de gérer les allers et venues de tous les employés. De plus, il est possible que des complications arrivent durant l'assemblage. Tout cela n'entre pas dans le modèle présenté ici. Pour remédier à cette variation du temps opératoire des tâches, il suffirait d'entrer un coefficient qui allongerait le temps.

D'autre part, on observe souvent, sur une ligne dont certaines tâches se répètent d'un produit sur l'autre, un phénomène d'apprentissage. Ce phénomène se traduit par une diminution du temps de tâche.

- *La capacité finie des ressources humaines*. Comme cela a déjà été dit, le modèle présenté ici ne tient pas compte du nombre limité d'employés. Cette limitation est plus contraignante que de considérer les ressources humaines comme illimitées. Cependant

cela serait plus réaliste puisqu'une entreprise a un nombre donné d'employés qui ne peut varier selon le type de produit.

- L'espace disponible. Le modèle présenté ne met pas de limitations sur le nombre d'employés dans une section physique cependant l'espace est limité et encore plus dans les jets d'affaires, c'est pourquoi il serait nécessaire à l'avenir d'en tenir compte.

## CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Ce mémoire propose un modèle d'assignation des tâches prenant en compte les compétences des employés. Contrairement à ce qui est proposé actuellement dans la littérature, ce modèle permet le balancement de la ligne d'assemblage ainsi que l'assignation des tâches aux employés, en prenant en compte plusieurs contraintes importantes dans l'industrie telle que la possibilité d'utiliser deux employés simultanément pour effectuer une même tâche.

Cependant, le modèle présenté n'est pas parfait, des améliorations sont à prévoir concernant par exemple la taille des problèmes traitables ainsi que la gestion de plusieurs postes en même temps. Il ne prend pas en compte certains paramètres qui peuvent s'avérer importants dans le cas d'une implantation réelle en entreprise. Ce modèle est utilisable tel quel dans une industrie de pointe ayant de nombreuses contraintes mais uniquement un faible nombre de tâches.

Tout d'abord, il a été remarqué que la méthode de résolution exacte était loin d'être la meilleure méthode en termes de temps de résolution. Une méthode heuristique permettrait probablement d'obtenir de très bons résultats, proche de l'optimum, pour un temps de calcul bien plus court. Elle pourrait donc gérer des problèmes plus proches de la réalité industrielle contenant beaucoup plus de tâches.

Un des aspects non pris en compte par le modèle est l'interdiction de réaliser des tâches simultanées. Les problèmes d'espace et de sécurité sont les deux principales raisons de l'importance de cette contrainte. En effet il est assez difficile de l'oublier lorsque deux employés se voient attribuer des tâches simultanées dans les toilettes mais elle devient plus difficile à concevoir lorsqu'il s'agit de la sécurité des hommes ou des machines. Il est donc nécessaire de rajouter ces contraintes qui peuvent souvent être gérées à la main pour de petits exemples mais deviennent ingérables pour un cas industriel comme celui étudié. Ainsi, les variables devront être, à la fois, temporelles et spatiales. Il serait aussi intéressant de gérer les plannings sur plusieurs jours et donc

plusieurs quarts de travail en évitant de diviser les tâches en période inégale comme cela a été décrit précédemment.

Concernant l'usine étudiée, certaines recommandations peuvent être formulées. Afin d'éviter au maximum les temps morts pour certains employés à leur poste, il serait peut-être préférable de les autoriser à être mobiles une fois leurs tâches programmées terminées et donc d'aller aider à d'autres postes. Pour le moment, seuls les employés spécialisés cockpit se déplacent de poste en poste. Cependant, il serait intéressant que les autres employés puissent également le faire. Il y aurait donc un chevauchement d'équipe à certains moments, mais cela serait bien plus compliqué à gérer.

De même, le projet a été lancé seulement pour un modèle d'avion donné, le plus complexe, mais comme cela a été souligné il est important de refaire le balancement pour chaque nouvel appareil qui entre sur la ligne afin de donner leur planning aux employés. Il serait donc très intéressant d'étudier le séquencement des avions et donc de travailler sur un modèle mixte ou multi-produit. L'avantage, si en plus les équipes sont un peu plus mobiles, serait de permettre de prendre du retard à cause des avions très complexes et de le rattraper sur des avions assez simples. Cependant pour cela, il est nécessaire de fixer une date limite aux clients après laquelle les modifications sont impossibles. Cette requête est assez difficile à mettre en place car le produit est tellement dispendieux que le client veut être entièrement satisfait y compris s'il change d'avis au dernier moment. Il est donc compréhensible que l'entreprise ait choisi de se baser sur le modèle comportant le plus d'options afin de déterminer son nouveau temps de cycle.

Finalement, ce projet va être un point de départ mais également un bon point de comparaison pour les études futures. Ce modèle jumelé à une résolution de type exacte donne des résultats plus que satisfaisants si on s'en tient aux hypothèses de départ.

## BIBLIOGRAPHIE

- Aase, G.R., Olson, J.R., Schniederjans, M.J. (2004). U-shaped assembly line layouts and their impact on labor productivity: An experimental study. *European Journal of Operational Research*, 156 (3), pp. 698-711.
- Andrés, C., Miralles, C., Pastor, R. (2008). Balancing and scheduling tasks in assembly lines with sequence-dependent setup times. *European Journal of Operational Research*, 187 (3), pp. 1212-1223.
- Artigues, C., Demassey, S., Néron, E. (2008). *Resource-Constrained Project Scheduling*. Wiley-Iste.
- Baker, K.R., Magazine, M.J. (1977). Workforce scheduling with cyclic demands and day-off constraints. *Management science*, 24 (2), pp. 161-167.
- Baptiste, P., Giard, V., Haït, A., Soumis, F. (2005). *Gestion de production et ressource humaine - Méthodes de planification dans les systèmes productifs*. Montréal: Presses Internationales Polytechnique.
- Battini, D. , Faccio, M., Ferrari, E., Persona, A. Sgarbossa, F. (2007). Design configuration for a mixed-model assembly system in case of low product demand. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 34 (1-2), pp. 188-200.
- Bautista, J., Pereira, J. (2007). Ant algorithms for a time and space constrained assembly line balancing problem. *European Journal of Operational Research*, 177 (3), pp. 2016-2032.
- Becker, C., Scholl, A. (2006). A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, 168 (3), pp. 694-715.
- Becker, C., Scholl, A. (2009). Balancing assembly lines with variable parallel workplaces: Problem definition and effective solution procedure. *European Journal of Operational Research*, 199 (2), pp. 359-374.
- Benoist, T., Gaudin, E., Rottembourg, B. (2005). *Planification de centres d'appels téléphoniques*. In Baptiste, P., Giard, V., Haït, A., Soumis, F., *Gestion de production et ressources humaine*. (pp.275-286). Montréal: Presses Internationales Polytechnique.

- Blöchliger, I. (2004). Modeling staff scheduling problems. A tutorial. *European Journal of Operational Research*, 158 (3), pp. 533-542.
- Boysen, N., Fliedner, M. (2008). A versatile algorithm for assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, 184 (1), pp. 39-56.
- Boysen, N., Fliedner, M., Scholl, A. (2007). A classification of assembly line balancing problems. *European Journal of Operational Research*, 183 (2), pp. 674-693.
- Boysen, N., Fliedner, M., Scholl, A. (2008). Assembly line balancing: Which model to use when? *International Journal of Production Economics*, 111 (2), pp. 509-528.
- Burn, R.N, Carter, M.W. (1985). Work force size and single shift schedules with variables demands. *Management Science*, 31 (5), pp. 599-607.
- Castillo, I., Joro, T., Li, Y.Y. (2008). Workforce scheduling with multiple objectives. *European Journal of Operational Research*, 196 (1), pp. 162-170.
- Cheng, C.H., Miltenburg, J., Motwani, J. (2000). The effect of straight- and U-shaped lines on quality. *IEEE Transaction on Engineering Management*, 47 (3), pp. 321-334.
- Chiang, W-C., Kouvelis, P., Urban, T.L. (2007). Line balancing in a just-in-time production environment: balancing multiple U-lines. *IIE Transactions*, 39 (4), pp. 347-359.
- Corominas, A., Pastor, R., Plans, J. (2008). Balancing assembly line with skilled and unskilled workers. *The International Journal of Management Science*, 36 (6), pp. 1126-1132.
- Dantzig, G. (1954). A comment on Edie's traffic delay at toll booths. *Operations Research*, 2 (3), pp. 339-341.
- Dimitriadis, S. G. (2006). Assembly line balancing and group working: A heuristic procedure for workers' group operating on the same product and workstation. *Computers & Operations Research*, 33 (9), pp. 2757-2774.
- Easton, F.F., Mansour, N. (1999). A distributed genetic algorithm for deterministic and stochastic labor scheduling problems. *European Journal of Operationa Research*, 118 (3), pp. 505-523.

Easton, F.F., Rossin, D.F. (1996). A stochastic goal program for employee scheduling. *Decision Sciences*, 27 (3), pp. 541-568.

Erel, E., Sabuncuoglu, I., Sekerci, H. (2005). Stochastic assembly line balancing using beam search. *International Journal of Production Research*, 43 (7), pp. 1411-1426.

Ernst, A. J. (2004). Staff scheduling and rostering: A review of applications, methods and models. *European Journal of Operational Research*, 153 (1), pp. 3-27.

Falkenauer, E. (2005). Line Balancing in the Real World. *International Conference on Product Lifecycle Management*.

Frayret, J.M., D'Amour, S., Montreuil, B., Cloutier, L. (2001). A network approach to operate agile manufacturing systems. *International Journal of Production Economics*, 74 (1-3), pp. 239-259.

Giard, V. (2003). *Gestion de production et des flux*. Economica.

Gökcen, H., Erel, E. (1998). Binary integer formulation for mixed-model assembly line balancing problem. *Computer & Industrial Engineering*, 34 (2), pp. 451-461.

Grabot, B., Letouzey, A. (2000). Short-term manpower management in manufacturing systems: new requirements and DSS prototyping. *Computer in Industry*, 23 (1), pp. 11-29.

Gronalt, M., Hartl, R.F. (2003). Workforce planning and allocation for mid-volume truck manufacturing: a case study. *International Journal of Production Researc*, 41 (3), pp. 449-463.

Heike, G., Ramulu, M., Sorenson, E., Shanahan, P., Moinzadeh, K. (2001). Mixed-model assembly alternatives for low-volume manufacturing: The case of the aerospace industry. *International Journal of Production Economics*, 72 (2), pp. 103-120.

Hirano, H. (1988). *JIT Factory Revolution*. Cambridge, MA: Productivity Press.

Jacquet-Lagrèze, E. (2005). *Horaires de chauffeurs de bus*. In Baptiste, P., Giard, V., Haït, A., Soumis, F., *Gestion de production et ressources humaine*. (pp.287-298). Montréal: Presses Internationales Polytechnique.

- Kara, Y., Ozcan, U., Peker, A. (2007). Balancing and sequencing mixed-model just-in-time U-lines with multiple objectives. *Applied Mathematics and Computation*, 184 (2), pp. 566-588.
- Lampel, J., Mintzberg, H. (1996). Customizing customisation. *Sloan Management Review*, 38 (1), pp. 21-30.
- Mercier, A. (2005). *Plannification intégrée des itinéraires d'avions et des hotraires d'équipages*. In Baptiste, P., Giard, V., Haït, A., Soumis, F., *Gestion de production et ressources humaine*. (pp.249-273). Montréal: Presses Internationales Polytechnique.
- Merengo, C., Nava, F., Pozzetti, A. (1999). Balancing and sequencing manual mixed-model assembly lines. *International Journal of Production Research*, 37 (12), pp. 2835-2860.
- Miltenburg, G.J., Wijngaard, J. (1994). The U-line line balancing problem. *Management Science*, 40 (10), pp. 1378-1388.
- Miltenburg, J. (2002). Balancing and Scheduling Mixed-Model U-Shaped Production Line. *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 14 (2), pp. 119-151.
- Miralles, C., Garcia-Sabater, J.P., Andrés, C., Cardós, M. (2008). Branch and bound procedures for solving the Assembly Line Worker Assignment and Balancing Problem: Application to Sheltered Work centres for Disabled. *Discrete Applied Mathematics*, 156 (3), pp. 352-367.
- Mohan, S. (2008). Scheduling part-time personnel with availability restrictions and preferences to maximize employee satisfaction. *Mathematical and Computer Modelling*, 48 (11-12), pp. 1806-1813.
- Monden, Y. (1983). *Toyota Production System*. Norcross, GA: Industrial Engineering and Management Press.
- Monden, Y. (1983). *Toyota Production System* (éd. Industrial Engineering and Management Press). Norcross, GA.
- Montreuil, B., Poulin, M. (2005). Demand and supply network design scope for personalized manufacturing. *Production Planning and Control*, 16 (5), pp. 454-469.

- Pastor, R., Andrés, C., Duran, A., Pérez, M. (2002). Tabu search algorithms for an industrial multi-product and multi-objective assembly line balancing problem, with reduction of the task dispersion. *Journal of the Operational Research Society*, 53 (12), pp. 1317-1323.
- Ponnambalam, S.G., Aravindan, P., Mogileeswar Naidu, G. (1999). A comparative Evaluation of Assembly Line Blancing Heuristics. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 15 (8), pp. 577-586.
- Rekiek, B., De Lit, P., Pellichero, F., L'Eglise, T., Fouda, P., Falkenauer, E., Delchambre, A. (2001). A multiple objective grouping genetic algorithm for assembly line design. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 12 (5-6), pp. 467-485.
- Sabar, M., Montreuil, B., Frayret, J-M. (2008). Competenvy and preference based personnel scheduling in large assembly lines. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 21 (4), pp. 468-479.
- Sawik, T. (2002). Monolithic vs. hierarchical balancing and scheduling of a flexible assembly line. *European Journal of Operational Research*, 143 (1), pp. 115-124.
- Scholl, A., Becker, C. (2006). State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, 168 (3), pp. 666-693.
- Scholl, A., Klein, R. (1999). ULINO: Optimally balancing U-shaped JIT assembly lines. *International Journal of Production Research*, 37 (4), pp. 721-736.
- Shewchuk, J. (2008). Worker allocatin in lean U-shaped production lines. *International Journal of Production Research*, 46 (13), pp. 3485-3502.
- Soumis, F., Pesant, G., Rousseau, L-M. (2005). *Gestion des horaires et affectation du personnel. In Baptiste, P., Giard, V., Haït, A., Soumis, F., Gestion de production et ressources humaine.* (pp.71-109). Montréal: Presses Internationales Polytechnique.
- Toksari, M.D., Isleyen, S.K., Guner, E., Baykoc, O.F. (2008). Simple and U-type assembly line balancing problems with a learning effect. *Applied Mathematical Modelling*, 32 (12), pp. 2954-2961.

## ANNEXE A : DIAGRAMMES DE PRÉCÉDENCE

Ce diagramme de précédence est celui de l'exemple présenté au chapitre 3. Sa représentation est plus claire ici grâce aux différentes couleurs qu'elle n'était sur la Figure 3.7.

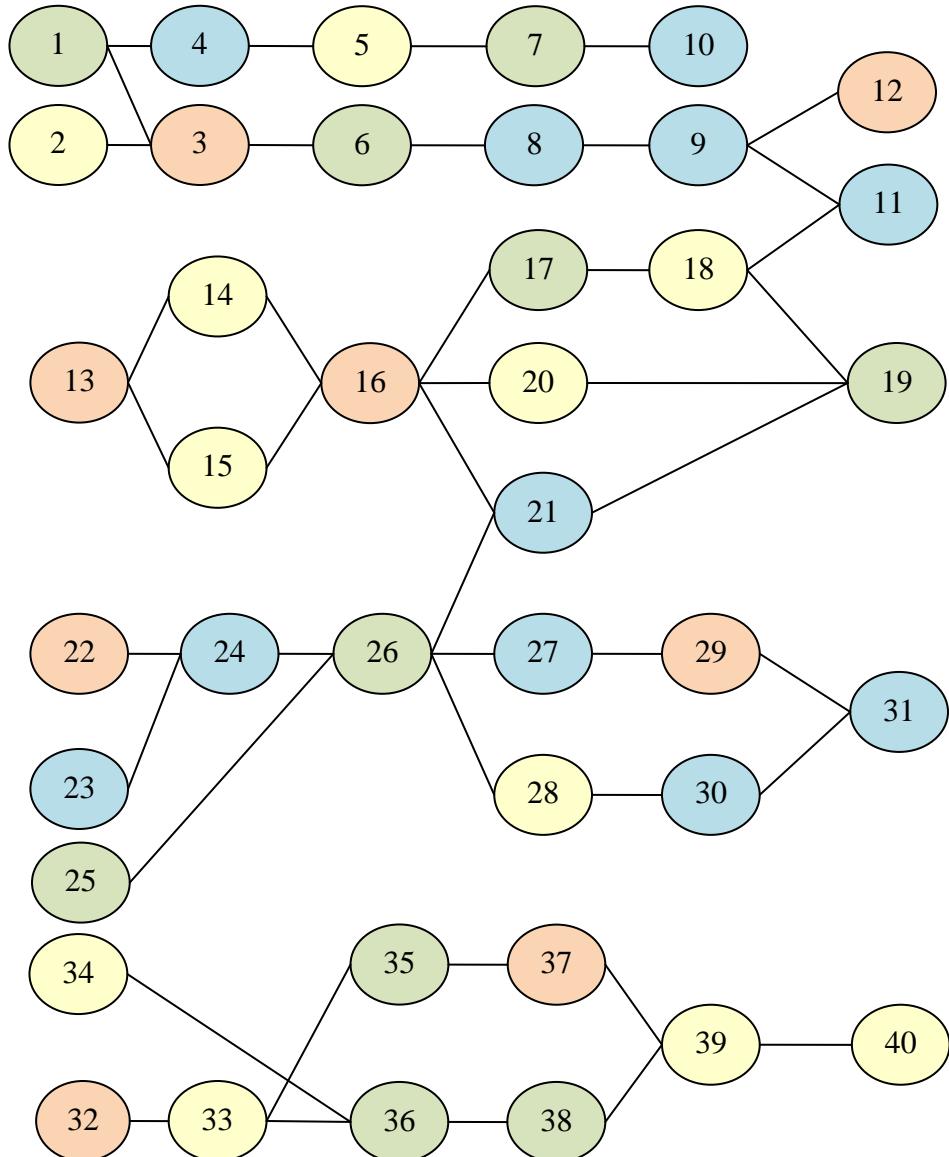


Figure A.1: Diagramme de précédence initial

## ANNEXE B : DURÉE DES TACHES

Ces tableaux représentent pour chaque code métier la durée des tâches qui leur est attribuée.

**Tableau B.1: Temps opératoires de chacune des tâches**

246 (vert)		97 (jaune)		140 (orange)		520 (bleu)	
Tâches	Durée	Tâches	Durée	Tâches	Durée	Tâches	Durée
1	6	2	8	3	8	4	6
6	7	5	5	12	5	8	6
7	5	14	7	13	7	9	7
17	8	15	7	16	7	10	5
19	8	18	7	22	5	11	7
25	7	20	7	29	8	21	5
26	5	28	7	32	7	23	5
35	6	33	8	37	6	24	6
36	8	34	5	43	8	27	6
38	7	39	7	44	8	30	6
42	7	40	8	45	5	31	5
47	7	41	6	48	7	46	7
52	8	53	6	50	8	49	6
55	8	54	7	51	5	57	7
58	8			56	7	59	5
60	6						

## ANNEXE C : DIAGRAMME DE PRÉCÉDENCE POUR LE POSTE 2

Ce diagramme est le diagramme de précédence utilisé lors de la 2<sup>ème</sup> itération de la procédure 1, dans lequel les tâches assignées au poste 1 ont été enlevées. Ce diagramme représente les nouveaux rangs à prendre en compte pour chacune des tâches pour leur hypothétique assignation au poste 2.

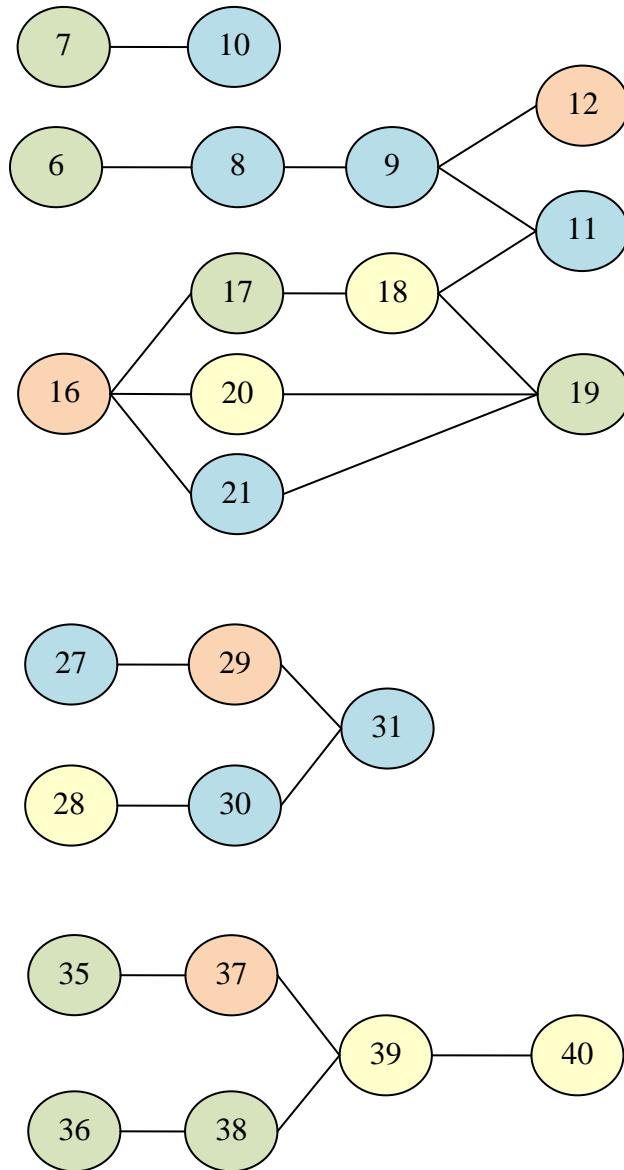


Figure C.1: Diagramme de précédence après assignation au poste 1