



Proposition d'outils pour l'ordonnancement de la production dans les usines de mécanique automobile

Mariem Fakhfakh

► To cite this version:

Mariem Fakhfakh. Proposition d'outils pour l'ordonnancement de la production dans les usines de mécanique automobile. Autre. Université de Grenoble, 2012. Français. <NNT : 2012GRENI052>. <tel-01219649>

HAL Id: tel-01219649

<https://theses.hal.science/tel-01219649v1>

Submitted on 23 Oct 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

Spécialité : **Génie Industriel**

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Présentée par

Myriam FAKHFAKH

Thèse dirigée par **Yannick FREIN**
codirigée par **Maria DI MASCOLO**

préparée au sein du **Laboratoire G-SCOP**
Sciences pour la Conception, l'Optimisation et la Production
de Grenoble, UMR 5272

dans l'École Doctorale **IMEP2**
Ingénierie – Matériaux Mécanique Energétique Environnement
Procédés, Production

Proposition d'outils pour l'ordonnancement de la production dans les usines de mécanique automobiles

Thèse soutenue publiquement le **22 octobre 2012**,
devant le jury composé de :

M. Lionel DUPONT

Professeur, école des mines Albi Carmaux, (Président)

M. Patrick CHARPENTIER

Professeur, université de Lorraine, (Rapporteur)

M. Alain GUINET

Professeur, INSA de Lyon, (Rapporteur)

M. Yannick FREIN

Professeur, Grenoble INP, (Directeur de thèse)

Mme Maria DI MASCOLO

Chargée de recherche CNRS, (Co-Directeur de thèse)

M. Mickael COLLARDEY

Ingénieur PSA Peugeot Citroën, (Examinateur)

Thèse Confidentielle

Université Joseph Fourier / Université Pierre Mendès France /
Université Stendhal / Université de Savoie / Grenoble INP



CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

Remerciements

Cette thèse s'est déroulée dans le cadre de la convention CIFRE n°1046/2007 entre le groupe PSA Peugeot Citroën et le laboratoire G-SCOP (Sciences pour la Conception, l'optimisation et la production de Grenoble).

Je tiens tout d'abord à remercier Henri Lem de m'avoir accueilli dans son service d'avance de phase ainsi que Xavier Chaumont, qui lui a succédé, pour avoir soutenu mes travaux.

J'ai eu le plaisir d'être encadré par Olivier Gourguechon. Je le remercie d'avoir été présent dans tous les bons moments et dans ceux parfois qui étaient plus difficiles. J'ai pu profiter de ses conseils avisés et je souhaite lui témoigner toute mon amitié.

Je remercie également Mickael Collardey qui a assuré le suivi de la thèse. J'ai pu apprécier sa disponibilité ainsi que son soutien au sein de PSA Peugeot Citroën pour concrétiser industriellement les travaux de la thèse.

Mes remerciements se tournent à présent vers le « monde scientifique ». Tout d'abord, je tiens à remercier Yannick Frein, directeur de thèse, et Maria Di Mascolo, co-directeur de thèse, pour avoir dirigé ces travaux, pour leurs disponibilités et pour tout ce qu'ils m'ont transmis durant ces années de thèse.

Je remercie vivement Lionel Dupont, Alain Guinet et Patrick Charpentier pour m'avoir fait l'honneur de bien vouloir expertiser ce travail et pour la pertinence de leurs remarques.

Je tiens également à remercier Branimir Bulat pour avoir participé à ce travail dans le cadre de son projet de fin d'étude.

Je n'oublie pas également les membres du laboratoire G-SCOP, les membres de l'équipe APST et toutes les personnes que j'ai côtoyées et qui ont contribué de près ou de loin à ces travaux.

Une pensée particulière pour Finke Gerd pour sa précieuse aide et les échanges extrêmement riches que nous avons eu au cours de ces travaux de thèse.

Ma gratitude va également à l'ensemble de ma famille. Je remercie infiniment mes parents qui ont toujours cru en moi. Que ce mémoire témoigne de ma profonde reconnaissance envers eux. Une spéciale dédicace à mes sœurs et à leurs familles ainsi que ma belle-famille pour leurs encouragements et leur joie de vivre.

Enfin, ma profonde gratitude à Patrice, celui qui m'a épaulé pendant ces années de travaux, qui partage mes doutes, mes joies, et surtout ma vie. Il a été à l'initiative du sujet de la thèse et c'est aussi grâce à lui que ce manuscrit a pu voir le jour.

CONFIDENTIAL

Table des matières

Table des matières	7
Introduction générale	11
Chapitre I : Le contexte industriel automobile	15
I.1. Le contexte	16
I.1.1. Historique de l'industrie automobile	16
I.1.2. La chaîne logistique automobile	17
I.1.3. L'usine terminale	18
I.1.4. L'usine de mécanique	20
I.1.5. Le flux d'approvisionnement	20
I.2. Le système de décision	23
I.2.1. Les niveaux de décision	23
I.2.2. Les niveaux de la planification de la production	24
I.2.2.1. La phase de préparation	25
I.2.2.2. La phase d'exécution	25
I.3. La production au juste nécessaire	26
I.3.1. Le principe du juste à temps	26
I.3.2. Le juste à temps appliqué aux usines de mécanique	27
I.3.3. Les modes d'ordonnancement	28
I.3.3.1. Ordonnancement en journée glissante	29
I.3.3.2. Ordonnancement en journée reproductible	30
I.4. L'objectif de la thèse	31
I.5. Conclusion	32
Chapitre II : Les usines de mécanique	35
II.1. Caractéristiques de l'usine de mécanique	36
II.2. Cas de l'usine de mécanique des amortisseurs	37
II.2.1. L'atelier d'usinage des tiges d'amortisseurs	38
II.2.2. Planification de la production avec redimensionnement des ressources humaines	40
II.2.2.1. Description du problème	40
II.2.2.2. Premiers travaux	41
II.2.3. Conclusion	42
II.3. Cas d'une usine de mécanique des moteurs	42
II.3.1. Organisation d'une usine de mécanique de moteurs	43
II.3.2. L'atelier de montage des moteurs	43
II.3.3. Les contraintes d'ordonnancement	46
II.3.3.1. La contrainte de la taille d'Unité de Conditionnement (UC)	46
II.3.3.2. Les contraintes de tailles de lot minimum et maximum	47
II.3.3.3. La contrainte de non succession	47
II.3.3.4. La contrainte d'insertion	48
II.3.3.5. L'outil existant	48
II.4. Conclusion	49

Chapitre III : Ordonnancement des moteurs	51
III.1. Description du problème	52
III.2. Revue de la littérature	53
III.3. Modélisation	56
III.3.1. Définitions	56
III.3.2. Modèle proposé	56
III.4. Résolution et résultats	60
III.5. Conclusion	63
 Chapitre IV : Ordonnancement et lissage des moteurs : une approche à deux niveaux	65
IV.1. Description du problème	67
IV.2. Les deux niveaux de l'ordonnancement	68
IV.3. Le lissage de la production	70
IV.4. Modèle d'ordonnancement des familles des moteurs	70
IV.4.1. Présentation des deux approches	71
IV.4.2. Première approche : prise en compte de l'existence de lots non complets en pré- et en post- traitement	72
IV.4.2.1. Modèle 1 strict - recherche d'une solution optimale	73
IV.4.2.2. Expérimentations et résultats du modèle 1 strict	76
IV.4.2.3. Modèle 2 relaxé - cas où il n'y a pas de solution optimale	78
IV.4.2.4. Expérimentations et résultats du modèle 2 relaxé	80
IV.4.3. Deuxième approche : prise en compte de l'existence de lots non complets en programmation	82
IV.4.3.1. Modèle 3 strict - recherche d'une solution optimale	82
IV.4.3.2. Expérimentations et résultats du modèle 3 strict	86
IV.4.3.3. Modèle 4 relaxé- cas où il n'y a pas de solution optimale	88
IV.4.3.4. Expérimentations et résultats du modèle 4 relaxé	89
IV.4.4. Comparaison des tests entre les deux approches	91
IV.5. Modèle de lissage des références des moteurs	93
IV.5.1. Modélisation	93
IV.5.2. Expérimentations et résultats	97
IV.6. Conclusion	98
 Chapitre V : Un outil d'aide à la décision pour l'ordonnancement	101
V.1. Présentation de l'outil industriel	102
V.1.1. Architecture de l'application	103
V.1.2. Processus de l'application	104
V.1.3. Fonctionnalités de l'application	105
V.2. Les prétraitements des données	107
V.3. Les post-traitements des résultats intermédiaires	107
V.4. Application au cas industriel	108
V.4.1. Présentation du cas industriel	108
V.4.2. Analyse des résultats	109
V.4.2.1. Première approche : prise en compte de l'existence de lots non complets en pré- et en post- traitement	109

V.4.2.2. Deuxième approche : prise en compte de l'existence de lots non complets en programmation	110
V.5. Conclusion	111
Conclusion générale	113
Bibliographie	117
Liste des tableaux	120
Liste des figures	123
Annexe.....	126

CONFIDENTIEL

Introduction générale

Ce travail a été effectué dans le cadre d'une thèse CIFRE avec le constructeur automobile français PSA Peugeot Citroën, afin de proposer une nouvelle politique de gestion de production appliquée aux usines de mécanique, et plus particulièrement des politiques de planification et d'ordonnancement de la production des ateliers.

L'industrie automobile est depuis longtemps à l'initiative de nouvelles méthodes de production. Ces évolutions durant cette dernière décennie se sont toujours faites en fonction de l'évolution de l'environnement économique. La concurrence actuelle oblige nos acteurs industriels à se remettre en question de manière permanente, tant sur le plan organisationnel que sur les méthodes de travail adoptées. L'un des éléments qui marque à ce jour le marché est la diversité des produits proposés aux clients. La politique de production de masse en flux poussés qui permettait d'effectuer des économies d'échelle n'est donc plus de mise et la production au juste nécessaire en flux tirés doit avant tout orienter les choix de l'ensemble des acteurs industriels. De ce point de vue, la recherche de l'efficacité opérationnelle dans les usines de production reste un enjeu stratégique. Son amélioration permanente est à coup sûr un élément permettant de faire la différence à terme et de se positionner vis-à-vis des clients en tant que leader sur le marché.

Le groupe PSA Peugeot Citroën s'est engagé depuis plusieurs années dans une démarche de déploiement des concepts du Lean Manufacturing. Un des principes inhérents est le travail en Juste A Temps (JAT). Son objectif est de produire ce qui est nécessaire au moment où cela est nécessaire avec un dimensionnement des ressources à son plus juste nécessaire. Deux principes de base permettent sa mise en œuvre :

- travailler en flux tiré permettant ainsi de supprimer les surproductions en produisant ce que le client consomme,
- produire en flux continu avec un flux dans lequel les variabilités sont réduites.

Ce dernier principe a toute son importance. En effet, la mise en œuvre efficace du travail en JAT, pour en tirer le maximum de bénéfices, nécessite au préalable d'avoir une activité lissée. Ce lissage consiste à organiser la demande du client de manière à répartir le volume et la diversité des produits uniformément sur une période de temps donnée. L'intérêt

final est d'offrir des conditions stables au processus par rapport à une demande client fluctuante en volume et en Mix des produits. Nous reviendrons sur ce principe de lissage dans nos travaux de recherche.

Les orientations stratégiques prises par le groupe PSA Peugeot Citroën dans la manière d'utiliser son outil industriel n'ont fait que renforcer l'intérêt de trouver des solutions novatrices en matière de dimensionnement des ressources, de planification et de séquençement de la production dans les usines. Des travaux importants ont été menés durant de nombreuses années dans les usines de production de véhicules appelées «Unités Terminales» au sein du groupe. Afin d'atteindre le même niveau de maturité que celui atteint dans la gestion de production de ces usines, le groupe PSA Peugeot Citroën s'intéresse aujourd'hui d'une manière plus approfondie à l'ensemble de la chaîne logistique et, en particulier, aux usines d'organes mécaniques, fournisseurs internes du Groupe. Cette thèse s'inscrit dans cette démarche et propose des solutions en termes de planification et d'ordonnancement de la production des usines de mécanique. Ceci permettra de contribuer à réduire l'écart existant actuellement entre le fonctionnement des unités terminales et celui des usines de mécanique.

L'objectif de la thèse est d'analyser et de mieux comprendre les problématiques de la planification et de l'ordonnancement de la production dans les usines de mécanique. Face à ces problématiques, nous cherchons également à apporter des solutions et des outils d'aide à la décision. Pour y répondre deux problématiques ont été définies :

- la planification de la production avec un redimensionnement des ressources au sein de l'usine de mécanique des amortisseurs
- l'ordonnancement de la production au sein des usines de mécanique des moteurs.

Organisation du mémoire

Ce mémoire s'articule autour de cinq chapitres.

Dans le premier chapitre, nous reviendrons sur le contexte industriel automobile. Nous mettrons en lumière l'ensemble du système de décision, en particulier celui au sein des usines de mécanique du groupe PSA Peugeot Citroën. De plus, le mode de production au juste nécessaire sera présenté en détails. Nous montrons l'impact de ce mode au niveau de la

planification et de l'ordonnancement des usines de mécanique. Enfin, nous précisons l'objectif de nos travaux de thèse.

Dans le deuxième chapitre, nous ferons une analyse de l'existant des usines de mécanique de PSA Peugeot Citroën, à la fois dans sa structure industrielle et dans son système d'information. Nous nous focalisons sur deux cas d'études illustrant deux problématiques importantes et complémentaires : l'usine de mécanique des amortisseurs et l'usine de mécanique des moteurs. Nous décrivons leurs caractéristiques, leurs contraintes industrielles ainsi que leurs problématiques. Le premier cas d'étude sera rapidement abordé dans ce chapitre. Le deuxième fait l'objet des chapitres suivants.

Le chapitre 3 est consacré à la problématique de l'ordonnancement des références de moteurs sur une ligne de montage. Un état de l'art des problèmes de dimensionnement et de séquençement de lots permettra de positionner notre problématique. Nous proposons une approche basée sur une modélisation mathématique en programmation linéaire. Nous expérimentons notre approche sur un cas réel et nous analysons les résultats obtenus en les comparant avec ceux obtenus sur le terrain.

Le chapitre 4 est dédié à la problématique d'ordonnancement et de lissage des familles et des références de moteurs sur une ligne de montage. En effet, les moteurs peuvent être regroupés en familles. De ce fait, il nous est apparu intéressant d'aborder la problématique de l'ordonnancement en intégrant cette notion. La problématique d'ordonnancement des moteurs sera donc traitée en deux temps : au niveau des familles de moteurs, dans un premier temps, puis au niveau des références de moteurs. Nous proposons deux approches afin de modéliser l'ordonnancement de la production au niveau des familles. Les deux approches sont basées sur une modélisation mathématique par programmation linéaire. Une comparaison des deux approches sera alors exposée de manière approfondie. Au niveau des références, nous proposons une heuristique de lissage de la production du montage des moteurs. Enfin, nous expérimentons les modèles proposés sur des données réelles et nous analysons les résultats obtenus.

Nous finissons par le cinquième chapitre dans lequel nous décrivons l'outil d'aide à la décision, ses caractéristiques et son application sur un cas industriel.

CONFIDENTIEL

Chapitre I

Le contexte industriel automobile

I.1. Le contexte	16
I.1.1. Historique de l'industrie automobile	16
I.1.2. La chaîne logistique automobile	17
I.1.3. L'usine terminale	18
I.1.4. L'usine de mécanique	20
I.1.5. Le flux d'approvisionnement	20
I.2. Le système de décision	23
I.2.1. Les niveaux de décision	23
I.2.2. Les niveaux de la planification de la production	24
I.2.2.1. La phase de préparation.....	25
I.2.2.2. La phase d'exécution	25
I.3. La production au juste nécessaire	26
I.3.1. Le principe du juste à temps	26
I.3.2. Le juste à temps appliqué aux usines de mécanique	27
I.3.3. Les modes d'ordonnancement	28
I.3.3.1. Ordonnancement en journée glissante	29
I.3.3.2. Ordonnancement en journée reproductible	30
I.4. L'objectif de la thèse	31
I.5. Conclusion	32

Les travaux décrits dans ce document concernent la gestion de production dans une usine de mécanique automobile. Nous proposons, dans ce chapitre, de présenter le contexte de notre problématique ainsi que les spécificités liées au cas industriel. Ainsi, nous exposons les flux de la chaîne logistique automobile sur les plans physique et décisionnel. Ces concepts seront abordés de manière à donner une vision large des décisions prises tout au long de l'horizon de la planification et de l'ordonnancement. Nous nous focalisons sur le cas du constructeur automobile français PSA Peugeot Citroën, qui a hébergé nos travaux de thèse.

I.1 Le contexte

L'automobile prend une place importante dans l'industrie de plusieurs grands pays industrialisés. Nous rappelons l'historique de l'industrie automobile, puis nous décrivons le système de production automobile.

I.1.1 Historique de l'industrie automobile

Depuis une centaine d'années, l'industrie automobile a fondamentalement évolué. Les premiers véhicules ont été fabriqués de manière artisanale. Cependant, les contraintes liées à la production artisanale ont nécessité de nouvelles méthodes de production. En 1880, il y a eu l'apparition du taylorisme inventé par l'ingénieur américain Frédéric Winslow Taylor. C'est une méthode de travail qui consiste en une organisation rationnelle du travail : une décomposition de tâches élémentaires, simples et répétitives, confiées à des travailleurs spécialisés. Le taylorisme cherche à définir la meilleure façon de produire permettant le rendement maximum.

Le début du XXe siècle été marqué par le développement de la production de masse. En 1910, est en effet apparu le fordisme, conçu par Henry Ford, pour produire les 15 millions d'exemplaires vendus dans le monde de la célèbre Ford T. Il s'inspire du taylorisme en y ajoutant d'autres concepts, comme notamment le travail des ouvriers le long des convoyeurs.

A cette époque, marquée par la production et la consommation de masse, les véhicules sont produits puis stockés en attendant de trouver un acheteur : il s'agit d'un mode de production en flux poussés. Au fil des années, le secteur de l'automobile continue à jouer un rôle déterminant dans l'économie mondiale, avec notamment une importance accrue de l'Asie. L'équilibre entre l'offre et la demande se modifie et les constructeurs ne peuvent pas se permettre de produire sans avoir l'assurance de vendre et doivent de plus réduire leurs coûts.

D'où la naissance d'un nouveau modèle concurrent appelé toyotisme, dans les années 1970, qui émerge au Japon. Il est caractérisé, en particulier, par une gestion en flux tendus (cf. I.3.1). C'est un concept qui repose sur l'optimisation des ressources utilisées ainsi que la réduction des stocks.

Au fil des années, les constructeurs automobiles se retrouvent face à une concurrence de plus en plus forte et des clients de plus en plus exigeants. Pour y répondre, ils diversifient l'offre et s'orientent vers la production personnalisée. Il s'agit de produire des voitures aux silhouettes variées, de couleurs diverses, avec des habillages intérieurs différents (Villeminot, 2004). Ceci a conduit à la mise en place des lignes d'assemblages, appelées « à modèles mélangés », sur lesquelles les ouvriers peuvent réaliser des tâches diversifiées. Le mode de production automobile évolue et les constructeurs cherchent les meilleures politiques de gestion de production afin de répondre à la demande des clients en termes de délai, de coût et de qualité.

I.1.2 La chaîne logistique automobile

Aujourd'hui, la signature du bon de commande d'un véhicule déclenche un compte à rebours d'un délai de 25 jours en moyenne (Suon, 2011). Le client choisit son véhicule avec le concessionnaire. Ce dernier passe ensuite une commande auprès de la direction commerciale qui traduit celle-ci sous forme d'un code normalisé. A partir de ce portefeuille de commandes, les Ordres de Fabrication (OF) sont répartis entre les différentes usines terminales (cf. I.1.3) en fonction de leurs capacités et du modèle fabriqué. Ainsi, le lancement des commandes des composants auprès des fournisseurs, dont les usines de mécaniques et bruts (cf. I.1.4), est déclenché, puis la fabrication débute. Enfin, le véhicule passe par le réseau de distribution pour être livré au client.

Les usines de mécanique se situent au milieu de la chaîne logistique automobile comme l'indique la figure I-1. Elles représentent les fournisseurs PSA des usines terminales et des usines en coopération en Europe et à l'international. Elles fournissent aussi des clients extérieurs.

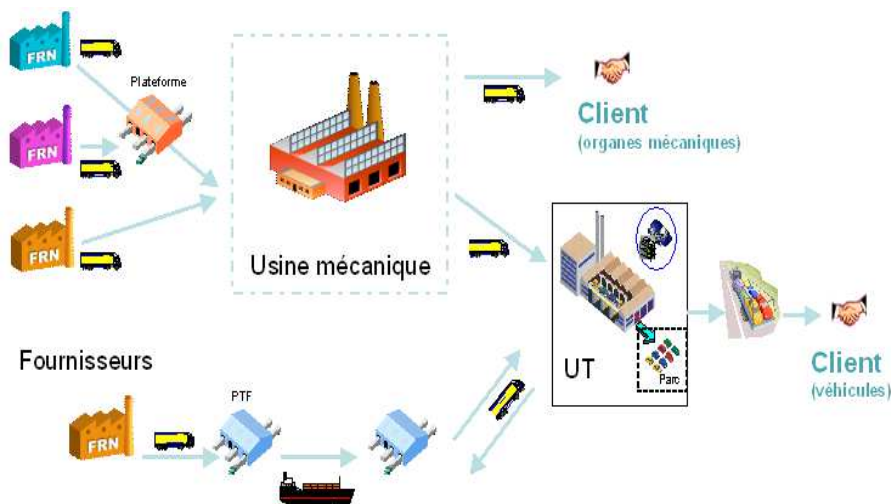


Figure I-1: Une chaîne logistique automobile

I.1.3 L'usine terminale

La fabrication d'un véhicule se fait sur un site de production, appelé usine terminale (UT). Celle-ci est constituée d'un ensemble de lignes de production fortement contraintes et sensibles aux aléas de production (Lesert, 2006). Elle recouvre les ateliers de ferrage, de peinture et de montage. Seuls quelques sites de production possèdent un atelier d'emboutissage et doivent produire pour plusieurs sites

Le processus de fabrication des véhicules commence par le découpage et la mise en forme des pièces métalliques dans l'atelier d'emboutissage. Elles sont ensuite assemblées et soudées dans l'atelier de ferrage. La carrosserie est alors traitée et peinte dans l'atelier de peinture puis les composants mécaniques et fonctionnels du véhicule sont assemblés dans l'atelier de montage.

L'atelier d'emboutissage :

Dans l'atelier d'emboutissage, des kilomètres de bobines de tôles sont stockés (voir figure I-2). Des tonnes d'acier et d'aluminium sont transformées pour donner les pièces qui composeront la carrosserie du véhicule. Des machines entièrement automatisées, les presses-transfert, se chargent des opérations de découpe et de mise en forme sans qu'on ait besoin de déplacer les pièces d'une machine à l'autre. L'emboutissage prépare donc les pièces métalliques qui devront être assemblées sur un véhicule pour construire son armature, sa carrosserie et son châssis. Il se caractérise par une fabrication par lots afin d'optimiser la durée de temps de changement des outils de presse.



Figure I-2 : Bobines d'acier



Figure I-3 : Points de soudure

L'atelier de ferrage :

Cet atelier assemble les tôles embouties (environ 400 pièces de tôlerie) afin d'obtenir le squelette métallique de la voiture appelé aussi « la caisse en blanc ». C'est un atelier fortement automatisé qui contient plusieurs types de robots qui réalisent environ 4500 soudures (voir figure I-3).

L'atelier de peinture :

La caisse en blanc subit différents traitements de phosphatation, cataphorèse et étanchéité. Les bases colorées et les vernis sont ensuite appliqués. La peinture d'une voiture est réalisée en trois étapes successives : les fonds, les apprêts et les laques (voir figure I-4). Dans certaines usines, les caisses sont classées dans un souci d'économie par rafales de couleurs pour diminuer le nombre de purges des pistolets de peinture nécessaires à chaque changement de teinte.



Figure I-4 : Pose des laques par des robots



Figure I-5 : Pose automatisée du pare-brise

L'atelier de montage :

C'est l'atelier le plus complexe et le moins automatisé. Il est caractérisé par la présence de nombreux opérateurs. Il est composé de plusieurs centaines de postes de travail. Chaque poste correspond à une zone sur la ligne de montage délimitée par une limite amont et une limite aval entre lesquelles l'opérateur doit effectuer des tâches spécifiques. Les véhicules défilent sur des chaînes, cadencées à vitesse constante. C'est dans cet atelier que la caisse devient un

véhicule. Les caisses peintes défilent sur plus d'un kilomètre de ligne de montage pour recevoir tous leurs éléments mécaniques, fonctionnels et les équipements de finitions et de confort (voir figure I-5). Les véhicules sont par la suite stockés avant d'être expédiés vers les clients.

I.1.4 L'usine de mécanique

La fabrication d'un organe mécanique se fait sur un site de production, appelé usine de mécanique. Celle-ci est un ensemble de lignes de production fortement contraintes et sensibles aux aléas de production. Elle regroupe deux grands ateliers : l'usinage et le montage. Les sites de production des organes mécaniques sont aussi divisés par filière : moteurs, boîtes de vitesse et liaisons au sol. Chaque filière peut avoir des caractéristiques spécifiques liées à la nature du produit fabriqué.

Les usines de mécanique font l'objet de nos travaux de recherche. Une description détaillée du système de production des organes mécaniques sera présentée dans le chapitre suivant.

I.1.5 Le flux d'approvisionnement

Un véhicule nécessite en moyenne 3000 à 4000 composants. Les politiques de gestion des approvisionnements des organes mécaniques et des composants des fournisseurs externes doivent répondre aux exigences de la politique de gestion de la production. Chaque filière des usines mécaniques a mis en place sa propre politique de gestion des composants afin de répondre à ses exigences spécifiques. Comme la plupart des constructeurs automobiles, PSA Peugeot Citroën a adopté des modes d'approvisionnement adaptés à un fonctionnement en juste à temps et à un mode de production en flux tirés (cf. I.3).

Les modes d'approvisionnement, appelés aussi systèmes d'ordre, caractérisent les différentes manières qui peuvent être adoptées pour passer les commandes d'un client vers son fournisseur. Par ailleurs, les usines de mécanique classent les fournisseurs selon deux catégories : les fournisseurs de pièces à destination des ateliers d'usinage appelées pièces brutes, et les fournisseurs de pièces à destination des ateliers de montage appelées pièces d'origine extérieure (POE). Les modes d'approvisionnement appliqués aux fournisseurs sont les suivants :

L'hebdomadaire ou le périodique :

Il s'agit d'un mode d'approvisionnement basé sur des prévisions. Il se fait à fréquence hebdomadaire ou mensuelle. Suivant la fréquence utilisée, nous l'appellerons respectivement l'hebdomadaire et le périodique. C'est le mode le moins utilisé dans les usines de mécanique. L'hebdomadaire concerne quelques composants bruts pour les usines des moteurs ou aussi pour l'approvisionnement de certaines pièces pour les usines de liaisons au sol. Le périodique concerne quelques composants bruts des usines de liaisons au sol (voir figure I-6).

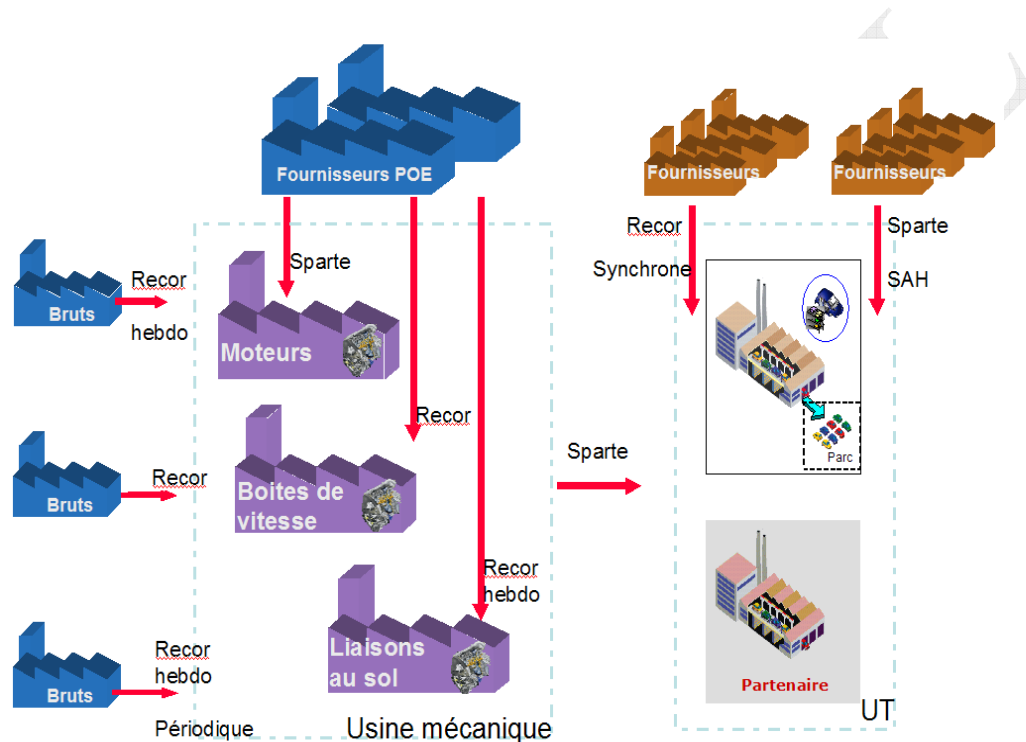


Figure I-6 : Les flux d'approvisionnement de PSA Peugeot Citroën

Le Recor :

Le système Recor (REnouvellement de la COnsommation Réelle) est un mode d'approvisionnement similaire au système Kanban (document interne PSA, 1998).

Kanban est un mot japonais du vocabulaire courant qui signifie étiquette ou enseigne. C'est le système informationnel qui contrôle une production en juste à temps. Ce système fait partie des outils qui ont permis à Toyota de réduire son niveau de stock d'une façon très importante (Ohno, 1989). Ceci explique l'attrait d'un bon nombre d'industriels occidentaux, dont PSA Peugeot Citroën, pour ce système relativement simple à mettre en œuvre. Soulard (Soulard, 2002) a présenté une description détaillée de la méthode Kanban dans l'industrie automobile actuelle.

Le Recor consiste à renouveler une pièce lorsqu'elle est consommée. C'est la consommation d'une unité de conditionnement qui génère un ordre de fabrication. Les cartes Recor représentent les lots de pièces à produire et indiquent clairement les seuils de lancement de fabrication et les priorités. C'est un des principes des flux tirés : la consommation de pièces en bord de ligne tire la production de nouvelles pièces chez le fournisseur. Les pièces en bord de ligne sont les pièces nécessaires placées à proximité des postes de travail afin d'effectuer les opérations prévues. Il existe deux types de boucle Recor : boucle de transport et boucle de production. Le nombre de cartes en circulation dans une boucle est déterminé à partir d'une méthode de dimensionnement PSA qui prend en compte la sécurisation du fonctionnement, la variabilité de la demande des clients et les aléas de production. Le dimensionnement de ces cartes est une étape capitale pour la régularité des flux et pour la réduction des stocks. Chan (Chan, 2001) a étudié l'impact de la variation de la taille d'une boucle Kanban dans un système de production en juste à temps.

Le Recor est l'un des modes le plus utilisé pour l'approvisionnement des composants des organes mécaniques et c'est le mode d'approvisionnement de toutes les pièces dans les usines de boîtes de vitesse. Il est très utilisé aussi dans les usines de liaisons au sol et pour l'approvisionnement de pièces brutes des moteurs.

Le SPARTE :

Le système SPARTE (Système de Programmation des Approvisionnements Rationalisés par une Technique Economique) est un système coordonné par anticipation. Les pièces sont commandées quelques jours avant le début de la fabrication du produit. Elles sont ensuite livrées aux clients. Le principe consiste à approvisionner les pièces le plus tard possible tout en garantissant le volume nécessaire au moment de leur consommation. Ce mode d'approvisionnement est utilisé en particulier pour les pièces d'origine extérieure des moteurs.

Le système SPARTE est utilisé aussi pour l'approvisionnement de tous les organes mécaniques dans les usines terminales. Ces dernières possèdent deux autres modes d'approvisionnement, non existant à ce jour dans les usines mécaniques :

Le SPARTE Adressé Horodaté (SAH) :

Le système SAH est une évolution du système SPARTE qui ajoute l'adressage et l'horodatage des approvisionnements. Ce système concerne en particulier la logistique interne (au bord de ligne, le stock, etc...). L'adressage consiste à préciser le lieu de consommation de la pièce approvisionnée et l'horodatage définit la date de consommation prévue de la pièce

approvisionnée. Le besoin par produit est calculé par tranche horaire afin de définir la date et l'heure de la livraison en supermarché.

Le synchrone :

Dans le système synchrone, l'ordre de livraison ne sera réalisé que quelques heures avant la consommation des constituants. Les ordres sont en effet envoyés lorsque le véhicule rentre au montage. Les pièces sont livrées exactement dans l'ordre de leur consommation, ce qui a pour effet de réduire les stocks. Le synchrone concerne essentiellement les pièces volumineuses et à grande diversité (ex : les sièges, les pare-chocs), difficilement stockables.

I.2. Le système de décision

Nous commençons dans cette section par la description des différents niveaux de la planification industrielle et nous nous focalisons par la suite sur les différents niveaux de décision dans les usines de mécanique.

I.2.1. Les niveaux de décision

Classiquement, les décisions en gestion de production sont classées en trois catégories : les décisions stratégiques, tactiques et opérationnelles (Baptiste et al, 2005).

Les décisions stratégiques correspondent à des choix qui impactent la politique à long terme de l'entreprise. Il s'agit de définir le portefeuille de produits ou d'activités ainsi que les ressources stables que l'entreprise souhaite avoir à terme. Les ressources stables visées sont principalement les machines et les ressources humaines.

Les décisions tactiques correspondent à des choix qui impactent la politique à moyen terme de l'entreprise. Nous citons, comme exemple, la planification de la production qui définit les volumes à produire sur quelques mois.

Les décisions opérationnelles correspondent à un ensemble de décisions à court terme. Elles assurent la coordination des flux et réagissent aux aléas dans le respect des décisions tactiques. Entre autres, elles permettent la synchronisation entre les ordres de fabrication et les décisions de maintenance.

Les trois catégories de décision correspondent donc aux trois niveaux de planification de la chaîne logistique. Elles diffèrent par l'horizon temporel qui les caractérise. Une

décomposition en quatre catégories a été présentée par Souilah (Souilah, 2008). Elle découpe les décisions opérationnelles en deux niveaux (figure I-7) :

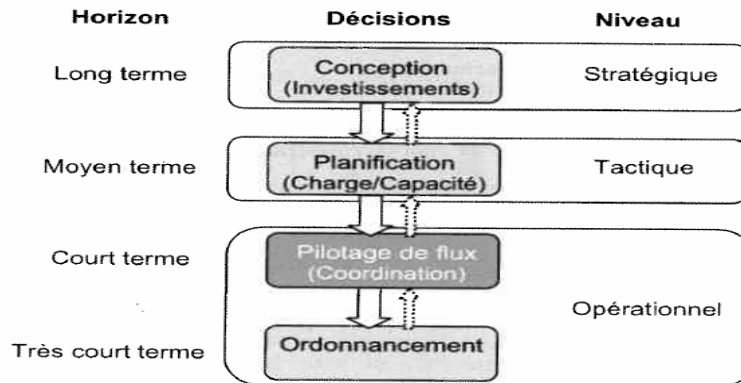


Figure I-7 : Niveaux de décision hiérarchisés (Souilah, 2008)

Le pilotage des flux : Il correspond à l'horizon à court terme. Il s'agit des décisions de lancement de production et de commande de réapprovisionnement.

L'ordonnancement : Il correspond à l'horizon à très court terme. Il s'agit de la définition de l'ordre de passage des produits sur une chaîne d'assemblage par exemple.

Lamouri (Lamouri, 2006) a étudié en détails ces niveaux de planification et a montré les limites de synchronisation qui existent entre les différents niveaux de planification dans une chaîne logistique.

I.2.2. Les niveaux de la planification de la production

Il est clair que l'organisation industrielle automobile est complexe et qu'une certaine anticipation est nécessaire. PSA Peugeot Citroën a mis en place une planification hiérarchique sur quatre niveaux correspondant aux quatre catégories citées dans la figure I-7. Il existe des interdépendances entre deux niveaux consécutifs donnés. Ces niveaux appartiennent à deux grandes phases : la phase de préparation et la phase d'exécution. La phase de préparation a pour objectif essentiel de garantir la disponibilité des moyens et des ressources nécessaires au moment de la fabrication des organes mécaniques dans la phase d'exécution. Nous commençons par la description de la phase de préparation qui est constituée de trois niveaux : la préparation annuelle, périodique et hebdomadaire. Ensuite, nous décrivons la phase d'exécution.

I.2.2.1. La phase de préparation :

La préparation annuelle se fait pendant l'année A pour l'année A+1. Cette préparation permet d'élaborer le budget nécessaire à la production et de prévoir les investissements éventuellement nécessaires. Elle permet, à partir des besoins prévisionnels des véhicules, de prévoir le planning annuel de production et les calendriers des sites de production des organes mécaniques.

La préparation périodique consiste à préparer le planning de production sur environ quatre mois glissants (environ un mois ferme et trois mois prévisionnels). A noter qu'une période correspond à 4 semaines complètes (du lundi au dimanche). A ce niveau, le responsable de programmation a une vision complète sur les commandes prévisionnelles des clients, le planning de livraison des fournisseurs, la capacité des ateliers, etc...

Les informations des préparations industrielles périodiques sont réparties par usine. Elles seront la base de l'élaboration du planning mensuel de production et d'un dimensionnement mensuel des effectifs de l'usine.

La préparation hebdomadaire consiste à planifier le programme de production durant une semaine donnée. Le planning hebdomadaire pour la semaine S+1 est déterminé en semaine S (lors d'un jour fixe : lundi ou jeudi selon le site de production). Il a pour objectif de prendre en compte les dernières évolutions prévisionnelles des besoins clients et les positions avance / retard dans la réalisation du programme de la période P. Le planning hebdomadaire de production des ateliers de montage se fait en premier lieu et sert de base pour planifier la production des ateliers d'usinage. Certains sites de production mécanique ne possèdent pas cette phase car elle est intégrée directement dans la phase d'exécution.

Le passage d'un niveau au suivant se fait après la validation d'un comité de programmation sur chaque site de production.

I.2.2.2. La phase d'exécution

La phase d'exécution est la préparation journalière. Elle consiste à planifier et à ordonnancer la production prévue pour une journée de travail. Cette phase varie d'une usine de production à une autre en fonction du mode d'ordonnancement appliqué (cf. I.3.3).

La phase d'exécution comporte l'ordonnancement, la distribution au bord de ligne et l'expédition.

Les différents niveaux présentés dans cette section (voir figure I-8) sont les piliers de la planification hiérarchisée du système industriel dans les usines de mécanique. La cohérence des décisions dans la phase de préparation est donc primordiale pour garantir la phase d'exécution.



Figure I-8 : Les niveaux de la planification de la production

I. 3. La production au juste nécessaire

Il est difficile de devenir compétitif sur des marchés de plus en plus occupés et il est encore plus difficile de rester compétitif. Reconnu par son efficacité chez Toyota depuis les années 70, le juste-à-temps, ou JAT (Just-in-time ou JIT en anglais) est devenu une des orientations stratégiques pour les entreprises afin de faire face au marché concurrentiel. Liker (Liker, 2006) présente les principes du modèle Toyota et les avantages de leur mise en oeuvre.

Un très grand nombre d'entreprises occidentales ont appliqué les concepts JAT en espérant pouvoir en tirer des profits rapidement. Nous citons, par exemple, le fabricant de fixations industrielles Bollhoff Otal. L'entreprise a mis en place une organisation JAT combinée avec la méthode Kanban. La nouvelle organisation en flux tirés a permis d'impliquer plus fortement les différents acteurs du terrain. Des résultats ont ainsi vu le jour rapidement suite aux différentes actions concrètes menées. Un deuxième exemple est celui du groupe Decayeux. C'est le leader européen des boîtes aux lettres, et aussi un fabricant d'articles de serrurerie et de tôlerie. Les objectifs fixés par l'entreprise ont été atteints grâce à une organisation JAT. Cette organisation a été mise en place tout en combinant le Kanban (pour le pilotage des ateliers) et l'AD6 (un système informatique de gestion industrielle en flux tirés). Alors en quoi consiste le JAT ?

I.3.1. Le principe du juste à temps :

Le juste à temps est un ensemble de techniques logistiques visant à améliorer la productivité globale d'une entreprise en réduisant les stocks et les coûts induits par ces stocks

(Lambersend, 1999). Il peut être traduit par cette expression : « Le produit voulu, au moment voulu, en quantité voulue, au lieu voulu ». Il a pour objectif de supprimer tous les gaspillages. En effet, il faut se rapprocher le plus possible de l'optimum et ne dépenser que ce qui est indispensable pour apporter de la valeur ajoutée. Le principe du juste-à-temps est que la production est tirée par la demande et non par l'offre. Il se traduit par une production et une livraison dans un temps très court, ce qui est demandé par ailleurs par le client. Une description détaillée a été présentée dans (Courtois et al., 1996) ainsi que les outils du JAT.

I.3.2. Le juste à temps appliqué aux usines de mécanique :

Bien sûr soumis aux lois de la concurrence, PSA PEUGEOT CITROEN doit produire et distribuer moins cher ses véhicules, tout en répondant à l'attente du client et en permettant de disposer de modèles personnalisés livrés dans les plus brefs délais. Produire plus vite ce qui est commandé est un avantage concurrentiel important. Pour atteindre ces objectifs, le groupe PSA Peugeot Citroën adopte un fonctionnement JAT depuis plusieurs années dans les usines de mécanique. Le système de production des organes mécaniques est donc passé d'un flux poussé à un flux tiré. Les commandes sont basées sur des demandes réelles et non sur des prévisions. Cette démarche a été suivie par la mise en place du Recor (cf. I.1.5) au sein des ateliers mécaniques. Travailler avec un système en flux tirés, appelé aussi flux tendus, exige une grande synchronisation et une grande coordination entre les divers acteurs (fournisseurs, transporteurs, fabricants, distributeurs, etc.) et peut poser des problèmes en cas d'incident à un point donné (Document interne PSA, 2006).

Dans les usines de mécanique, différentes problématiques se posent, notamment au niveau des décisions opérationnelles, se traduisant par des choix de modes d'approvisionnement différents des usines terminales. Comme nous l'avons indiqué précédemment, le Recor est l'un des modes d'approvisionnement le plus utilisé dans les usines de mécanique. Cependant, il n'a pas fait l'unanimité au niveau de la gestion de la production. Bien qu'il ait montré son efficacité et une réduction des dépenses remarquable sur divers sites de production, en particulier, dans les sites des liaisons au sol, ce ne fut pas le cas pour les sites des boîtes de vitesse par exemple.

En effet, comme tout système, le Recor a besoin d'un régulateur car il peut dériver. Il est très efficace lorsqu'il se base sur des ordres fermes. Or, le contrat logistique entre les usines terminales et les usines de mécanique de PSA Peugeot Citroën, est de 4 jours fermes et de 3

jours prévisionnels (sur une semaine). De plus, les ateliers de production des boîtes de vitesses ont une grande complexité des flux internes. Ceci a provoqué des perturbations des boucles Recor et a compliqué la procédure de leurs dimensionnements. Les usines de liaisons au sol se caractérisent par des lignes indépendantes et séparées par des stocks intermédiaires. Ces derniers permettent de réguler les perturbations des boucles Recor. Le besoin d'un stock en place et la maîtrise des boucles des caristes qui approvisionnent au bord de ligne sont essentiels pour absorber les aléas, ce qui n'est pas toujours évident du fait des différentes architectures mises en place. Enfin, le système Recor nécessite une grande surveillance car la perte des cartes est tout à fait possible (lors du transfert des pièces ou à cause du non accrochage des cartes sur le tableau, etc...).

Toyota, inventeur du système Kanban, a pour politique de garantir au sein des usines une stabilité de fonctionnement inégalée à ce jour. Le lissage d'activité et la volonté de limiter au strict minimum les impacts de la variabilité des demandes client sur le fonctionnement des usines sont parmi les vecteurs de performance opérationnelle de Toyota. En comparaison à la politique japonaise, PSA Peugeot Citroën accepte une grande variabilité des demandes clients. Ainsi, les usines doivent s'adapter à l'instabilité du marché et notamment les usines de mécanique. Cette dite instabilité combinée à la complexité des flux dans ces usines est l'une des raisons qui font qu'à ce jour, l'unanimité n'est pas de mise actuellement sur l'utilisation du Recor pour ces usines. Nous montrons donc la nécessité d'avoir une production en régime stabilisé, et qu'une fiabilité de l'outil industriel est un des pré-requis à la mise en place du Kanban. En conclusion, même si le Kanban reste un mode de gestion performant pour un bon nombre de systèmes de production, il est dans certains cas inadapté. Il a donc été nécessaire de revoir et améliorer la politique des engagements à court terme dans certaines usines de mécanique. Nous évoquons ce point dans le paragraphe suivant.

I.3.3. Les modes d'ordonnements

Confronté à des problèmes et des retards occasionnant des pertes financières, chaque site a su s'appuyer sur les compétences de ses employés pour trouver des solutions immédiates. Ceci a donc amené à trouver des solutions propres à chaque site afin d'améliorer la coordination entre la logistique et la production et anticiper les retards. Afin de rendre homogènes les modes de fonctionnement de chaque site, il a été nécessaire de trouver les solutions génériques les plus efficaces issues des retours d'expériences des différents sites.

Tout en respectant une gestion de production en flux tirés, des études ont été menées afin de pouvoir améliorer les décisions opérationnelles. Le juste à temps s'est traduit par le juste nécessaire pour répondre aux variations de consommation et aux besoins de composants. En 2008, des enquêtes internes ont été réalisées afin de définir le mode d'ordonnancement cible pour tous les ateliers de montage des organes mécaniques. L'objectif est de standardiser les modes de fonctionnements appliqués aux usines de mécanique dans le cadre du référentiel métier du groupe PSA Peugeot Citroën. Pour répondre aux différentes caractéristiques des sites de production mécanique, deux modes d'ordonnancement au niveau de la phase d'exécution ont été définis:

- Le premier appelé « En journée glissante » : ce mode a été appliqué dans les usines de production des moteurs.
- Le deuxième appelé « En journée reproductible » : ce mode a été appliqué dans les usines de production des boîtes de vitesse et quelques sites de liaisons au sol.

Les autres sites de mécanique, comme celui des amortisseurs, utilisent actuellement toujours le Recor pour gérer la production journalière. Nous étudions dans le chapitre suivant les modes de fonctionnement de cette dernière.

I.3.3.1. Ordonnancement en journée glissante

L'ordonnancement en journée glissante se fait sur un horizon de cinq jours glissants : de la journée J-5 jusqu'à la journée J, comme indiqué dans la figure I-9. C'est-à-dire que le jour J-5, le responsable planifie et ordonnance le besoin de la journée se déroulant 5 jours plus tard. Ainsi, le jour J-4, un ordre de livraison du besoin de la journée J sera envoyé vers le fournisseur. Ce dernier prépare la commande et livre l'usine de mécanique au plus tard après 48H de délai de transport. Avec ce mode, la préparation journalière se déroule en deux étapes successives : la planification et le séquençement.

La planification consiste à quantifier le jour J-5 la production de la journée J. Elle doit respecter les contraintes de l'atelier (le potentiel de l'atelier, la capacité de la ligne d'assemblage, les unités de conditionnement). Cette étape sert à réajuster la planification journalière afin de respecter la production au juste nécessaire.

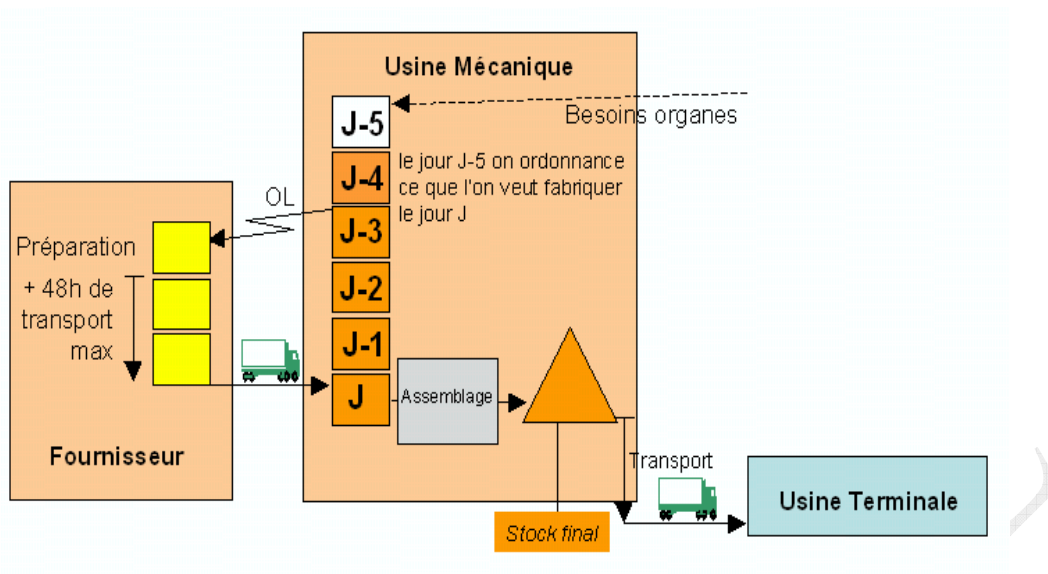


Figure I-9 : Ordonnancement en journée glissante

Le séquençement consiste à dimensionner et ordonnancer les organes de mécanique sur les lignes de montage. Il doit respecter les contraintes de dimensionnement et d'ordonnancement (cf. II.3.3) afin d'absorber les variabilités en amont, au bord de ligne et en aval.

Ce mode d'ordonnancement permet de travailler par anticipation, d'avoir un lissage de l'activité de fabrication et d'assurer en particulier l'approvisionnement des pièces d'origine extérieure en mode coordonné (Sparte). Il concerne en particulier les usines des moteurs dont les pièces d'origine extérieure représentent 95% des composants d'un moteur.

I.3.3.2. Ordonnancement en journée reproductible

L'ordonnancement en journée reproductible est une programmation de journées reproductibles sur un horizon d'une semaine, comme indiqué dans la figure I-10. Une fois par semaine, le responsable planifie et ordonnance le besoin de la semaine S+1. De même que pour le mode en journée glissante, la préparation se déroule en deux étapes successives: la planification et le séquençement.

La planification, dans ce cas, sert à quantifier pendant la semaine S la production de la semaine S+1. Elle doit respecter deux règles fondamentales :

- Tous les jours de la semaine, les ateliers de montage produiront les mêmes quantités de produits.
- Les écarts entre la semaine à ordonnancer (S+1) et celle en cours (S) ne doivent pas dépasser 10% sur un type de produit.

L'objectif est d'obtenir un programme de fabrication complètement stable sur une semaine tout en respectant les contraintes de production, des processus amont ou d'approvisionnement. Les variabilités dues à la demande du client suite à l'affermissement des prévisionnels seront gérées grâce au stock de produit finis.

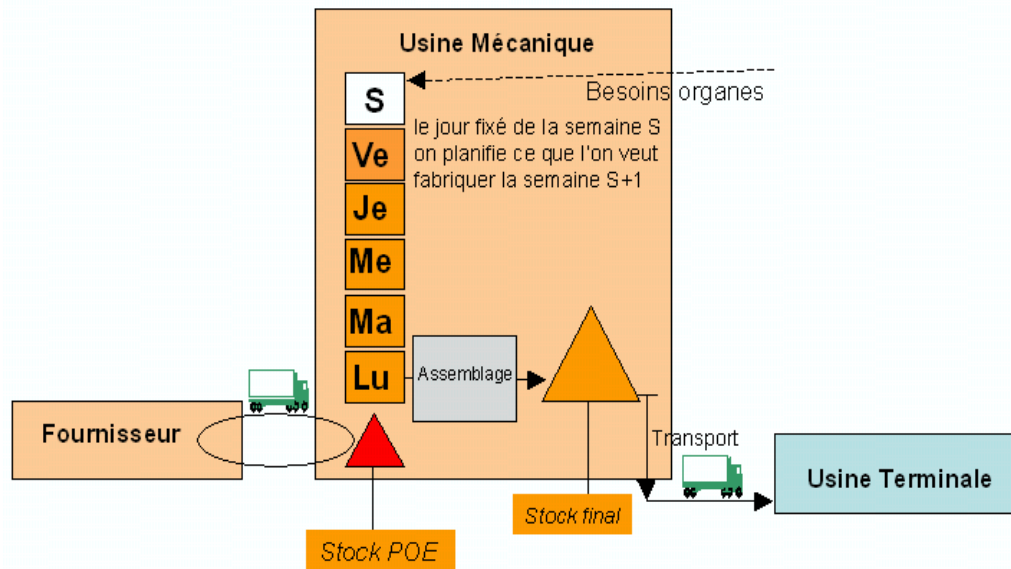


Figure I-10 : Ordonnancement en journée reproductible

L'étape de séquencement est identique à celle du mode en journée glissante mais sur un horizon d'une semaine.

Ce mode d'ordonnancement est inspiré de la méthode Heijunka (Liker, 2006). Nous rappelons que Heijunka est une technique de nivelage de la production dans le concept du système de production de Toyota (Matzka et al. 2012). Il s'agit du lissage de la production par le volume mais aussi par le mixage de produits au cours d'une période de temps donnée. L'ordonnancement en journée reproductible permet d'avoir un lissage de l'activité de fabrication et d'assurer l'approvisionnement des constituants en mode Recor ou hebdomadaire. Il concerne par exemple les usines des boîtes de vitesse dont les pièces d'origine interne représentent 70% des composants d'une boîte de vitesse.

I.4. Objectif de la thèse

La littérature est riche de travaux relatifs à la gestion et à l'optimisation des flux des usines terminales, ce qui a conduit à mieux répondre aux attentes et aux besoins des clients.

Mais des évolutions de même nature n'ont pas encore été observées au niveau des usines de mécanique. A ce jour, les études menées dans les unités terminales ont eu pour conséquence de creuser un écart entre les méthodes de gestion des flux des usines terminales et les méthodes existantes dans les sites de production des organes mécaniques, qui se répercute inévitablement dans l'utilisation des systèmes d'informations associés. Dans ce cadre, le groupe PSA Peugeot Citroën tend à concentrer les nouvelles études au niveau des usines de mécanique, tout en s'inspirant des retours d'expériences et des avancées au niveau des usines terminales.

Ainsi, nos travaux de recherche s'intéressent aux problématiques liées à la gestion de production des usines de mécanique. L'objectif principal de la thèse est de trouver des solutions novatrices en matière de dimensionnement des ressources, de planification et de séquençage de la production appliquées aux usines de mécanique. Pour y parvenir, il faut planifier et ordonnancer la production des organes mécaniques tout en respectant au mieux les contraintes industrielles. Puis, il est essentiel de mettre en place un nouvel outil d'aide à la décision permettant de gérer les imprévus et les variations des commandes des clients.

I.5. Conclusion

Ce premier chapitre a fait le point sur les modes de fonctionnement dans les usines d'un constructeur automobile et plus particulièrement les usines de mécanique. Nous avons présenté la chaîne logistique de PSA Peugeot Citroën, ses différents acteurs ainsi que la gestion des approvisionnements à travers les différents modes prédéfinis. Ces éléments ont mis en lumière la complexité de l'organisation du système industriel des usines d'organes mécaniques, notamment, dans la coordination de ses processus d'approvisionnement, de production et de distribution. Cette coordination est assurée par les différents niveaux de décision de la planification et des différents modes d'ordonnancement. Les éléments présentés dans ce chapitre nous permettront de comprendre les caractéristiques de nos cas d'étude et leurs problématiques qui seront décrits en détails dans le chapitre suivant.

Par ailleurs, il est clair que l'objectif est commun entre une usine terminale et une usine de mécanique, à savoir satisfaire le client avec le respect des délais. Néanmoins, comme nous le verrons dans le chapitre suivant, les usines de mécanique ont leurs propres contraintes liées à la nature du produit fabriqué. Elles sont, par conséquent, caractérisées par des problématiques

différentes de celles identifiées dans les usines terminales. Nous reviendrons plus précisément sur les caractéristiques des usines de mécanique dans le chapitre suivant.

CONFIDENTIEL

CONFIDENTIEL

Chapitre II

Les usines de mécanique

II.1. Caractéristiques de l'usine de mécanique	36
II.2. Cas de l'usine de mécanique des amortisseurs	37
II.2.1. L'atelier d'usinage des tiges d'amortisseurs	38
II.2.2. Planification de la production avec redimensionnement des ressources humaines	40
II.2.2.1. Description de la problématique	40
II.2.2.2. Premiers travaux	41
II.2.3. Conclusion	42
II.3. Cas d'une usine de mécanique des moteurs	42
II.3.1. Organisation d'une usine de mécanique de moteurs	43
II.3.2. L'atelier de montage des moteurs	43
II.3.3. Les contraintes d'ordonnancement	46
II.3.3.1. La contrainte de la taille d'Unité de Conditionnement (UC)	46
II.3.3.2. Les contraintes de tailles de lot minimum et maximum	47
II.3.3.3. La contrainte de non succession	47
II.3.3.4. La contrainte d'insertion	48
II.3.3.5. L'outil existant	48
II.4. Conclusion	49

Nos travaux de thèse se focalisent sur les problématiques des usines de mécanique automobile. PSA Peugeot Citroën possède 14 usines de mécaniques et bruts en Europe et à l'étranger, comme indiqué dans la figure II-1. Nous rappelons que les organes mécaniques sont classés en 3 filières : les moteurs, les boîtes de vitesse et les liaisons au sol.

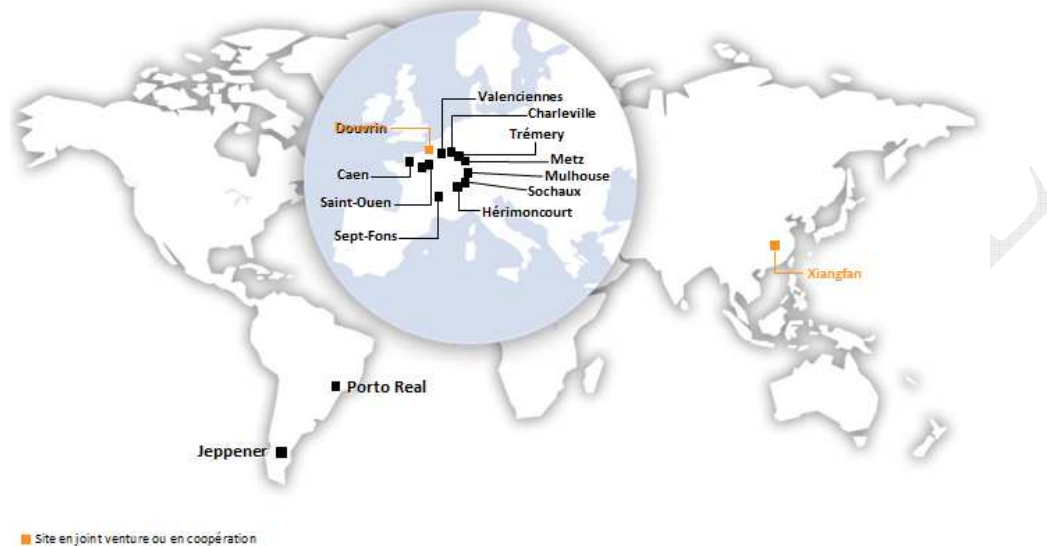


Figure II-1 : Les usines de mécanique et bruts de PSA Peugeot Citroën (2010)

Dans ce chapitre, nous commençons par décrire les caractéristiques des usines de mécanique. Notre étude de terrain des modes de fonctionnement nous a amenés à nous focaliser sur les problématiques des ateliers d'usinage et de montage des organes mécaniques. Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous décrivons tout d'abord les caractéristiques et les contraintes rencontrées dans l'usine de mécanique des amortisseurs, et en particulier dans l'atelier d'usinage des tiges, avant de traiter la problématique de planification de la production des tiges des amortisseurs. La troisième partie de ce chapitre est consacrée aux usines de mécanique des moteurs et en particulier aux ateliers de montage. Après une analyse de l'existant de ces ateliers, nous présentons les contraintes industrielles et des problématiques identifiées dans ce cas d'étude, qui ont conduit aux principaux développements de cette thèse.

II.1. Caractéristiques de l'usine de mécanique

Une usine de mécanique possède plusieurs clients. Leur nombre varie selon le produit. Ainsi, nous parlons de produits mono-client ou multi-clients. Les clients d'une usine mécanique peuvent être les usines terminales du groupe, les usines en coopération ou en joint-venture ou bien les centres logistiques des pièces détachées. Les flux d'expéditions peuvent

être en mode Recor, Sparte, hebdomadaire ou périodique selon l'emplacement géographique, l'appartenance ou non au groupe des clients et leurs différents calendriers de travail.

Une usine de fabrication des organes mécaniques est organisée en plusieurs ateliers séparés, avec des flux intra complexes, comme indiqué dans la figure II-2 . En effet, une usine mécanique peut avoir jusqu'à 10 lignes d'assemblage selon le produit. En amont de l'atelier de montage, nous trouvons un ou plusieurs ateliers d'usinage indépendants. Ces ateliers fabriquent en parallèle les différents composants et les envoient vers les ateliers de montage ou les clients extérieurs.

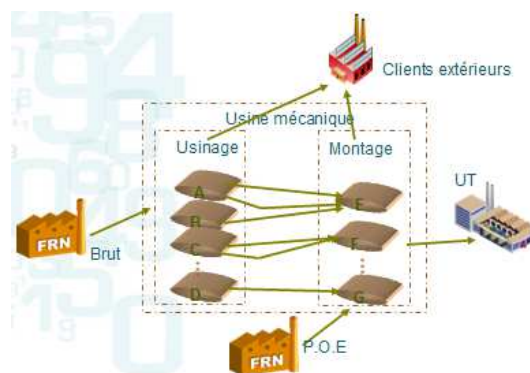


Figure II-2: Une usine de mécanique

Nous nous concentrons sur les problématiques des ateliers d'usinage des organes de mécanique à travers le cas d'étude de l'atelier d'usinage des amortisseurs caractérisé par la forte complexité de son processus de fabrication. Puis, nous nous focalisons sur les problématiques des ateliers de montage des organes de mécaniques à travers le cas d'étude de l'atelier de montage des moteurs, site pilote des nouveaux systèmes d'information standards mis en place.

II.2. Cas de l'usine de mécanique des amortisseurs

Comme nous l'avons évoqué dans le chapitre I, une usine mécanique est composée de deux grands ateliers : l'usinage et le montage. En réalité, elle est composée d'un ou plusieurs ateliers d'usinage ou d'un ou plusieurs ateliers de montage. L'usine de mécanique des amortisseurs fabrique plus de 25000 amortisseurs par jour répartis en plus de 400 références, dont 200 sont fabriquées tous les jours. L'amortisseur est l'élément essentiel de la suspension d'un véhicule. Il est composé d'une dizaine de pièces, principalement d'une tige, d'un corps, d'un cylindre, des limiteurs et des clapets (figure II-3). L'usine de mécanique des

amortisseurs comporte un atelier d'usinage des tiges, un atelier d'usinage des corps (y compris les cylindres, les limiteurs et les clapets) et un atelier de montage des amortisseurs.

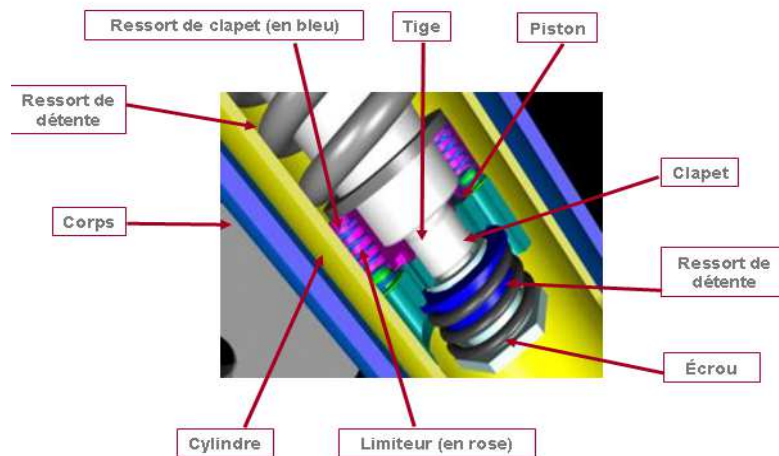


Figure II-3: Le mécanisme intérieur d'un amortisseur

Nous nous focalisons sur le cas de l'atelier d'usinage des tiges.

II.2.1. L'atelier d'usinage des tiges d'amortisseurs

Le secteur des tiges d'amortisseurs comporte 126 personnes et 70 machines multi-références. Les tiges présentent une diversité géométrique (environ 70 références) liée aux quatre différents diamètres et aux diverses longueurs. Le processus de fabrication des tiges est décomposé en trois grandes étapes successives : avant chromage, chromage, et après chromage, séparées par des stocks intermédiaires comme indiqué dans la figure II-4.

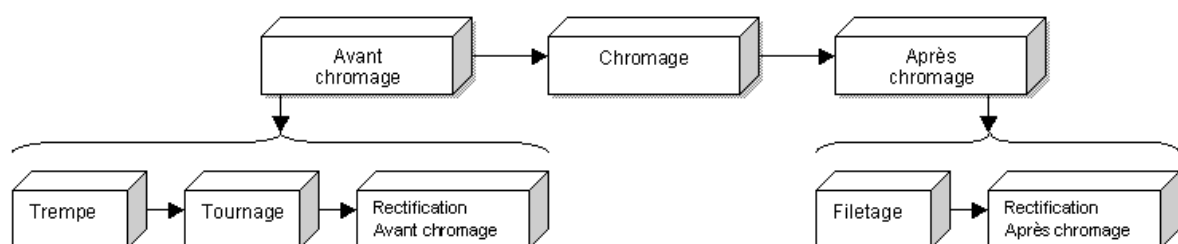


Figure II-4: Les différentes étapes de fabrication des tiges

L'avant chromage se décompose à son tour en trois étapes : la trempe, le tournage et la rectification. Lors de ces trois étapes, les tiges subissent les cinq premières opérations d'avant chromage, à savoir : la Trempe, le Tournage côté attache, le Tournage côté piston, la Rectification d'ébauche et de finition. Ensuite les tiges passent par l'étape de chromage où elles subissent l'opération de chromage.

La troisième grande étape est l'après chromage qui se décompose à son tour en deux étapes : le filetage et la rectification. Lors de ces deux étapes, les tiges passent par les six opérations d'après chromage, à savoir : le Filetage, le Poinçonnage ou le Perçage (selon les types), la Rectification coupe chrome, la rectification super finition et le contrôle final. Cette dernière opération garantit la conformité des tiges, avant d'être livrées aux ateliers de montage de l'usine. En résumé, le processus d'usinage des tiges comporte 11 opérations successives. Le respect de l'ordre des étapes est obligatoire, ce qui nous conduit à une fabrication caractérisée par une succession de machines séparées par des stocks.

L'atelier d'usinage des tiges d'amortisseurs est composé de 5 lignes avant chromage, une installation de chromage et 6 lignes après chromage comme indiqué dans la figure II-5.

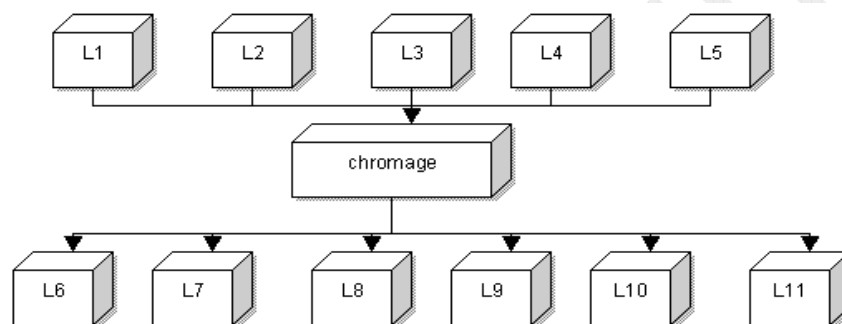


Figure II-5: L'atelier d'usinage des tiges d'amortisseurs

L'atelier d'usinage des tiges d'amortisseurs est basé sur un système de production en flux tirés géré en Recor. La phase d'exécution est gérée par les 3 boucles Recor mises en place. Le suivi de la fabrication journalière est réalisé en se basant sur des fichiers Excel remplis tous les jours par les opérateurs. Ces fichiers servent à donner une vision journalière de la fabrication dans l'atelier. Au moment où nous avons commencé notre travail, la phase de préparation périodique se faisait par un outil interne appelé 3E (Efficacité des Engagements des Effectifs), basé sur des fichiers Excel et une base Access. C'est un outil qui permet de définir la planification mensuelle, mais sans tenir compte des stocks initiaux et des aléas, et la répartition reste manuelle. Elle se résume à une affectation de charge et fait appel à un calcul sur tableur. Il fallait environ trois heures à un expert métier pour réaliser le planning prévisionnel mensuel, souvent bouleversé par la suite en raison de la fluctuation de la demande des clients. En plus, il n'était pas facile de remettre en cause ces prévisions.

L'atelier d'usinage des tiges présente une grande diversité et un flux complexe, ce qui rend l'utilisation de l'outil 3E assez laborieux et difficile à gérer. Par ailleurs, cet atelier est

caractérisé par une variabilité de la demande et des contraintes de temps réel. De la conjugaison de l'ensemble de ces éléments résulte un problème de gestion de production complexe et difficile. Notre objectif est de proposer un outil d'aide à l'engagement quotidien des ressources et de la production des amortisseurs. Il permettra d'atteindre une meilleure répartition de la production via l'introduction de l'optimisation dans le calcul de charge.

II.2.2. Planification de la production avec redimensionnement des ressources humaines

II.2.2.1. Description de la problématique

L'atelier d'usinage des tiges des amortisseurs est de type flow shop hybride. Il se caractérise par des stocks intermédiaires souvent assez importants dus à la grande diversité des pièces et à la complexité des flux. Aucune contrainte de capacité concernant les ressources matérielles n'est présente car celles-ci sont surdimensionnées par rapport à la demande. En raison de la variabilité des demandes, l'atelier d'usinage des tiges est dans l'obligation de reconfigurer rapidement et souvent sa planification. Cela se traduit concrètement dans les ateliers par la nécessité d'avoir une forte polyvalence technique de la main d'œuvre et des changements d'affectation de cette dernière sur l'outil industriel de manière régulière. La flexibilité des ressources humaines est par conséquent un élément stratégique du bon fonctionnement de l'atelier d'usinage des tiges d'amortisseurs. Notre problématique consiste à planifier la production en prenant en compte le dimensionnement des ressources humaines. Le but est d'améliorer la productivité et de mieux gérer les perturbations imprévues. Afin de faciliter la résolution du problème, nous l'avons divisé en sous-problèmes indépendants. Pour chaque grande étape (l'avant chromage, le chromage et l'après chromage), les tiges sont regroupées en familles. Par définition, une famille de références est un ensemble de références qui partagent deux caractéristiques communes :

- Elles peuvent être fabriquées par les mêmes machines.
- Le niveau de priorité entre deux machines est le même pour toutes les références de la famille.

Notre approche est basée sur les hypothèses suivantes :

- Nous considérons que le temps de cycle est le même pour toutes les références pour une machine donnée.
- Une équipe à temps plein travaille 8h par jour. Une demi-équipe travaille 4h par jour.

- Nous considérons que le nombre d'équipes ou de demi-équipes par machine est identique durant tout le mois.
- Il y a cinq jours de travail par semaine. Les samedis peuvent également être travaillés en jours supplémentaires. Les dimanches sont des jours de repos.
- Le nombre d'ouvriers peut être différent d'une équipe à une autre.
- Un ouvrier peut être affecté à une seule ou bien à deux machines.
- Une machine ne peut avoir qu'une seule équipe à la fois qui lui est affectée.

II.2.2.2. Premiers travaux

Notre but pour cette étude de cas a été de planifier la production en prenant en compte le dimensionnement des ressources humaines. Ce travail est présenté en détail dans l'article (Fakhfakh et al., 2009) qui présente les différents modèles développés et une comparaison des résultats obtenus et qui constitue l'annexe de cette thèse. Nous résumons ici les principaux résultats.

Nous avons développé deux modèles : un modèle de planification de la production et un modèle d'équilibrage des machines. Ils ont pour but d'assister le manager dans ses nécessaires prises de décision face aux variabilités et aux aléas. Le modèle de planification de la production consiste en un programme linéaire à variables mixtes qui a pour but d'établir un planning de la production et d'engager le nombre prévisionnel minimum de personnes dans la période considérée. Dans notre cas d'étude, le coût du travail est essentiellement le coût des ressources humaines. Nous cherchons à minimiser le nombre mensuel total d'équipes (le nombre d'équipes en jours de travail et le nombre d'équipes en jours supplémentaires). Nous tenons compte de la différence du coût de travail en heures supplémentaires. Ainsi, nous cherchons à trouver la meilleure répartition possible des besoins sur les machines tout en minimisant le coût de la main d'œuvre. Ce programme doit respecter les contraintes suivantes : le respect de la capacité de production, la satisfaction de la demande du client et le respect du fait qu'un ouvrier puisse être affecté à deux machines en même temps.

Nous avons réalisé des tests basés sur des données réelles, via le solveur CPLEX. Nous avons trouvé des solutions optimales en quelques secondes. Elles sont meilleures que celles trouvées manuellement à travers l'outil interne actuel. Néanmoins, dans certains cas nous avons observé à la fois une saturation de certaines machines et/ou une sous-utilisation d'autres machines. Afin d'améliorer ce problème de déséquilibre, nous avons développé dans un

deuxième temps un modèle d'équilibrage des machines, qui a pour objectif d'équilibrer la distribution de la production. Nous nous sommes basés sur le nombre minimum d'équipes à engager par machine, fourni par le modèle d'optimisation. Dans ce modèle, pour une machine donnée, nous cherchons à maximiser l'écart entre le potentiel maximal de production avec le nombre d'équipes engagées et le besoin à fabriquer. La résolution via CPLEX a donné des solutions optimales. Ces solutions montrent un équilibrage de distribution de la production avec le minimum d'effectif possible.

II.2.3. Conclusion

L'étude de terrain des usines mécaniques nous a permis de nous focaliser dans un premier temps sur les problématiques des ateliers d'usinage. Nous avons traité la problématique de planification de la production en prenant en compte le dimensionnement des ressources humaines. Les modèles proposés permettent de réduire le temps de calcul et de donner la possibilité au manager de réajuster son planning autant que nécessaire. En revanche, nous considérons un niveau de stock vide au début de chaque période. Ce point pourra faire l'objet de futures recherches.

Ces travaux de recherche ont été réalisés au début de la thèse et avaient suscité un fort intérêt du manager. Mais cet atelier a ensuite été complètement réorganisé, ce qui a conduit à l'arrêt de nos recherches sur ce cas d'étude. En effet, des études ont été réalisées par le groupe afin de mettre en place une nouvelle organisation des lignes, avec l'objectif de réduire la complexité du processus de production, en particulier dans les ateliers d'usinage. Par ailleurs, une forte baisse de production a été amorcée suite à la non affectation de nouveaux projets industriels. Nous avons arrêté à ce niveau nos travaux de recherche sur ce cas d'étude.

II.3. Cas d'une usine de mécanique des moteurs

Le deuxième et principal point abordé dans la thèse concerne les problèmes d'ordonnancement sur les lignes de montage. Nous nous focalisons sur un deuxième cas d'étude, qui est celui des unités de production des moteurs.

Au sein du groupe français PSA Peugeot Citroën, les usines de mécanique des moteurs représentent environ 40% de l'activité des usines de mécanique et bruts. Elles se caractérisent par la production en lots au plus juste nécessaire, en d'autres termes, ne fabriquer que les moteurs strictement nécessaires et n'effectuer une production ou un approvisionnement qu'en fonction du besoin. Dans ce contexte, l'approvisionnement des

pièces est critique dans le sens où il doit garantir le juste à temps. Nous rappelons que les usines de mécanique des moteurs présentent une grande diversité d'approvisionnement qui nécessite une parfaite maîtrise de la production juste à temps.

II.3.1. Organisation d'une usine de mécanique de moteurs

La production du groupe PSA Peugeot Citroën s'élève à 7000 moteurs par jour, répartis sur 97 références de moteurs pour 19 clients. Les principaux composants d'un moteur sont les carters-cylindres, les culasses, les vilebrequins, les arbres à cames, les bielles, les pompes à eau et à huile et les boîtiers de sortie d'eau. Ils arrivent sur le site de production à l'état brut. Ces pièces en acier, en aluminium ou en fonte prennent leur forme définitive sur les installations automatisées des lignes d'usinage. PSA Peugeot Citroën a deux usines de mécanique de moteurs dont l'une produit trois types de motorisations et l'autre quatre types. Nous nous focalisons dans cette section sur un atelier de montage d'un type de motorisation donné.

II.3.2. L'atelier de montage des moteurs

L'atelier de montage est organisé autour d'une ou plusieurs lignes principales d'assemblage et comprend des lignes d'assemblage secondaires et des zones de préparation. Dans le cas où l'atelier compte plusieurs lignes d'assemblage, celles-ci sont indépendantes. Cela signifie qu'un moteur ne peut pas changer de ligne d'assemblage au cours de son assemblage. Les lignes d'assemblage secondaires et les zones de préparation permettent aux opérateurs d'assembler des éléments complexes (culasse, arbre à cames...) avant l'assemblage final du moteur sur la ligne principale d'assemblage.

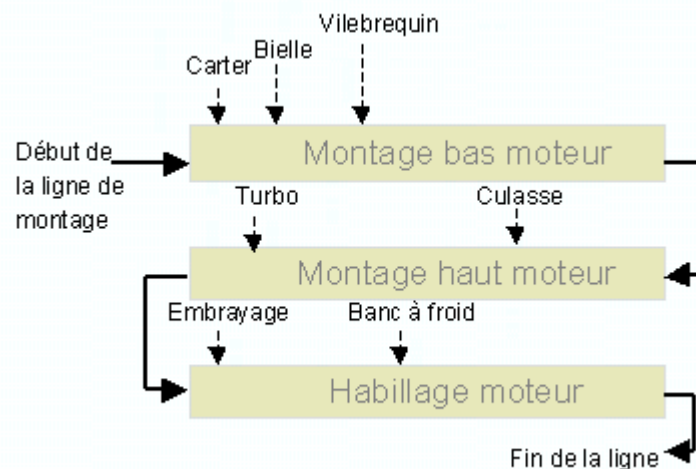


Figure II-6: Une ligne principale de montage de moteurs

La ligne principale de montage de moteurs est découpée en trois secteurs comme indiquée dans la figure II-6 : montage bas moteur (carter, bielle, vilebrequin,...), montage haut moteur (culasse, turbo, équipement d'injection...) et habillage moteur (embrayage, banc à froid...).

L'assemblage des moteurs dans l'atelier de montage nécessite des centaines de tâches élémentaires réalisées sur des centaines de postes de travail. Les moteurs se déplacent sur un convoyeur avec des stocks intermédiaires très faibles entre les postes de travail. Contrairement au véhicule qui ne s'arrête jamais lors de son défilement sur une ligne de montage, les moteurs sont bloqués au niveau de chaque poste. La complexité du processus d'assemblage diffère d'une ligne à une autre selon le type de moteur.

➤ Les zones de saturation

Les zones de saturation sont des zones de la ligne principale d'assemblage, qui peuvent provoquer une augmentation du nombre de moteurs en attente sur la ligne principale, voire même l'arrêt de la ligne. Les principales zones sont :

- Zone d'arbre d'équilibrage (zone AEB) :

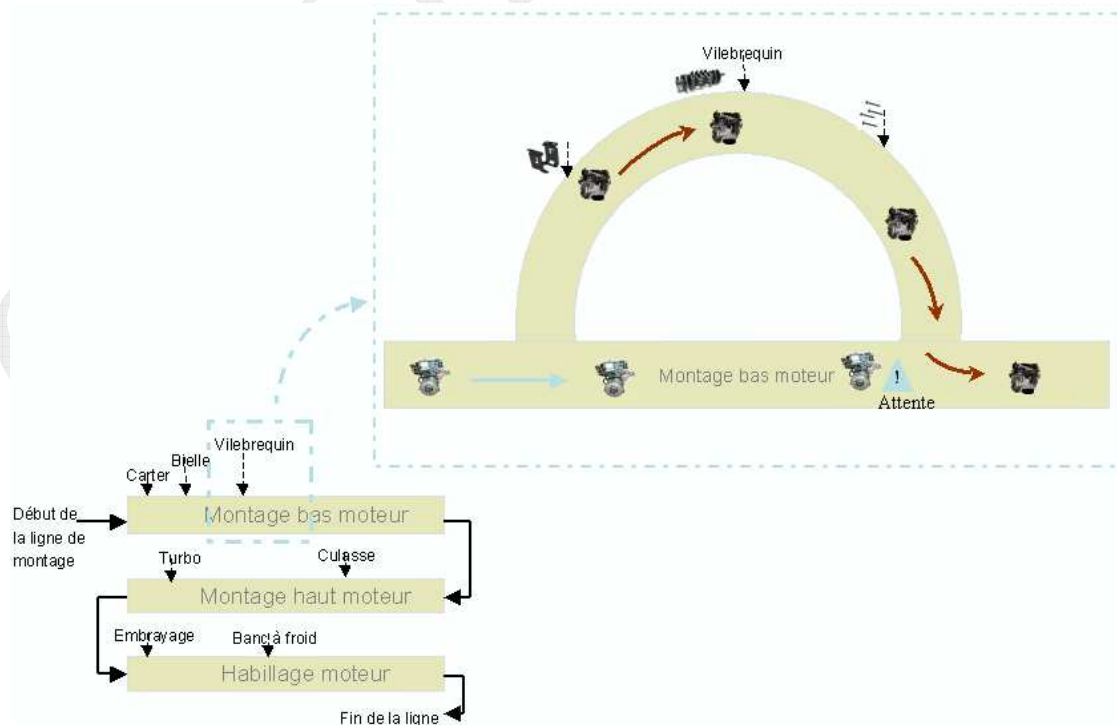


Figure II-7: Une ligne secondaire - Zone AEB d'une ligne de montage de moteurs

Plusieurs références de moteurs sont fabriquées sur une même ligne d'assemblage. Certaines d'entre elles nécessitent des opérations supplémentaires liées aux types de vilebrequins correspondants. Ces références passent par une boucle supplémentaire appelée zone AEB comme indiquée dans la figure II-7. Afin de respecter la méthode FIFO (First In First Out) des moteurs sur la ligne principale, les autres références de moteurs doivent attendre le passage des références spécifiques à cette zone.

- Zone Biturbo :

Sur la ligne de préparation du turbo (un des composants du moteur), les opérateurs effectuent plusieurs opérations avant l'assemblage final sur la ligne principale. Certaines des références de moteurs nécessitent la mise en place d'un deuxième Turbo, appelé Biturbo. Pour y parvenir, les opérateurs doivent effectuer des opérations supplémentaires liées à la préparation et à l'assemblage du Biturbo. Le temps de cycle dans cette zone diffère d'une référence à une autre selon l'assemblage d'un turbo ou d'un Biturbo. La figure II-8 présente la ligne de préparation de la zone Biturbo, parallèle à la ligne principale.

Par conséquent, la surcharge de la zone Biturbo ou de la zone d'arbre d'équilibrage pourra provoquer des attentes importantes sur la ligne principale.

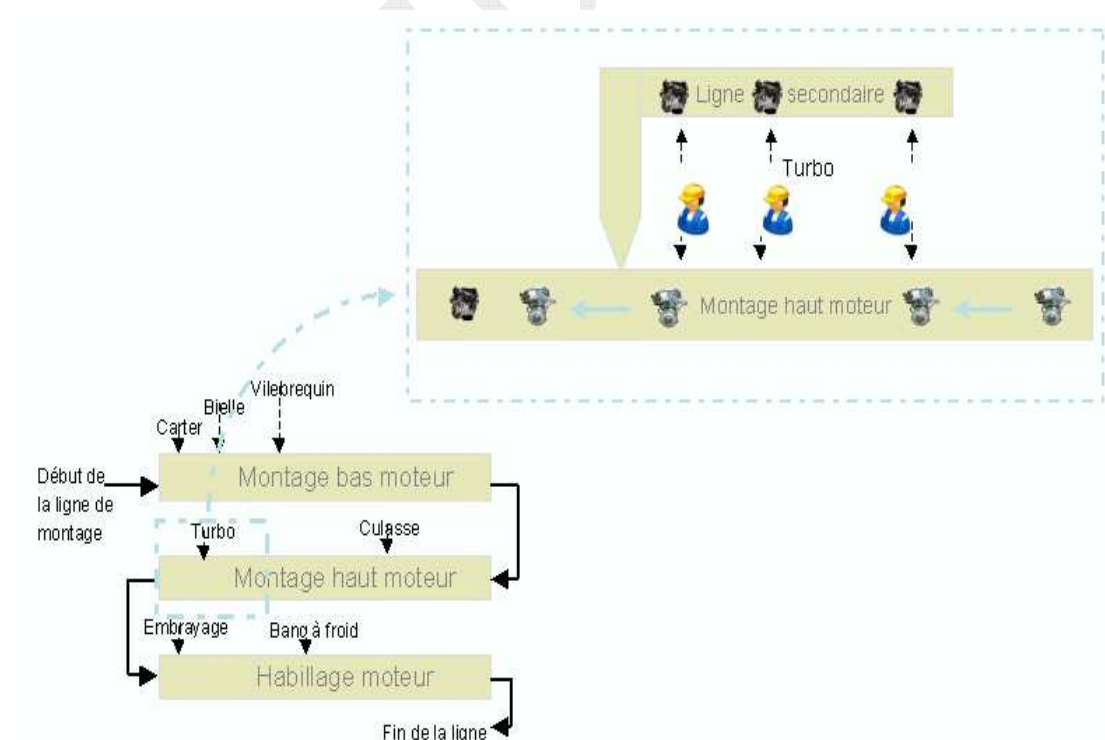


Figure II-8: Une zone de préparation - Zone Biturbo d'une ligne de montage de moteurs

Les ateliers d'assemblage des moteurs se caractérisent par la complexité du processus de production : la synchronisation entre les différentes lignes d'assemblage, la synchronisation de l'approvisionnement au bord de la ligne, le risque de saturation de certaines zones d'assemblage.... Cependant, un ensemble de contraintes de production a été défini afin d'éviter la saturation des lignes d'assemblage et participe donc au meilleur respect de la demande des clients dans les délais impartis.

II.3.3. Les contraintes d'ordonnancement

Les contraintes d'ordonnancement d'un système de production automobile traduisent les limites imposées par l'outil de production de l'usine, par les limites de l'opérateur et par la rentabilité économique. Dans notre cas d'étude, les contraintes d'ordonnancement sont classées en deux catégories. Les contraintes de dimensionnement sont composées des contraintes de la taille d'Unité de Conditionnement et des tailles de lot minimum et maximum. Les contraintes de séquençement sont composées à leur tour de deux contraintes que sont les contraintes de non succession et d'insertion.

II.3.3.1. La contrainte de la taille d'Unité de Conditionnement (UC)

Les dimensions des unités de conditionnement de stockage, appelées aussi « palettes », sont standards au sein des usines. Le nombre de moteurs assemblés que l'on peut stocker sur une palette varie selon le volume du type de moteur. Ce nombre définit la taille de l'unité de conditionnement de chaque type de moteur (cf. figure II-9).

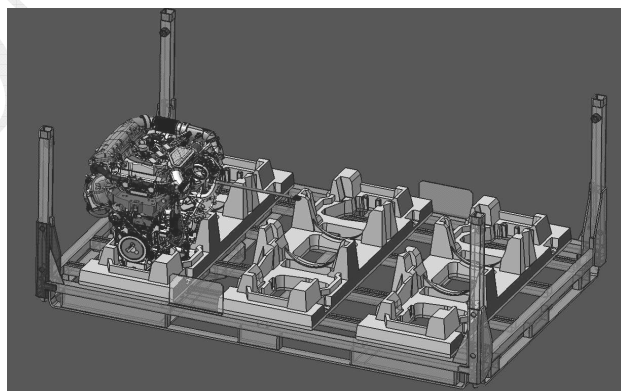


Figure II- 9: Une Unité de Conditionnement d'un type de moteur

La contrainte de la taille d'UC est de la forme : le volume d'un lot de production doit être un multiple de la taille d'UC correspondante à chaque type de moteurs. Elle permet de ne

pas avoir une unité de conditionnement de stockage non remplie en totalité. L'objectif est d'optimiser les surfaces de stockage.

II.3.3.2. Les contraintes de tailles de lot minimum et maximum

La contrainte du lot minimum spécifie la taille minimum d'un lot de production pour chaque type de moteurs. La contrainte du lot maximum spécifie la taille maximum d'un lot de production pour chaque type de moteurs.

Les tailles minimum et maximum d'un lot de production sont les bornes inférieures et supérieures qu'il faut respecter. Ces bornes ont été calculées en tenant compte du temps de cycle des moteurs, du temps d'exécution des robots et du temps de travail des opérateurs. Les contraintes de tailles de lots minimum et maximum sont multiples de la taille d'UC. L'objectif des contraintes de tailles de lots minimum est de minimiser le temps de changement au bord de ligne. Celui des contraintes de tailles de lots maximum est de garantir un minimum de répartition du besoin en fractionnant le volume sur la journée. Ainsi, elles évitent la production du besoin journalier d'un type de moteur en un seul lot.

II.3.3.3. La contrainte de non succession

La contrainte de non succession consiste à interdire la succession de deux lots de deux types de moteurs donnés. La figure II-10 présente un exemple. En effet, quelques types de moteurs nécessitent un temps de cycle plus long afin de réaliser des opérations d'assemblage spécifiques ou supplémentaires. Il faut donc éviter la succession de deux lots de ces types de moteurs afin d'éviter la saturation de la ligne de montage (cf.II.3.2). Cette contrainte est à respecter aussi dans le cas où les luges portant certains types de moteurs risquent de s'accrocher sur des zones de la ligne d'assemblage. Ces contraintes sont en général fortes ou bloquantes.

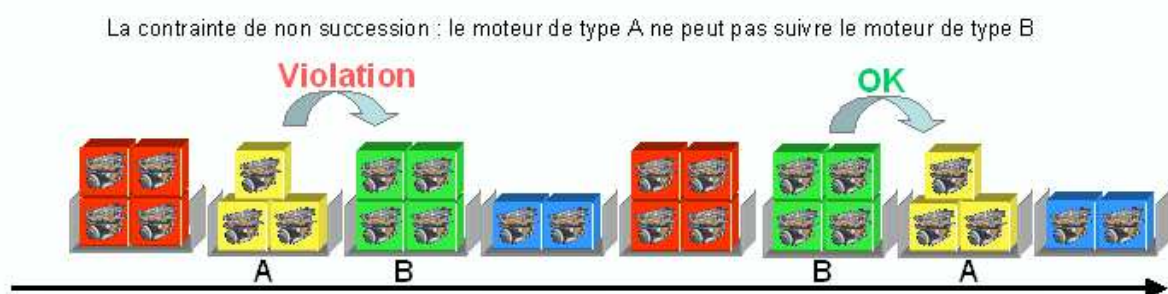


Figure II- 10: La contrainte de non succession

II.3.3.4. La contrainte d'insertion

La contrainte dite d'insertion est de la forme « entre deux lots de moteurs de type T1, il faut avoir au moins N moteurs de types différents de T1 ». La figure II-11. présente un exemple. En effet, pour des moteurs spécifiques, les opérateurs occupent des stations de travail sur la ligne principale et sur la ligne de préparation en même temps. L'objectif de cette contrainte est d'espacer les lots des moteurs spécifiques afin de garantir aux opérateurs le temps nécessaire pour réaliser les opérations complémentaires. Ce type de contrainte est en général une contrainte forte ou bloquante.

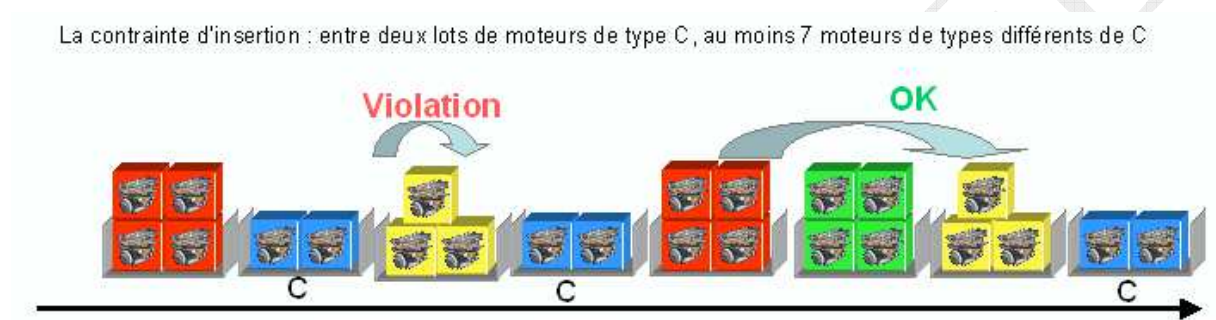


Figure II- 11: La contrainte d'insertion

II.3.4. L'outil existant

Un outil appelé NO3 « Nouvel Outil d'Ordonnancement des Organes » a été mis en place fin 2008. Il permet de gérer la préparation journalière des sites de production de moteurs. Il permet de déterminer, à partir des besoins fermes des clients, la planification prévisionnelle sur un horizon de 5 jours tout en respectant les contraintes de l'atelier. Cet outil est basé sur le mode d'ordonnancement en mode glissant (cf. I.3.3).

Le noyau de NO3 est organisé autour de deux grandes fonctions : un tableau de bord et un processus assisté d'ordonnancement. Le tableau de bord consiste à synthétiser d'une manière automatique l'ensemble des données concernant l'état de l'atelier du jour J. Il présente une vision de l'expédition du jour J-1, du stock disponible et indisponible, de la palettisation et des besoins journaliers des clients. Il permet d'automatiser et fiabiliser les tâches fastidieuses de saisie de données. L'outil permet d'une part d'avoir une vue détaillée sur l'état de l'usine, et d'autre part d'anticiper les commandes des pièces d'origine extérieure. Par contre, l'ordonnancement journalier de la production se fait d'une manière manuelle.

A partir du besoin client, l'ordonnanceur doit dimensionner la production journalière en lots et créer un séquençement de lots tout en respectant les contraintes d'ordonnancement. A cause de la diversité des moteurs et de la complexité des contraintes, il se retrouve face à un travail laborieux et difficile à accomplir manuellement. Sachant que les contraintes d'ordonnancement sont des contraintes obligatoires, il n'est pas facile de pouvoir créer quotidiennement une liste ordonnée tout en les respectant toutes manuellement. Il est incontournable, par conséquent, de développer des outils pour optimiser automatiquement l'ordonnancement journalier de l'atelier de montage des moteurs. Le deuxième axe de nos recherches concernera cette problématique. En résumé, notre objectif consistera donc à ordonnancer le montage des moteurs tout en respectant toutes les contraintes industrielles. Les chapitres suivants seront dédiés à la présentation des travaux réalisés dans le cas de cette thèse.

II.4. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la description des problématiques rencontrées dans les usines de mécanique. Deux cas d'étude ont été présentés : l'usine de mécanique des amortisseurs et l'usine de montage des moteurs. L'atelier d'usinage des tiges des amortisseurs est caractérisé par la complexité de son processus de fabrication et la grande diversité des pièces. Compte-tenu des différentes contraintes et des besoins identifiés, notre problématique consiste à planifier la production en prenant en compte le dimensionnement des ressources humaines. Notre objectif est de trouver la meilleure répartition possible des besoins sur les machines tout en minimisant le coût de la main d'œuvre et en évitant la saturation des machines. Nous avons présenté les premiers travaux que nous avons effectués.

Notre deuxième axe de recherche concerne l'atelier de montage des moteurs caractérisé par des contraintes de production fortes, voire bloquantes. Une description détaillée de ces contraintes a été faite dans ce chapitre. L'analyse de l'existant de notre cas d'étude et les contraintes industrielles identifiées seront les éléments de base pour décrire la problématique d'ordonnancement du montage des moteurs au chapitre suivant.

CONFIDENTIEL

Chapitre III

Ordonnancement des moteurs

III.1. Description du problème	52
III.2. Revue de la littérature	53
III.3. Modélisation	56
III.3.1. Définitions	56
III.3.2. Modèle proposé	56
III.4. Résolution et résultats	60
III.5. Conclusion	63

Comme nous l'avons montré dans les chapitres précédents, les constructeurs automobiles offrent aujourd'hui de plus en plus de produits personnalisés à leurs clients. Cette diversité de produits a été suivie par une diversité des organes mécaniques. Dans le cas des ateliers de montage des moteurs, la diversité des moteurs sur une même ligne de montage nécessite la prise en compte de nombreuses contraintes afin d'éviter la saturation de la ligne et d'assurer son équilibrage. Dans cette perspective, nous nous intéressons à la détermination de l'ordonnancement des différents types de moteurs sur une ligne de montage. Ainsi, ce chapitre est consacré à la présentation, à la modélisation et à la résolution du problème de l'ordonnancement des moteurs sur une ligne de montage. Nous commençons par une description du problème. Nous présentons, par la suite, un état de l'art. Dans la partie modélisation, nous donnons quelques définitions qui seront nécessaires pour expliquer le problème étudié. Ainsi, nous modélisons le problème en présentant les données que nous allons utiliser ainsi que les méthodes de résolution employées. Nous proposons une approche basée sur une modélisation mathématique par programmation linéaire entière. Dans la partie résolution, nous expérimentons le modèle proposé et nous comparons nos résultats à ceux obtenus manuellement par l'ordonnanceur. Nous analysons ces résultats obtenus afin de les valider sur le terrain. Les travaux décrits dans ce chapitre ont fait l'objet d'un article (Fakhfakh et al. , 2011).

III.1. Description du problème

Au sein du groupe PSA Peugeot Citroën, les ateliers de montage des moteurs sont les fournisseurs directs des usines terminales. Les moteurs sont expédiés en mode synchrone. Nous rappelons que nous avons exposé dans le premier chapitre les différents modes d'approvisionnements des usines mécaniques. Les ateliers de montage des moteurs sont caractérisés par l'approvisionnement des pièces d'origine extérieure en mode synchrone, permettant ainsi d'avoir un stock de sécurité final très faible. Dans ce cadre de fonctionnement, la production en flux tendu nécessite l'optimisation de la gestion de la production des lignes de montage car le moindre imprévu pourra engendrer des retards importants. L'étude de terrain a montré les limites des outils existants et la difficulté de fournir manuellement un ordonnancement journalier des moteurs sur une ligne de montage.

En effet, l'ordonnancement des montages des moteurs est une tâche difficile et laborieuse à cause de la grande diversité des références et des différentes contraintes qu'il est difficile de respecter. Ainsi, il est évident qu'un besoin en outil d'aide à la décision est ressenti dans les

ateliers de montage pour gérer la fabrication des moteurs. Nous avons identifié que le problème d'ordonnancement des moteurs était un des problèmes les plus importants à traiter au sein de ces ateliers.

Les ateliers de montage des moteurs de PSA Peugeot Citroën sont caractérisés par des lignes d'assemblage fiables avec des stocks intermédiaires très faibles. Comme nous l'avons précisé dans le chapitre 2, les ateliers de montage des moteurs se caractérisent par la production par lots. De ce fait, notre problématique consiste à dimensionner et à séquencer les lots de moteurs sur une ligne de montage. Ce problème correspond donc à une combinaison entre un problème de dimensionnement de lots et un problème de séquençement. Le dimensionnement des lots des moteurs doit respecter les contraintes de dimensionnement (cf II.3.3) : les contraintes de la taille d'UC et les contraintes de lot minimum et de lot maximum. Le séquençement des lots des moteurs doit respecter les contraintes de séquençement (cf II.3.3) : les contraintes de non succession et d'insertion. La figure III.1 présente l'ensemble des contraintes de production au niveau des références des moteurs. Notre objectif est de trouver la liste ordonnée du montage des moteurs tout en respectant l'ensemble des contraintes de production.

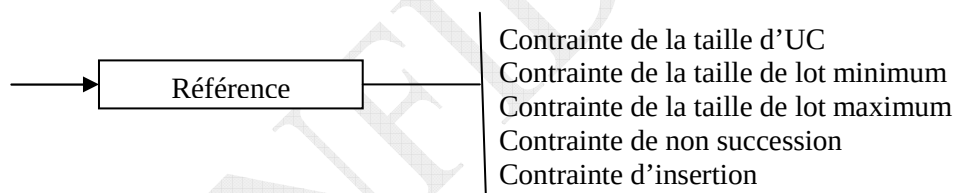


Figure III- 1: Les contraintes de production au niveau des références de moteurs

III.2. Revue de la littérature

Plusieurs problèmes étudiés dans la littérature se rapprochent de la problématique que nous abordons. Nous citons le problème de dimensionnement de lots ou encore le problème d'ordonnancement des véhicules (Régim et al., 1994) connu aussi sous le nom de Car Sequencing Problem (CSP). Ainsi, nous présentons un état de l'art sur les problèmes étudiés tout en positionnant nos travaux au sein de la littérature.

La production par lots est parmi les modes de production les plus utilisés en industrie. Elle est caractérisée par la production en petites séries diversifiées de produits identiques. Elle

permet d'avoir un lissage de la production tout en permettant une certaine flexibilité. Toutefois, il n'est pas toujours évident de définir et de gérer les lots à produire. Le problème de détermination des lots de fabrication est récurrent dans les industries. Ce type de problème a fait l'objet de plusieurs travaux connus sous le nom de problèmes de dimensionnement de lots ou encore Lot-Sizing Problem. Plusieurs chercheurs ont proposé différentes modélisations et différentes méthodes de résolution afin de traiter ce problème sous ses différentes formes. (Absi, 2005) présente un état de l'art sur ce type de problèmes. Il propose une première classification des travaux par type de problèmes (lot-sizing à une seule référence ou à plusieurs références), et une deuxième classification par méthode de résolution (méthodes exactes ou méthodes approchées). Il a accordé une importance particulière aux travaux réalisés par des approches de programmation dynamique et par des approches heuristiques. (Wolosewicz, 2008) a décrit une revue des problèmes de dimensionnement de lots. Elle les a classés selon plusieurs critères : leurs périodes (mono-période ou multi- période), leur niveau (à un niveau ou à plusieurs niveaux), leurs capacités (à capacité finie ou à capacité infinie) et leurs produits (à un produit ou à plusieurs produits).

Plusieurs études ont traité ces deux problèmes de dimensionnement et de séquençement des lots séparément. Nous citons (Shemeleva et al., 2010) qui proposent un algorithme génétique pour traiter chacune des deux problématiques. Cependant, nous avons trouvé aussi plusieurs travaux qui traitent les deux problèmes ensemble. Nous citons, par exemple, le cas de l'usine de production de nourriture pour animaux (Toso et al., 2009). L'objectif des auteurs est d'optimiser le dimensionnement et le séquençement des lots de l'usine. Afin de réduire le risque de contamination entre les lots de nourriture, il faut respecter des contraintes de non succession entre certaines paires de lots. (Toso et al., 2009) proposent deux programmes linéaires à variables mixtes pour dimensionner et séquencer la production de l'usine de production de nourriture pour les animaux. (Wolosewicz, 2008) a étudié l'incohérence entre les décisions des problèmes de lotissement au niveau tactique et les décisions des problèmes de séquençement au niveau opérationnel. Elle propose une approche intégrée de planification et d'ordonnancement. Elle résout cette approche selon 3 méthodes de résolution : la recherche tabou, le recuit simulé, et une heuristique d'ordonnancement. Dans le même contexte, (Shemeleva, 2010) a traité le problème de lotissement et de séquençement d'une ligne de production soumise aux aléas.

Notre recherche bibliographique a aussi été menée afin de répondre à une question récurrente, à savoir celle du lien qui existe entre le problème de séquençement des moteurs et celui des véhicules. Plusieurs travaux ont été effectués sur les problèmes de séquençement des véhicules chez PSA Peugeot Citroën. Nous citons par exemple (Bernier, 2000) qui propose une nouvelle politique de gestion appelée « *cadencement reséquençable* ». Il a défini des indicateurs de mesures de la perturbation. Ensuite, il a déterminé le cadencement maximal autorisé en entrée de chaque atelier en fonction de ces perturbations que peut subir le flux. Par ailleurs, les travaux de Muhl (Muhl, 2002) ont permis d'introduire la notion d'ordonnancement global de la production. Etant donné que les ateliers avals ont eux aussi leurs contraintes, l'objectif est de les prendre en compte afin de déterminer le paramétrage de chaque algorithme permettant d'assurer ainsi un optimum global sur le flux véhicule des usines terminales.

La littérature est riche de problèmes de séquençement des véhicules. Dans le cas classique, une séquence de véhicules doit satisfaire la condition de ratio Q/N : dans chaque séquence de N véhicules sur la ligne d'assemblage, au plus Q véhicules doivent être de type difficile (par exemple, nécessitant un toit ouvrant). Cette condition permet d'absorber les options difficiles des véhicules sur la ligne d'assemblage. L'objectif global est de minimiser le nombre de violations de la condition du ratio. Le problème de séquençement des véhicules a fait l'objet du challenge ROADEF'2005 (Solnon et al., 2008).

A l'inverse des ateliers de montage des véhicules qui se caractérisent par la production unitaire, les ateliers de montage des moteurs se caractérisent par la production par lots. Bien qu'une usine de mécanique partage des points communs avec une usine terminale, chacune possède ses propres contraintes industrielles, liées à la nature du produit fabriqué. Nous citons par exemple les contraintes d'insertion, décrites dans le chapitre 2, qui n'existent pas dans les problèmes de séquençement des véhicules. Toutes nos contraintes sont de fortes contraintes qui doivent être respectées, contrairement aux problèmes des véhicules pour lesquels on cherche à minimiser la somme des pénalités de viols des contraintes.

Notre problème d'ordonnancement des lignes de montage des moteurs n'existe pas sous cette forme dans la littérature à notre connaissance. Nous cherchons à ordonner les lignes de montage tout en respectant les contraintes de production. La solution consiste à créer une liste ordonnée de lots de moteurs tout en définissant les tailles des lots.

III.3. Modélisation

Dans cette partie, nous décrivons le modèle proposé pour l'ordonnancement des montages des moteurs. Nous présentons les données du problème, la fonction objectif à optimiser et les contraintes prises en compte. Afin de mieux comprendre notre modèle mathématique, nous commençons par quelques définitions.

III.3.1. Définitions

- *Une référence :*
Chaque type de moteurs est caractérisé par sa référence.
- *Un lot :*
Un lot est une quantité finie de moteurs ayant la même référence à engager sur une ligne de montage. Nous parlons de lot de références.
- *Un film de production :*
Un film de production est une liste ordonnée de lots de références. La figure III-2 présente un exemple d'un film de production de quatre références différentes.

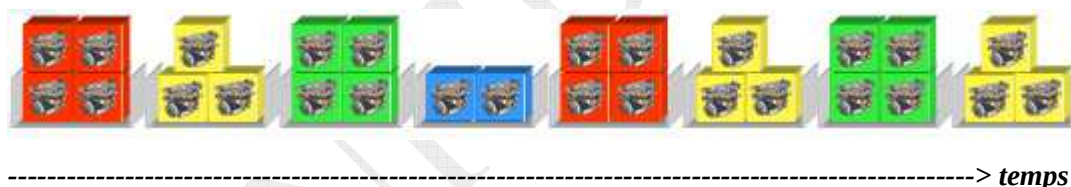


Figure III-2: Film de production

III.3.2. Modèle proposé

Nous cherchons à fournir la liste ordonnée des lots de moteurs à fabriquer sur une ligne de montage. Il s'agit tout d'abord de fractionner le volume total à fabriquer en lots tout en respectant les contraintes de dimensionnement. Le nombre total des lots de références n'est pas donné a priori. Ainsi, nous traitons dans ce chapitre le cas de l'ordonnancement des moteurs avec un nombre total de lots non défini à l'avance. Mais dans cette approche, nous allons définir un nombre maximal qui sera appelé P , correspondant au nombre total de positions. Dans notre modèle, la valeur du nombre total de lots P sera comprise entre une borne inférieure et une borne supérieure, bornes que nous précisons ultérieurement. En particulier, dans le cas où P est fixé à la borne supérieure, les solutions recherchées peuvent

éventuellement contenir des lots vides, par exemple si elles ont un nombre total de lots égal à la borne inférieure. La différence entre le nombre de positions remplies et la valeur P sera formalisée par des positions vides. Les lots vides occupant ces positions seront considérés comme des lots qui violent la contrainte de lot minimum. Pour traiter ce cas, nous ajoutons un moteur fictif $M+1$ qui contiendra tous les lots vides et occupera les dernières positions de la liste ordonnée.

Nous cherchons aussi à séquencer les lots, en respectant les contraintes de séquençement. Le respect de toutes les contraintes est obligatoire. Dans la littérature, plusieurs critères ont été introduits : minimisation du temps de fabrication, minimisation du coût total, minimisation des stocks, etc... Le choix du critère d'optimisation est un aspect délicat que nous avons étudié de manière très approfondie avec le responsable de la production. A ce stade, l'approche retenue est la minimisation du nombre total de lots. Nous adoptons ce critère dans le modèle que nous proposons.

Les données :

M : le nombre de références des moteurs à produire par jour, $j \in \{1, 2, \dots, M\}$.

UC_j : la taille d'Unité de Conditionnement d'un moteur de type j . Elle correspond à la taille d'une palette d'un moteur de type j .

Min_j : la taille minimum d'un lot de moteurs de type j . Elle est multiple de UC_j des moteurs de type j .

Max_j : la taille maximum d'un lot de moteurs de type j . Elle est aussi multiple de UC_j des moteurs de type j .

V_j : le besoin d'un moteur j . C'est la quantité de moteurs de type j à produire par jour.

P : le nombre maximal de lots de références de moteurs par jour. P varie entre deux bornes :

la borne inférieure $\sum_{j=1}^M \frac{V_j}{Max_j}$ et la borne supérieure $\sum_{j=1}^M \frac{V_j}{Min_j}$. P est une donnée définie

manuellement par l'expert en se basant sur les besoins, les bornes inférieures et supérieures.

$S = \{(j_1, j_2), (j_3, j_4), \dots\}$: l'ensemble des couples des références des moteurs qui ne doivent pas se suivre sur la ligne de montage. Par exemple, le moteur de type j_2 ne doit pas suivre le moteur de type j_1 mais le moteur de type j_1 peut suivre le moteur de type j_2 (si nous n'avons pas le couple (j_2, j_1) dans S).

$D = \{(j_1, Dj_1), (j'_1, Dj'_1), \dots\}$: l'ensemble des références de moteurs dont deux lots successifs doivent être séparés par une quantité minimale de moteurs d'autres types. Par exemple, entre deux lots successifs du moteur j_1 , il faut au minimum Dj_1 moteurs d'autres types de moteurs, différents de j_1 .

Les variables de décisions

Nous avons M références de moteurs et nous connaissons leurs volumes respectifs V_j , $j \in \{1, 2, \dots, M\}$. Nous cherchons à former les lots de moteurs et à définir leurs tailles, comprises entre Min_j et Max_j .

Nous définissons deux variables de décisions :

- Les variables binaires U_{jp} définies ainsi :

$$U_{jp} = 1 \text{ si le moteur } j \text{ est en position } p \\ = 0 \text{ autrement}$$

- Les variables entières W_{jp} représentant la taille d'un lot d'un moteur j en position p .

W_{jp} doivent être comprises entre Min_j et Max_j .

D'autres variables sont utiles dans la modélisation de ce problème. Il s'agit de I_{jp} représentant le résultat de la division de la taille d'un lot en position p d'un moteur j par

sa taille d'unité de conditionnement. $I_{jp} = \frac{W_{jp}}{UC_j}$

Fonction Objectif

L'élaboration de l'ordonnancement des lignes de montage des moteurs doit prendre en compte plusieurs contraintes. Nous cherchons à respecter toutes les contraintes. Parmi toutes les solutions qui respectent toutes les contraintes, nous choisissons la solution qui minimise le nombre total de lots de moteurs par jour.

$$\text{Minimiser} \quad \sum_{j=1}^M \sum_{p=1}^P U_{jp} \quad (3.1)$$

Les contraintes

C1- Une position donnée ne peut être attribuée qu'à un seul moteur.

$$\sum_{j=1}^{M+1} U_{jp} = 1 \quad \forall p \in \{1, 2, \dots, P\} \quad (3.2)$$

C2- Nous considérons un moteur fictif qui remplira les lots vides. Les contraintes C2 assurent que les lots de ce moteur fictif occupent les dernières positions. En effet, si un moteur de type j est en position p (c-à-d $U_{jp}=1$) alors nous interdisons que le moteur fictif $M+1$ occupe la position précédente $p-1$. Ainsi, le moteur fictif occupera toujours les positions postérieures à celles du moteur de type j .

$$U_{jp} + U_{M+1, p-1} \leq 1 \quad \forall j \in \{1, 2, \dots, M\} \quad \forall p \in \{2, \dots, P\} \quad (3.3)$$

C3- Afin d'éviter le non respect de la borne supérieure Max_j , ces contraintes imposent la non succession de deux lots d'un même type de moteur.

$$U_{jp} + U_{j, p+1} \leq 1 \quad \forall j \in \{1, 2, \dots, M\} \quad \forall p \in \{1, 2, \dots, P-1\} \quad (3.4)$$

C4- Dans le problème étudié, tous les besoins des clients doivent être satisfaits.

$$V_j = \sum_{p=1}^P W_{jp} \quad \forall j \in \{1, 2, \dots, M\} \quad (3.5)$$

C5- Ces contraintes imposent que la taille d'un lot d'un moteur j soit un multiple de sa taille d'unité de conditionnement

$$W_{jp} - (UC_j * I_{jp}) = 0 \quad \forall j \in \{1, 2, \dots, M+1\} \quad \forall p \in \{1, 2, \dots, P\} \quad (3.6)$$

Chaque type de moteurs est caractérisé par ses bornes inférieures et supérieures. Les contraintes C6 et C7 assurent que la taille de chaque lot d'un moteur soit comprise entre ses deux bornes respectives.

C6- Respect de la contrainte de la taille de lot minimum

$$Min_j * U_{jp} \leq W_{jp} \quad \forall j \in \{1, 2, \dots, M+1\} \quad \forall p \in \{1, 2, \dots, P\} \quad (3.7)$$

C7- Respect de la contrainte de la taille de lot maximum

$$W_{jp} \leq Max_j * U_{jp} \quad \forall j \in \{1, 2, \dots, M+1\} \quad \forall p \in \{1, 2, \dots, P\} \quad (3.8)$$

C8- Respect de la contrainte de non succession pour tous les couples de moteurs appartenant à l'ensemble S .

$$U_{j_1 p} + U_{j_2, p+1} \leq 1 \quad \forall (j_1, j_2) \in S \quad \forall p \in \{1, 2, \dots, P-1\} \quad (3.9)$$

L'inégalité C9 assure le respect de la contrainte d'insertion. Nous rappelons qu'elle est de la forme suivante « entre deux lots de moteurs de type T1, il faut avoir au moins N moteurs de types différents de T1 ». Les contraintes (3.10) sont valables si $U_{j_1 p}=1$ et $U_{j_1, p+\Delta}=1$. Si la contrainte d'insertion concerne le moteur de type j_1 , cette inégalité permet d'avoir au moins

D_{j_1} moteurs de type différent de j_1 entre deux lots consécutifs de j_1 en position p et $p + \Delta$. Nous prenons comme exemple, $(A, 100) \in D$ avec A une référence de moteurs. Si $U_{Ap} = 1$ et $U_{A, p+\Delta} = 1$, il faut au moins 100 moteurs de type différent de A entre deux lots consécutifs de la référence A en position p et $p + \Delta$.

C9- Respect de la contrainte d'insertion

$$\sum_{q=p+1}^{p+\Delta-1} \sum_{j=1 \neq j_1}^M W_{jq} \geq D_{j_1} * (U_{j_1 p} + U_{j_1, p+\Delta} - 1) \\ \forall (j_1, D_{j_1}) \in D \quad \forall p \in \{1, 2, \dots, P\} \quad \forall \Delta \in \{1, 2, \dots, P-p\} \quad (3.10)$$

III.4. Résolution et résultats

Dans cette partie, nous proposons la résolution du modèle mathématique proposé ci-dessus. Il est important que le temps de calcul de la solution ne soit pas trop important afin de valider l'emploi de la méthode, sinon cette dernière serait inexploitable. Pour résoudre ce modèle mathématique, nous avons utilisé IBM ILOG CPLEX OPL studio version 6.3 distribué par la société IBM. C'est un moteur de programmation permettant de résoudre les problèmes d'optimisation combinatoire et d'ordonnancement qui ne peuvent être facilement modélisés et résolus par les méthodes traditionnelles de programmation mathématique. Le solveur CPLEX a été utilisé dans de nombreux domaines, en particulier dans le domaine automobile. Il a été intégré dans deux outils internes de PSA Peugeot Citroën au sein des usines terminales. Il est souvent apprécié pour son efficacité et sa rapidité. Les expérimentations ont été réalisées en utilisant des données réelles des lignes de montage de moteurs de l'usine de mécanique de Trémery de PSA Peugeot Citroën.

Nous choisissons de décrire les résultats d'un cas simple d'une ligne de montage afin de pouvoir illustrer notre approche. Il s'agit d'un cas de 15 moteurs. Le moteur n°16 correspond au moteur fictif. L'ordonnanceur a défini le nombre total maximal des lots par jour à $P = 41$.

Pour ce cas, P est compris entre la borne inférieure $\sum_{j=1}^M \frac{V_j}{Max_j} = 21$ et la borne

supérieure $\sum_{j=1}^M \frac{V_j}{Min_j} = 44$. Le tableau III-1 montre les données du cas d'étude.

Les moteurs n°1, 2, 5, 6, 8, 9 et 15 sont concernés par les contraintes de non succession. Le moteur n°1 ne peut pas être suivi par les moteurs n° 2, 5, 6, 8, 9 et 15 mais il peut suivre chacun d'entre eux. Le moteur n°2 ne peut pas être suivi par les moteurs n° 5, 6, 8, 9 et 15

mais il peut suivre chacun d'entre eux. De même pour les moteurs n° 5, 6, 8, 9 et 15. Ainsi, nous avons $S = \{(1, 2), (1, 5), (1, 6), (1, 8), (1, 9), (1, 15), (2, 5), (2, 6), (2, 8), (2, 9), (2, 15), (5, 6), (5, 8), (5, 9), (5, 15), (6, 8), (6, 9), (6, 15), (8, 9), (8, 15), (9, 15)\}$.

La contrainte d'insertion concerne le moteur n°3 avec au moins 24 moteurs d'autres types entre deux lots du moteur n°3. Ainsi, nous avons $D = \{(3, 24)\}$.

M	V_j	UC_j	Min_j	Max_j
1	60	5	40	80
2	90	6	48	108
3	240	6	24	72
4	48	6	6	72
5	24	6	24	96
6	24	6	24	96
7	24	6	24	48
8	12	6	6	24
9	12	6	6	24
10	120	6	48	96
11	54	6	48	96
12	48	6	48	48
13	48	6	48	96
14	288	6	48	150
15	120	5	40	80
16	0	0	0	0

Tableau III-1: Les données

Le tableau III-3 présente les résultats obtenus manuellement par l'ordonnanceur. Il utilise l'outil existant au sein de l'atelier de montage afin de récupérer les données nécessaires. Le tableau III-2 présente les résultats obtenus avec Cplex pour le modèle que nous proposons. Dans ce cas d'étude, nous trouvons le même nombre total de lots de moteurs par jour. La taille des lots est la même pour la majorité des lots de moteurs. En effet, dans l'exemple traité, pour la plupart des moteurs, les bornes inférieures et supérieures des lots ne permettent que peu de possibilités pour définir le nombre total de lots de chaque type de moteur.

En revanche, ce n'est pas le cas de toutes les données de production des différentes lignes. Effectivement, au sein des ateliers de montage de moteurs de Trémery de PSA Peugeot Citroën, les tailles minimum d'un lot d'une référence de moteurs varient de 5 à 75. Et les tailles maximum d'un lot d'une référence de moteurs varient de 24 à 480 selon le type de moteur et la ligne de montage. Ainsi, selon l'écart entre les bornes inférieures et supérieures d'une référence donnée, il est possible d'obtenir plusieurs solutions du nombre de lots.

L'atelier de montage des moteurs de l'usine de mécanique de Tremery contient quatre lignes d'assemblage et produit en moyenne 6200 moteurs par jour. L'ordonnanceur a besoin de quelques heures pour ordonnancer l'ensemble des lignes de montage. Pour notre cas d'étude, nous avons obtenu, avec notre modèle, une solution optimale au bout de 20 secondes. La rapidité de nos résultats a été bien appréciée par l'ordonnanceur.

Position p	Numéro du moteur j	Taille du lot W_{jp}
1	4	48
2	3	72
3	2	90
4	14	138
5	3	48
6	15	40
7	10	72
8	6	24
9	3	72
10	15	80
11	10	48
12	9	12
13	12	48
14	14	150
15	13	48
16	1	60
17	11	54
18	3	48
19	5	24
20	7	24
21	8	12

Tableau III-2: Les résultats obtenus par Cplex

Position p	Numéro du moteur j	Taille du lot W_{jp}
1	14	150
2	15	80
3	14	138
4	15	40
5	1	60
6	3	72
7	2	90
8	3	72
9	4	48
10	3	72
11	5	24
12	3	24
13	7	24
14	6	24
15	10	96
16	8	12
17	10	24
18	11	54
19	9	12
20	12	48
21	13	48

Tableau III-3: Les résultats obtenus par l'ordonnanceur

Nous observons dans le tableau III-3 que les résultats obtenus ne respectent pas la contrainte du lot minimum du moteur n°10 en position 17. Dans le tableau III-2, nous observons que notre modèle fournit la solution optimale tout en respectant toutes les contraintes. Rappelons que le respect de toutes les contraintes est obligatoire dans notre problématique. Dans le cas d'étude présenté ci-dessus, la contrainte d'insertion concerne seulement un type de moteurs. En réalité, cette contrainte peut être imposée pour plusieurs types de moteurs. Par ailleurs, en fonction du volume V_j et/ou de l'amplitude entre les bornes Min_j et Max_j d'un type de moteur, nous pouvons avoir plusieurs solutions possibles du nombre de lots d'une référence. L'ensemble de ces éléments peut nous mettre face à deux cas possibles. Le premier consiste à avoir plusieurs solutions qui respectent toutes les contraintes. Trouver la solution optimale manuellement devient alors compliqué. Le modèle que nous

proposons résout ce cas de figure en quelques secondes. Le deuxième cas consiste à avoir beaucoup de contraintes, de sorte qu'il n'y a pas de solution qui les respecte toutes. Dans ce cas, trouver la solution optimale manuellement qui viole le moins de contraintes devient aussi très compliqué. En revanche, le modèle proposé ne permet pas, en l'état, de prendre en compte ce cas de figure. Mais, nous aurions pu étendre la méthode pour aborder celui-ci. Malgré l'intérêt, nous n'avons pas poursuivi les expérimentations et les recherches. En effet, il y a eu, en cours de thèse, un changement d'objectifs concernant l'ordonnancement du montage de moteurs qui a amené à faire évoluer le cahier de charge. Nous traitons ces évolutions dans le chapitre suivant.

III.5. Conclusion

Ce chapitre nous a permis de traiter la problématique d'ordonnancement du montage des moteurs. Nous avons tout d'abord présenté un état de l'art sur les problématiques de dimensionnement de lots et d'ordonnancement des véhicules. Ensuite, nous avons décrit notre problématique d'ordonnancement des références des moteurs d'un atelier de montage. Il s'agit d'un problème de dimensionnement et de séquençage des moteurs et plus précisément de l'ordre de fabrication des moteurs en prenant en compte l'ensemble des contraintes industrielles. Nous avons modélisé ce problème par un programme linéaire à variables entières (Winston W.L., 2003). Nous avons expérimenté notre modèle en nous basant sur les données réelles de l'usine de mécanique des moteurs de Trémery de PSA Peugeot Citroën. La rapidité des résultats trouvés constitue un élément clé pour l'exploitation de notre approche.

Le programme linéaire présenté dans ce chapitre a pour objectif de minimiser le nombre total de lots des moteurs par jour. Les contraintes d'ordonnancement sont obligatoires. En revanche, il existe des cas réels où il n'existe pas de solution qui respecte toutes les contraintes. Dans ce cas, notre modèle n'est plus adapté. Un deuxième modèle qui a pour but de chercher la solution la moins mauvaise sera nécessaire. Une approche avec une minimisation des pénalités des viols pourra être un axe de recherche pour de futurs travaux. Nous nous sommes en effet arrêtés à ce niveau en raison d'un changement du cahier des charges. En quoi consiste ce changement ? Quelle est la différence avec la problématique d'ordonnancement avec un nombre total de lots non connu à l'avance ? Quelles sont les objectifs de ce changement ? Etc. Les réponses à toutes ces questions feront l'objet du chapitre suivant.

CONFIDENTIEL

Chapitre IV

Ordonnancement et lissage des moteurs : une approche à deux niveaux

IV.1. Description du problème	67
IV.2. Les deux niveaux de l'ordonnancement	68
IV.3. Le lissage de la production	70
IV.4. Modèle d'ordonnancement des familles des moteurs	70
IV.4.1. Présentation des deux approches	71
IV.4.2. Première approche : prise en compte en pré- et post-traitement des lots non complets	72
IV.4.2.1. Modèle 1 strict - recherche d'une solution optimale	73
IV.4.2.2. Expérimentations et résultats du modèle 1 strict	76
IV.4.2.3. Modèle 2 relaxé - cas où il n'y a pas de solution optimale	78
IV.4.2.4. Expérimentations et résultats du modèle 2 relaxé	80
IV.4.3. Deuxième approche : prise en compte dans le programme linéaire des lots non complets	82
IV.4.3.1. Modèle 3 strict - recherche d'une solution optimale	82
IV.4.3.2. Expérimentations et résultats du modèle 3 strict	86
IV.4.3.3. Modèle 4 relaxé - cas où il n'y a pas de solution optimale	88
IV.4.3.4. Expérimentations et résultats du modèle 4 relaxé	89
IV.4.4. Comparaison des tests entre les deux approches	91
IV.5. Modèle de lissage des références des moteurs	93
IV.5.1. Modélisation	93
IV.5.2. Expérimentations et résultats	97
IV.6. Conclusion	98

Comme nous l'avons déjà souligné, dans le cadre de la performance industrielle, toutes les entreprises cherchent à devenir des références en efficacité opérationnelle. Les constructeurs du secteur automobile ont toujours été à l'avant garde du déploiement de concepts de production. PSA Peugeot Citroën, comme d'autres concurrents, s'est engagé dans une démarche de déploiement du concept du Lean Manufacturing directement inspiré du Toyota Production System.

Un des leviers de l'efficacité du fonctionnement des usines de mécaniques de moteurs est la mise en place du lissage de la production. Celui-ci permet d'équilibrer les tâches en évitant les surcharges de production temporaires. Il fournit, par ailleurs, une production équilibrée et stable qui aide à obtenir une meilleure satisfaction de la demande du client. Il est ainsi la clé de l'augmentation de la productivité et de la maximisation de l'utilisation des moyens.

Nous ajoutons donc dans ce chapitre la prise en compte du lissage dans notre problématique d'ordonnancement des moteurs sur une ligne de montage. Pour ce faire, nous allons considérer deux niveaux : niveau familles et niveau références. Nous commençons par décrire notre nouvelle problématique. La présentation des deux niveaux considérés de l'ordonnancement, à la famille et à la référence, nous permettra de comprendre l'évolution du cahier des charges mentionnée dans le chapitre précédent. Une famille de moteurs représente un ensemble de références de moteurs qui ont les mêmes critères de regroupement. Ces critères sont à définir par les responsables de la logistique et de la fabrication. Ils pourront provenir des contraintes du processus, des contraintes d'approvisionnement ou des contraintes de transport. Une référence ne peut appartenir qu'à une seule famille.

Avant d'aborder la modélisation de notre problématique, nous définissons la notion de lissage de la production. Ensuite, nous exposons deux approches afin de modéliser l'ordonnancement et le lissage des familles des moteurs. Les deux approches sont basées sur une modélisation mathématique par programmation linéaire. Dans la première approche, une position peut être attribuée à plusieurs lots ayant une taille fixée à l'avance. Par contre, dans la deuxième approche, une position ne peut être attribuée qu'à un seul lot de taille fixée à l'avance. Nous précisons ceci ultérieurement. Par ailleurs, la première approche se base sur une gestion de lots non complets en pré traitement et en post-traitement. Un lot non complet est un lot qui a une taille inférieure ou supérieure à la taille du lot définie. La solution recherchée pourra contenir un lot non complet dans le cas où le besoin n'est pas un multiple

de la taille de lot définie. La deuxième approche se base sur une gestion de lots non complets directement dans le programme linéaire. Nous expliquons en détails la différence entre les deux approches dans la section IV.4.1. Nous traitons ensuite notre problème au niveau des références et nous proposons une heuristique de lissage du montage des références des moteurs. Nous expérimentons les modèles proposés sur des données réelles de l'usine de montage de moteurs de Trémery et nous analysons les résultats obtenus.

IV.1. Description du problème

Dans le contexte industriel actuel, l'offre est largement excédentaire par rapport à la demande et, par conséquent, la clientèle est de plus en plus exigeante. Ceci implique pour l'entreprise des efforts spécifiques dans la maîtrise des coûts, des délais de livraison, face aux évolutions de plus en plus rapides de la demande et à l'émergence de nouvelles technologies. La réduction des coûts est un axe stratégique dans la gestion d'une entreprise. En particulier, la diminution des coûts de stockage permet de préserver la trésorerie des usines de production. Les usines de mécanique de PSA Peugeot Citroën se distinguent par trois types de stocks : les stocks de Pièces d'Origine Extérieure (stocks des POE), les stocks des Pièces d'Origine Intérieure (stocks des POI) et les stocks de produits finis. Ces stocks permettent d'absorber les variabilités de la demande et d'assurer la robustesse par rapport à des indisponibilités de ressources de production. En revanche, ces stocks nécessitent l'utilisation d'importantes surfaces. Ils nécessitent aussi une immobilisation de moyens financiers importants (ils peuvent représenter 25 à 30 % du capital immobilisé). Vu l'investissement considérable et improductif que constituent les stocks, il est impératif, pour les usines de mécaniques de PSA Peugeot Citroën, de tenter de les minimiser.

Dans cette perspective, l'usine de mécanique des moteurs a adopté l'application du lissage de la production. Rappelons que l'usine de mécanique des moteurs est composée d'ateliers d'usinage des POI et d'ateliers de montage. Le lissage de l'engagement des ateliers d'usinage permet la réduction des stocks des POI. Il s'agit d'un lissage par mixage de familles de moteurs afin d'éviter la rupture de stocks. Par ailleurs, la répartition des besoins des moteurs sur la journée permet de diminuer les encours en bord de ligne par type de POI et de POE.

Dans le chapitre précédent, nous avons étudié la problématique de l'ordonnancement des moteurs en respectant les contraintes de la production au niveau des références seulement.

Dans ce chapitre, nous étudions notre problématique tout en respectant les contraintes et en assurant le lissage de la production sur les deux niveaux (familles et références). La démarche dans laquelle s'inscrivent nos travaux est de proposer une méthode permettant une séquence de lots de familles, chacun des lots étant lui-même une séquence de références comme indiqué dans la figure IV-1. Il s'agit de respecter l'ensemble des contraintes de production et de lisser au mieux la production des familles et des références tout au long de la journée. Notons que la démarche est de trouver dans un premier temps une séquence qui satisfait toutes les contraintes de production puis dans un second temps de satisfaire au mieux le lissage.

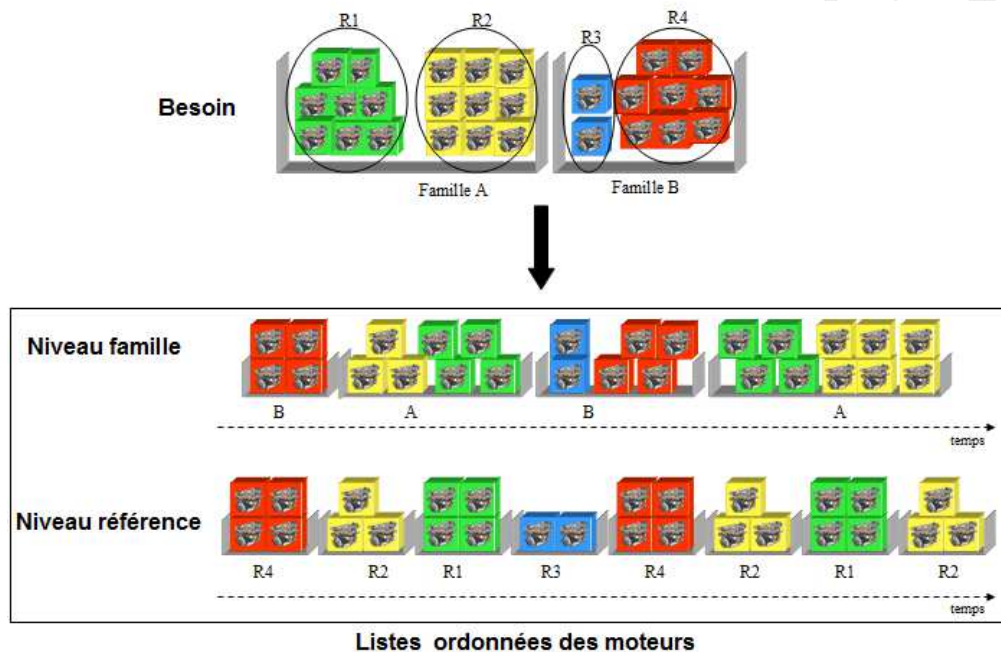


Figure IV-1: Les listes d'ordonnancement du montage de moteurs au niveau des familles et des références de moteurs

IV.2. Les deux niveaux de l'ordonnancement

Comme nous l'avons présenté dans le chapitre précédent, les références des moteurs sont regroupées en famille selon des critères bien identifiés. Suite à l'évolution du cahier des charges, nous étudions maintenant l'ordonnancement des moteurs sur deux niveaux : l'ordonnancement des familles de moteurs et l'ordonnancement des références à l'intérieur de chacune des familles. Les contraintes de production des moteurs sont toujours celles présentées dans le chapitre 2, à savoir : les contraintes de la taille d'UC, de non succession, d'insertion, de la taille de lot minimum et maximum (II.3.3.).

Les contraintes de la taille d'UC et de la taille de lot minimum concernent les références des moteurs. Elles ont pour objectif de minimiser les changements d'approvisionnement au bord de ligne.

Chaque famille est caractérisée par sa taille minimum de lot notée $TailleF$. $TailleF$ est une donnée multiple de la taille d'UC. Un lot de taille égale à $TailleF$ est appelé un lot élémentaire. Dans notre problématique, nous tenons compte d'une nouvelle contrainte sur la taille des lots d'une famille. Elle est sous la forme : la taille d'un lot d'une famille donnée doit être égale à $TailleF$ ou à un multiple de $TailleF$. C'est à dire qu'un lot d'une famille doit être composé d'un lot élémentaire ou de plusieurs lots élémentaires.

Les contraintes de non succession concernent les familles des moteurs. Elles consistent à interdire la succession de deux lots de deux familles de moteurs. Elles permettent de répartir le temps de charge des opérateurs de fabrication et de logistique. Les contraintes d'insertion concernent aussi les familles des moteurs et s'appliquent sur les lots élémentaires. Elles permettent de respecter les temps de montages particuliers de certaines familles de moteurs. Appliquer les contraintes de non succession et d'insertion au niveau des familles de moteurs permettra de faciliter l'engagement des ateliers des moteurs en amont et de réduire le stock entre les ateliers d'usinage et de montage.

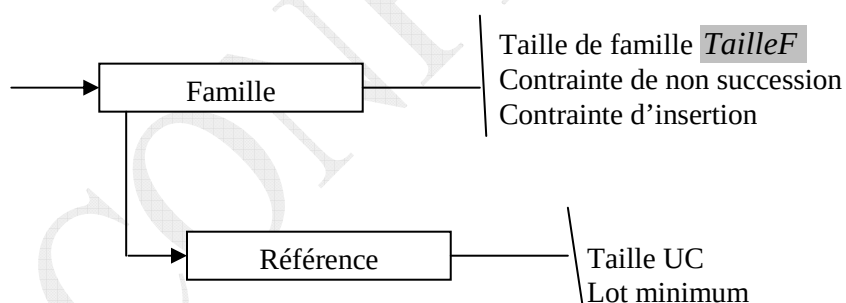


Figure IV-2: Les contraintes de production au niveau des familles et des références de moteurs

Enfin, les contraintes de la taille de lot maximum n'ont plus d'utilité, étant donné que nous cherchons à lisser au mieux la production. Elles ont donc été supprimées. La figure IV-2 présente un récapitulatif des contraintes de production au niveau des familles et des références des moteurs.

IV.3. Le lissage de la production

Le lissage est une technique fondamentale du Lean Manufacturing (Twohey, 2011) visant à amortir les variations de la demande commerciale. Cette technique est très utile quand les variations de la demande sont irrégulières et imprévisibles ou quand les produits sont coûteux à stocker ou à fabriquer. Il s'agit de produire en petit lots tout en les répartissant au long de la journée. Sugimori présente le lissage de la production dans le système de production de Toyota (Sugimori, 2007). Le lissage se base sur l'étalement des commandes par mixage des produits et la répartition des volumes dans un horizon de temps donné (une semaine, par exemple). La figure IV-3 présente un exemple de lissage d'une production.

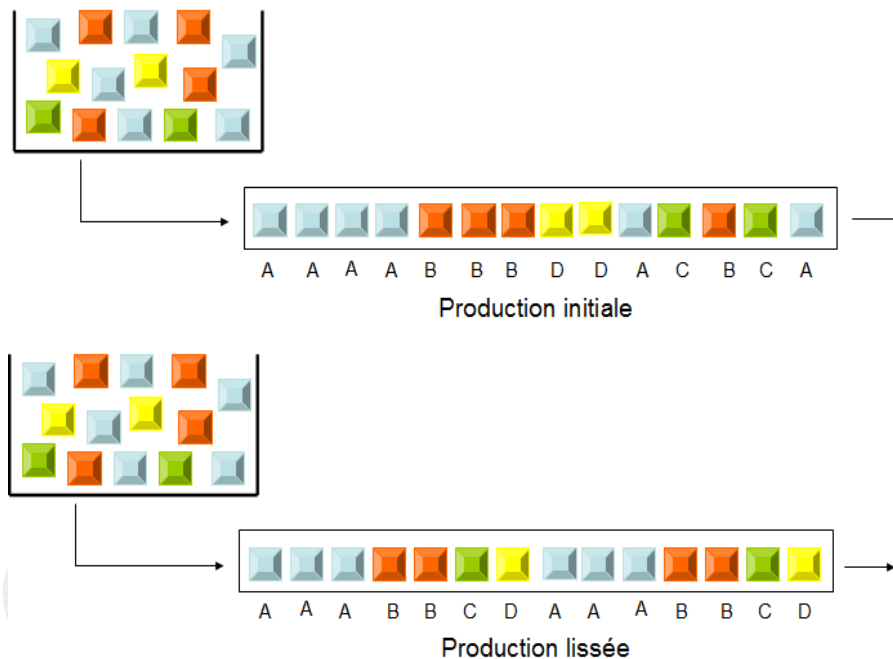


Figure IV-3: Le lissage de la production

IV.4. Modèle d'ordonnancement des familles des moteurs

Nous commençons par l'étude de l'ordonnancement des montages des moteurs au niveau des familles. Le respect de toutes les contraintes est a priori obligatoire, mais il est tout à fait possible d'avoir des cas où il n'existe pas de solution respectant toutes ces contraintes. Ceci peut être dû au faible niveau des volumes à produire, ce qui les rend impossible à répartir tout en respectant toutes les contraintes. Par exemple, si le volume à produire d'une famille est

inférieur à $TailleF$, la contrainte de la taille d'un lot de famille sera bien sûr violée. Il est primordial de proposer un modèle qui fournit des solutions dans tous les cas. Nous proposons deux approches différentes que nous comparons dans le paragraphe suivant. Dans la première approche, nous présentons deux modèles appelés : modèle 1 strict et modèle 2 relaxé. Dans la deuxième approche, nous présentons aussi deux modèles appelés : modèle 3 strict et modèle 4 relaxé. Les modèles 1 strict et 3 strict correspondent au cas où nous cherchons la solution optimale, respectant toutes les contraintes. Dans le cas où aucune solution respectant toutes les contraintes ne peut être trouvée, nous proposons les modèles 2 relaxé et 4 relaxé où nous cherchons à trouver la solution « la moins mauvaise ».

IV.4.1. Présentation des deux approches

Les deux approches proposées ont le même but, celui d'ordonnancer et lisser le montage des familles de moteurs. Elles sont basées sur une modélisation mathématique par programmation linéaire. Par contre, elles diffèrent en deux points principaux.

Le premier point concerne la notion de positions. Dans la première approche, une position est occupée par un ou plusieurs lots élémentaires d'une famille donnée. Sachant que nous fixons un nombre maximal de positions, nous utilisons une famille fictive qui contiendra les positions vides. Dans la deuxième approche, une position est occupée par un seul lot élémentaire (ou non complet). Plusieurs positions successives peuvent être occupées par la même famille en formant ainsi un lot. La figure IV-4 montre clairement ce premier point de différence. En effet, dans la première approche, la première position est attribuée au premier lot de la famille A. Ce dernier contient deux lots élémentaires de la famille A. Sachant que la taille $TailleF$ de la famille A est égale à 4, son premier lot a donc une taille égale à 8. Dans la deuxième approche, la première position est attribuée au premier lot élémentaire de la famille A avec une taille égale à $TailleF$ (égal à 4). Et la deuxième position est attribuée au deuxième lot élémentaire de la famille A, également avec une taille égale à 4. Dans cette 2^{ème} approche, le nombre de positions est donc bien sûr connu a priori.

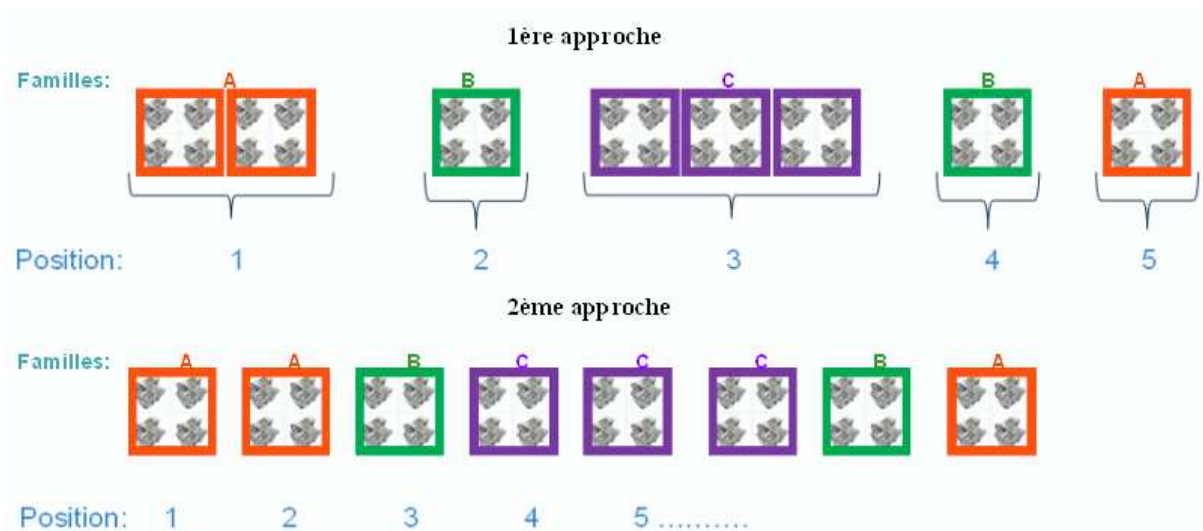


Figure IV-4: Comparaison des deux approches

Le deuxième point concerne la gestion d'éventuels lots incomplets. En effet, les volumes des familles de moteurs F_i ne sont pas toujours des multiples de leurs tailles $TailleF_i$. Dans la première approche, nous avons considéré néanmoins que les tailles des lots sont des multiples de $TailleF_i$ et nous redéfinissons la vraie valeur des lots incomplets en post-traitement. Dans la deuxième approche, nous traitons et calculons les éventuels lots incomplets au sein du programme linéaire lui même.

IV.4.2. Première approche : prise en compte en pré- et post-traitement des lots non complets

Cette approche est inspirée du modèle proposé dans le chapitre 3. Il s'agit d'un problème de séquençement et de lissage de la production. Nous cherchons à définir une liste ordonnée de lots de familles de moteurs à fabriquer sur une ligne de montage, tout en respectant les contraintes au niveau des familles et en assurant un lissage de la production tout au long de la journée. Nous avons F familles de moteurs et nous connaissons leurs volumes respectifs $VolumeF_i$ avec $i \in \{1, 2, \dots, F\}$. Nous connaissons la taille des lots élémentaires des familles des moteurs. Rappelons que chaque référence est caractérisée par sa taille d'UC. De même, chaque famille F est caractérisée par sa taille de famille, appelée $TailleF$, qui est un multiple d'UC. Un lot d'une famille de moteurs peut être composé de plusieurs lots élémentaires successifs et sa taille est un multiple de $TailleF$. Nous ignorons le nombre total de lots. Comme dans le chapitre 3, nous ajoutons une famille de moteurs fictive. Elle aura tous les lots

vides et occupera les dernières positions de la liste ordonnée. Dans cette approche, les calculs de certaines données nécessaires pour notre modèle seront effectués en prétraitement.

IV.4.2.1. Modèle 1 strict- recherche d'une solution optimale

Dans ce modèle, le respect de toutes les contraintes est obligatoire et nous cherchons à trouver un lissage optimal de la production.

Les données :

F : le nombre total de familles de moteurs à produire par jour. $i \in \{1, 2, \dots, F\}$

$VolumeF_i$: le besoin d'une famille de moteurs i par jour.

$TailleF_i$: la taille d'un lot élémentaire d'une famille i .

X_i : le nombre de lots élémentaires d'une famille de moteurs i à produire par jour. X_i est égal à $VolumeF_i$ divisé par $TailleF_i$. Les valeurs de X_i sont calculées en prétraitement. Sachant que $VolumeF_i$ n'est pas toujours un multiple de $TailleF_i$, le dernier lot élémentaire sera inférieur ou supérieur à $TailleF_i$, il s'agit du lot non complet. Il sera calculé en post traitement. Dans le programme linéaire, nous le considérons comme lot complet égal à $TailleF_i$.

Si $VolumeF_i$ n'est pas un multiple de $TailleF_i$, nous avons distingué deux cas : si le reste de la division est inférieur ou égal à 25% de la $TailleF_i$ alors $X_i = \left\lfloor \frac{VolumeF_i}{TailleF_i} \right\rfloor$ et la taille du lot non complet sera en post traitement supérieure à $TailleF_i$. Par exemple, si $VolumeF_i = 13$ et $TailleF_i = 6$ alors $X_i = 2$ car le reste de la division de $\frac{13}{6}$ est égal à 1 qui est inférieur à 25% de la $TailleF_i$. Nous considérons tout d'abord deux lots élémentaires de taille 6 chacune. Puis, dans la phase de post-traitement, le deuxième lot élémentaire sera de taille 7. Dans le cas contraire, $X_i = \left\lceil \frac{VolumeF_i}{TailleF_i} \right\rceil$ et la taille du lot non complet sera en post-traitement inférieure à $TailleF_i$. Par exemple, si $VolumeF_i = 16$ et $TailleF_i = 6$ alors $X_i = 3$ car le reste de la division de $\frac{16}{6}$ est égal à 4 qui est supérieur à 25% de la $TailleF_i$. Nous considérons alors trois lots

élémentaires de taille 6 chacune. Puis, dans la phase de post-traitement, le troisième lot élémentaire sera de taille 4.

P : le nombre total de lots élémentaires des familles des moteurs par jour. $P = \sum_{i=1}^F X_i$.

$S = \{(i_1, i_2), (i_3, i_4), \dots\}$: l'ensemble des couples des familles des moteurs qui ne doivent pas se suivre sur la ligne de montage. Par exemple, la famille i_2 ne doit pas suivre la famille i_1 .

$D = \{(i_1, Di_1), (i_1', Di_1'), \dots\}$: l'ensemble des familles des moteurs qui doivent respecter la contrainte d'insertion. Par exemple, entre deux lots élémentaires de la famille i_1 , il faut au minimum Di_1 moteurs d'autres familles, différentes de i_1 .

Les variables de décision :

Nous définissons trois variables de décision, pour chaque famille i et position p :

- La variable binaire U_{ip} définie ainsi :

$$U_{ip} = 1 \text{ si la famille } i \text{ est en position } p$$

$$= 0 \text{ autrement}$$
- La variable entière W_{ip} représente le nombre de lots élémentaires d'une famille de moteur i en position p . W_{ip} est le nombre de lots élémentaires à produire et non pas le nombre de moteurs à produire.
- La variable $MaxF_i$: le plus grand nombre de lots élémentaires successifs d'un lot de la famille i dans une position donnée.

Fonction Objectif

Dans la perspective d'avoir un lissage de la production, le but est de minimiser le plus grand nombre de lots élémentaires successifs d'un lot d'une famille dans une position donnée afin d'étaler les lots élémentaires tout au long de la journée.

$$\text{Minimiser } \sum_{i=1}^F MaxF_i \quad (4.1)$$

Les contraintes

C1- Cette contrainte nous permet de calculer, dans une position donnée, le plus grand nombre de lots élémentaires de chaque lot de famille i

$$MaxF_i \geq W_{ip} \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, F\} \quad \forall p \in \{1, 2, \dots, P\} \quad (4.2)$$

C2- Nous considérons qu'une position donnée ne peut être attribuée qu'à un seul lot de famille de moteurs.

$$\sum_{i=1}^{F+1} U_{ip} = 1 \quad \forall p \in \{1, 2, \dots, P\} \quad (4.3)$$

C3- Afin de respecter le lissage, ces contraintes permettent la non succession de deux lots d'une même famille de moteurs.

$$U_{ip} + U_{i,p+1} \leq 1 \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, F\} \quad \forall p \in \{1, 2, \dots, P-1\} \quad (4.4)$$

C4- Nous considérons que les lots vides sont occupés par une famille fictive. Les contraintes C4 assurent que les lots de cette famille fictive occupent les dernières positions. En effet, si une famille de moteurs de type i est en position p (c-à-d $U_{ip} = 1$) alors nous interdisons que la famille de moteurs fictive $F+1$ occupe la position précédente, $p-1$. Ainsi, la famille de moteurs fictive occupera toujours une position postérieure à celles de la famille de moteurs de type i .

$$U_{ip} + U_{F+1, p-1} \leq 1 \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, F\} \quad \forall p \in \{2, \dots, P\} \quad (4.5)$$

C5- Si un lot d'une famille i n'est pas dans une position p , alors sa taille doit être nulle. Sinon elle doit être positive ; c.-à-d. si $U_{ip} = 0$ alors $W_{ip} = 0$

$$W_{ip} < 999 * U_{ip} \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, F+1\} \quad \forall p \in \{1, 2, \dots, P\} \quad (4.6)$$

C6- Si un lot d'une famille i est dans une position p , alors sa taille doit être au moins égale à $TailleF_i$, c-à-d si $U_{ip} = 1$ alors $W_{ip} \geq 1$

$$W_{ip} - (1 * U_{ip}) \geq 0 \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, F\} \quad \forall p \in \{1, 2, \dots, P\} \quad (4.7)$$

C7- Dans le problème étudié, tous les besoins des clients doivent être satisfaits.

$$X_i = \sum_{p=1}^P W_{ip} \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, F+1\} \quad (4.8)$$

C8- Respect de la contrainte de non succession pour tous les couples de famille de moteurs appartenant à l'ensemble S .

$$U_{i_1 p} + U_{i_2, p+1} \leq 1 \quad \forall (i_1, i_2) \in S \quad \forall p \in \{1, 2, \dots, P-1\} \quad (4.9)$$

L'inégalité (4.10) assure le respect de la contrainte d'insertion. Elle est du même principe que l'inégalité (3.10) présentée dans le chapitre 3. En effet, D_{i_1} est le nombre minimum de moteurs à respecter entre deux lots de famille i_1 , $(W_{i_{p+1}} * TailleF_i)$ correspond au nombre de moteurs dans un lot de famille i en position $p+1$.

C9- Respect de la contrainte d'insertion

$$\sum_{q=p+1}^{p+\Delta-1} \sum_{i=1 \neq i_1}^F (W_{iq} * TailleF_i) \geq D_{i_1} * (U_{i_p} + U_{i_{p+\Delta}} - 1) \quad \forall (i_1, D_{i_1}) \in D \quad \forall p \in \{1, 2, \dots, P\} \quad \forall \Delta \in \{1, 2, \dots, P-p\} \quad (4.10)$$

C10- Nous imposons que le nombre de lots élémentaires d'une famille dans une position donnée, ayant une contrainte d'insertion, doit être égal à 1. Si W_{i_p} est supérieure à 1, il y aura deux lots élémentaires ou plus de la famille i en position p . Ainsi, nous aurions dans la position p deux lots élémentaires successifs ou plus et la contrainte d'insertion serait violée pour la famille i . L'inégalité (4.11) assure donc le respect de la contrainte d'insertion en imposant d'avoir un seul lot élémentaire d'une famille ayant une contrainte d'insertion dans une position donnée.

$$W_{i_p} \leq U_{i_p} \quad \forall i \in D \quad \forall p \in \{1, 2, \dots, P\} \quad (4.11)$$

IV.4.2.2. Expérimentations et résultats du modèle 1 strict

Familles F	Besoins $VolumeF_i$	Tailles des lots élémentaires $TailleF_i$	Nombre de lots élémentaires à produire X_i	Nombre de moteurs d'insertion D_i
A	342	90	4	0
B	192	60	3	0
C	330	72	5	80
D	12	36	1	24
E	72	36	2	0
F	12	24	1	24
G	110	50	2	24
H	0	30	0	24
I	48	60	1	24
J	198	72	3	80

Tableau IV-1: Données des familles des moteurs – cas avec 10 familles (1^{ère} approche)

Les données des familles utilisées dans la résolution du modèle 1 strict sont illustrées dans le tableau IV-1. Elles représentent une journée de travail sur une ligne de montage de l'usine de mécanique des moteurs de Trémery.

Le nombre total de lots élémentaires de familles à ordonner est $P = \sum_{i=1}^F X_i = 22$.

L'ensemble des contraintes de non succession est $S = \{(F, C), (C, F), (G, C), (G, J), (J, F)\}$.

L'ensemble des contraintes d'insertion est $D = \{(C, 80), (D, 24), (F, 24), (G, 24), (H, 24), (I, 24), (J, 80)\}$

La résolution du cas réel avec Cplex est obtenue après 10 secondes de calcul avec une fonction objectif $\sum_{i=1}^F MaxF_i$ égale à 9 correspondant à la solution optimale. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau IV-2.

Position	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Liste familles	C	A	C	A	C	A	C	A	C	B	J	B	G	B	J	G	E
W_{ip}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Position	18	19	20	21	22
Liste familles	J	E	D	F	I
W_{ip}	1	1	1	1	1

Tableau IV-2: Liste ordonnée des familles des moteurs – cas avec 10 familles (1^{ère} approche)

Nous constatons que nous avons obtenu une solution qui respecte toutes les contraintes de non succession. Comme nous l'avons mentionné, les volumes des familles ne sont pas toujours des multiples de leurs tailles de conditionnement $TailleF_i$. En effet, le tableau IV-1 montre que nous avons besoin de 342 moteurs de la famille A. La taille $TailleF_A$ est égale à 90. Avec la première approche présentée dans cette section, nous traitons les lots non complets (les lots qui ont une taille inférieure ou supérieure à $TailleF_i$) en pré traitement et en post-traitement. Le modèle linéaire donne 4 lots a priori complets et donc contenant 90 moteurs chacun. Le tableau IV.1 présente une valeur de X_A égale à 4. La phase de post-traitement des résultats intermédiaires sert à recalculer le lot non complet, s'il existe. Dans ce

cas, nous prenons le lot placé à la dernière position comme lot non complet. Ainsi, la taille du lot de la famille A en position 8 sera égal à 72 seulement, au lieu de 90 comme indiqué dans le tableau IV-3. De même le lot de la famille C en position 9 sera de taille 42 au lieu de 72, le lot de la famille B en position 14 sera de taille 72 au lieu de 60, et le lot de la famille J en position 18 sera de taille 54 au lieu de 72. Avoir des besoins de familles non multiples de leurs $TailleF_i$ est loin d'être exceptionnel. Toutes les familles sont en effet concernées dans cet exemple, à l'exception de la famille E. Notre modèle linéaire trouve une solution qui respecte a priori toutes les contraintes d'insertion pour toutes les familles. Néanmoins, lors de la phase de post-traitement, nous avons recalculé le lot non complet de la famille A, qui est positionné entre deux lots de la famille C. La solution finale ainsi trouvée ne respecte finalement pas la contrainte d'insertion pour la famille C.

L'inconvénient de notre première approche est donc d'avoir un risque de ne pas respecter la contrainte d'insertion à cause des lots non complets traités en post-traitement, risque que nous éliminerons avec la deuxième approche.

Position	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Liste familles	C	A	C	A	C	A	C	A	C	B	J	B	G	B	J	G	E
Nombre de moteurs	72	90	72	90	72	90	72	72	42	60	72	60	50	72	72	60	36

Position	18	19	20	21	22
Liste familles	J	E	D	F	I
Nombre de moteurs	54	36	12	12	48

Tableau IV-3: Résultats de la phase post-traitement – cas avec 10 familles (1^{ère} approche)

IV.4.2.3. Modèle 2 relaxé- cas où il n'y a pas de solution optimale

Nous aurons besoin d'utiliser le modèle 2 relaxé dans le cas où le modèle 1 strict ne trouve aucune solution qui satisfait toutes les contraintes. Ainsi, il est nécessaire de relâcher une des contraintes ou de devenir moins exigeant au niveau du lissage de la production. Plusieurs alternatives se présentent : devenir moins exigeant au niveau du lissage, en autorisant la succession des lots élémentaires des familles ayant une contrainte d'insertion et/ou violer une des contraintes d'ordonnancement. Dans ce cas, quelle contrainte

accepterons-nous de violer en premier ? Nous avons étudié ces alternatives et nous les avons classées par priorité. Rappelons que nous cherchons à respecter en premier les contraintes de production et par la suite à lisser la production. Dans le cas où le modèle 1 strict ne trouve pas de solution, nous acceptons, premièrement, de dégrader le lissage en autorisant la succession des lots élémentaires des familles ayant une contrainte d'insertion. Ainsi, nous autorisons le viol éventuel de la contrainte d'insertion et en dernier recours, nous violons la contrainte de non succession, tout en minimisant le nombre de viols.

Nous rappelons que les contraintes d'insertion sont de la forme « entre deux lots élémentaires d'une famille de moteurs de type i_1 , il faut avoir au moins Di_1 moteurs de familles de types différents de i_1 ». Dans le cas où ces contraintes doivent être violées, nous avons deux possibilités :

- 1- chercher à garder un volume maximum entre deux lots élémentaires de type i_1 , qui sera inférieur à Di_1
- 2- respecter obligatoirement, entre deux lots élémentaires de type i_1 , un volume supérieur ou égal à Di_1 et, dans le cas où il n'est pas possible de le respecter, prendre un volume nul.

Nous adoptons dans notre deuxième modèle, appelé modèle 2 relaxé, la deuxième possibilité, suite aux retours d'expérience des utilisateurs. Ainsi, la violation de la contrainte d'insertion est possible uniquement lorsque nous autorisons la succession de deux lots élémentaires dans la même position.

Le modèle 2 relaxé, est basé sur le modèle 1 strict présenté ci-dessus. Nous adoptons les mêmes données et les mêmes variables de décision. Nous rajoutons la variable binaire de décision $P_{nonsucc_p}$.

$P_{nonsucc_p}$ correspond au nombre de viols de la contrainte de non succession.

Nous modifions la fonction objectif comme suit :

$$\text{Minimiser } \sum_{i=1}^F MaxF_i + \alpha * \sum_{p=1}^P P_{nonsucc_p} \quad (4.12)$$

Le but est de minimiser le nombre de lots élémentaires successifs de chaque lot de famille de moteurs dans une position donnée mais aussi le nombre de viols des contraintes de non succession. Le poids α sert à pondérer la violation de la contrainte de non succession par rapport au lissage.

Nous modifions aussi les contraintes C8 comme suit :

$$\text{C8.1-} \quad U_{i_1 p} + U_{i_2 p+1} - P_{\text{nonsucc}_{p+1}} \leq 1$$

$$\forall (i_1, i_2) \in S \quad \forall p \in \{1, 2, \dots, P-1\} \quad (4.13)$$

Cette inégalité cherche à respecter la contrainte de non succession (si nous arrivons à avoir $P_{\text{nonsucc}_p} = 0$). Lorsque ceci n'est pas possible, P_{nonsucc_p} est égale à 1 et la contrainte est donc relâchée.

Enfin, nous supprimons les contraintes C10 du modèle 1 strict. Ceci nous autorise à dégrader le lissage des lots des familles ayant une contrainte d'insertion. Ainsi, nous acceptons d'avoir plus d'un lot élémentaire de cette famille dans une position donnée. Par conséquent, ceci nous autorise la violation éventuelle de la contrainte d'insertion en adoptant la deuxième possibilité présentée ci-avant.

IV.4.2.4. Expérimentations et résultats du modèle 2 relaxé

Les données des familles utilisées dans la résolution du modèle 2 relaxé sont illustrées dans le tableau IV-4. Elles sont inspirées d'une journée de travail sur une ligne de montage de l'usine de mécanique des moteurs de Trémery.

Le nombre total de lots élémentaires de familles à ordonner est $P = \sum_{i=1}^F X_i = 31$.

L'ensemble des contraintes de non succession est $S = \{(F, C), (C, F), (C, G)\}$.

L'ensemble des contraintes d'insertion est $D = \{(C, 80)\}$.

Familles F	Besoins $\text{Volume} F_i$	Tailles des lots élémentaires $\text{Taille} F_i$	Nombre de lots élémentaires à produire X_i	Nombre de moteurs d'insertion D_i
A	360	90	4	0
B	192	60	3	0
C	608	42	15	80
D	12	12	1	0
E	60	36	2	0
F	6	6	1	0
G	110	30	4	0
H	3	3	1	0

Tableau IV-4: Données des familles des moteurs – cas avec 8 familles (1^{ère} approche)

La résolution de cet exemple avec Cplex est obtenue après 33 secondes de calcul avec une fonction objectif $\sum_{i=1}^F MaxF_i + \alpha * \sum_{p=1}^P P_{nonsucc_p}$ égale à 9. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau IV-5.

Position	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Liste familles	D	C	A	C	A	C	B	F	G	C	A	C	A	C	E	B	G
W_{ip}	1	2	1	2	1	2	1	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1

Position	18	19	20	21	22	23	24
Liste familles	C	B	G	C	H	G	E
W_{ip}	2	1	1	2	1	1	1

Tableau IV-5: Liste ordonnée des familles des moteurs – cas avec 8 familles (1^{ère} approche)

Nous constatons que nous avons obtenu une solution qui respecte toutes les contraintes de non succession. Mais ce n'est pas le cas pour le respect des contraintes d'insertion qui concernent la famille C. En effet, le tableau IV-5 présente la violation de la contrainte d'insertion de la famille C dans les positions suivantes : 2, 4, 6, 10, 12, 18 et 21, nous comptons donc 7 violations. Il n'existe pas de solution qui respecte toutes les contraintes pour ce cas. Le tableau IV-6 présente le nombre de moteurs de chaque lot des familles, calculé en post-traitement.

Position	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Liste familles	D	C	A	C	A	C	B	F	G	C	A	C	A	C	E	B	G
Nombre de moteurs	12	84	90	84	90	84	60	6	30	84	90	84	90	42	36	60	30

Position	18	19	20	21	22	23	24
Liste familles	C	B	G	C	H	G	E
Nombre de moteurs	84	72	30	62	3	20	24

Tableau IV-6: Résultats de la phase post-traitement – cas avec 8 familles (1^{ère} approche)

IV.4.3. Deuxième approche : prise en compte dans le programme linéaire des lots non complets

Nous proposons une deuxième approche afin de résoudre notre problématique d'ordonnancement des familles des moteurs sur une ligne de montage. Cette approche est aussi basée sur la programmation linéaire. De même que pour la première approche, nous présentons deux modèles : un premier modèle pour lequel le respect des contraintes est strictement obligatoire, et un deuxième modèle qui sera lancé dans le cas où le premier modèle ne trouve aucune solution. Il permet de trouver la solution la moins mauvaise en acceptant de violer des contraintes, mais le moins possible.

Nous avons F familles de moteurs et nous connaissons leurs volumes respectifs, $VolumeF_i$ avec $i \in \{1, 2, \dots, F\}$. Nous connaissons les tailles des lots élémentaires des familles des moteurs, $TailleF_i$. Comme nous l'avons mentionné dans la première approche, les volumes des familles de moteurs ne sont pas toujours des multiples de leurs tailles $TailleF_i$. L'éventuel lot non complet d'une famille est appelé lot complémentaire dans les modèles proposés ici. Dans cette approche, la prise en compte des lots non complets se fait dans le programme linéaire. En effet, pour chaque famille, le modèle vérifie l'existence ou non du lot complémentaire. Au plus un lot élémentaire par famille peut avoir une taille inférieure à $TailleF_i$. Il est appelé dans ce cas lot complémentaire. Pour simplifier, nous utiliserons le terme lot élémentaire pour désigner aussi le lot complémentaire dans la plupart des contraintes. Un lot d'une famille donnée peut être égal à un lot élémentaire, ou à un lot complémentaire ou peut être composé d'une succession de lots élémentaires et /ou lots complémentaires. Un lot d'une famille peut ainsi occuper une ou plusieurs positions.

IV.4.3.1. Modèle 3 strict- recherche d'une solution optimale

De même que dans le modèle 1 strict, nous cherchons à ordonner les lots des familles des moteurs. L'ordonnancement doit permettre le lissage de la production tout au long de la journée. Comme nous l'avons déjà dit, le respect de toutes les contraintes est obligatoire dans ce modèle 3 strict aussi.

Les données :

F : le nombre total des familles de moteurs à produire par jour. $i \in \{1, 2, \dots, F\}$

$VolumeF_i$: le besoin d'une famille de moteur i par jour

$TailleF_i$: la taille d'un lot élémentaire d'une famille i .

$Var = \{0 \text{ ou } 1\}$. Var est une donnée binaire, qui vaut 1 si le lot complémentaire doit être positionné à la fin de la liste ordonnée. Dans le cas contraire, elle vaut zéro.

$S = \{(i_1, i_2), (i_3, i_4), \dots\}$: l'ensemble des couples des familles des moteurs qui doivent respecter la contrainte de non succession. Par exemple, la famille i_2 ne doit pas suivre la famille i_1 .

$D = \{(i_1, Di_1), (i_1', Di_1'), \dots\}$: l'ensemble des familles des moteurs qui doivent respecter la contrainte d'insertion. Par exemple, entre deux lots élémentaires de famille i_1 , il faut au minimum Di_1 moteurs d'autres familles différentes de i_1 .

A partir des données de notre problème, nous calculons les paramètres nécessaires à notre programme linéaire :

X_i : le nombre de lots élémentaires de taille égale à $TailleF_i$ à produire pour chaque famille i .

On a

$$X_i = \left\lfloor \frac{VolumeF_i}{TailleF_i} \right\rfloor \quad (4.15)$$

$CompTailleF_i$: la taille de l'éventuel lot complémentaire d'une famille i . Dans cette approche, nous autorisons donc d'avoir des lots très petits, contrairement à ce que nous avons dans la première approche (grâce aux deux façons de calcul en pré traitement des X_i).

$$compTailleF_i = volumeF_i \bmod TailleF_i \quad (4.16)$$

$CompV_i$: le nombre de lots complémentaires à produire pour chaque famille i . Il est égal à zéro s'il n'existe pas de lot complémentaire sinon il est égal à 1.

$$compV_i = \min(1, compTailleF_i) \quad (4.17)$$

P : le nombre total maximal de lots élémentaires des familles des moteurs par jour.

$$P = \sum_{i=1}^F (X_i + compV_i) \quad (4.18)$$

$minTF$: la taille minimum de $TailleF_i$ pour toutes les familles i .

$$minTF = \min (TailleF_i) \quad (4.19)$$

$sumF_i$: le nombre total de lots complémentaires, sans compter celui de la famille i .

$$sumF_i = \sum_{i=1 \neq f}^F (compV_i) \quad (4.20)$$

Les variables de décision :

Nous définissons trois variables de décisions :

- Les variables binaires U_{ip} définies ainsi :

$U_{ip} = 1$ si un lot élémentaire de la famille i est en position p (y compris l'éventuel lot complémentaire)

$= 0$ autrement

- Les variables binaires $compU_{ip}$ définies ainsi :

$compU_{ip} = 1$ si le lot complémentaire de la famille i est en position p

$= 0$ autrement

- $MaxF_i$ représente le nombre maximal de positions successives occupées par la même famille i

Fonction objectif :

Notre critère est de minimiser le nombre maximal de positions successives occupées par la même famille. De même que pour le modèle 1 strict, nous cherchons l'étalement des lots élémentaires tout au long de la journée.

$$\text{Minimiser } \sum_{i=1}^F MaxF_i \quad (4.21)$$

Les contraintes :

C1- Nous commençons par calculer $MaxF_i$, le nombre maximal de positions successives occupées par la même famille i . En effet, pour une famille donnée i , la valeur de $(\sum_{q=p}^r [U_{ip}] - (r - p))$ est égale à 1 seulement dans le cas où les positions, de p jusqu'à r , sont occupées par des lots de la même famille i . Dans ce cas, le nombre de lots successifs est égal à la distance entre les deux positions $(r - p) + 1$.

$$(1 + (r - p)) * \left(\sum_{q=p}^r [U_{ip}] - (r - p) \right) \leq \text{Max}_i$$

$$\forall i \in \{1, 2, \dots, F\} \quad \forall p \in \{1, 2, \dots, P\} \quad \text{et} \quad \forall r \in \{p + 1, \dots, \min(p + 2 + X_i, P)\} \quad (4.22)$$

C2- Une seule position est attribuée à chaque lot élémentaire de famille de moteurs

$$\sum_{i=1}^F U_{ip} = 1 \quad \forall p \in \{1, 2, \dots, P\} \quad (4.23)$$

C3- Au plus, un seul lot complémentaire pour chaque famille

$$\sum_{p=1}^P \text{comp}U_{ip} \leq 1 \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, F\} \quad (4.24)$$

C4- De même que pour les contraintes C2, au plus une seule position est attribuée à l'éventuel lot complémentaire de chaque famille

$$\sum_{p=1}^P \text{com}U_{ip} = \text{comp}V_i \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, F\} \quad (4.25)$$

C5- Si une position p n'est attribuée à aucun des lots élémentaires d'une famille i , elle ne le sera pas non plus pour son éventuel lot complémentaire (Si $U_{ip} = 0$ alors $\text{comp}U_{ip} = 0$).

$$\text{comp}U_{ip} \leq U_{ip} \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, F\} \quad \forall p \in \{1, 2, \dots, P\} \quad (4.26)$$

C6- Tous les besoins des clients doivent être satisfaits

$$\sum_{p=1}^P U_{ip} = X_i + \text{comp}V_i \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, F\} \quad (4.27)$$

C7- Respect de la contrainte de non succession pour tous les couples des familles de moteurs appartenant à l'ensemble S

$$U_{i_1 p} + U_{i_2 p+1} \leq 1 \quad \forall (i_1, i_2) \in S \quad \forall p \in \{1, 2, \dots, P - 1\} \quad (4.28)$$

C8- Respect de la contrainte d'insertion pour les familles de moteurs appartenant à l'ensemble D

$$D_{i1}(U_{i1p} + U_{i1r} - 1) \leq \sum_{i \in F \setminus i_1} \sum_{k=p+1}^{r-1} U_{ik} * \text{Taille}F_i - \text{comp}U_{ip} * (\text{Taille}F_i - \text{compTaille}F_i)$$

$$\forall (i_1, Di_1) \in D \quad \forall p \in \{1, 2, \dots, P\} \quad \forall r \in \left\{ p + 2, \dots, \min(p + 2 + \text{sum}F_i + \left(\frac{D_{i1}}{\min TF}\right), P) \right\} \quad (4.29)$$

L'inégalité (4.29) assure le respect de la contrainte d'insertion. Elle est du même principe que l'inégalité (4.10) présentée dans la 1^{ère} approche. Elle est valable si les positions p et r sont occupées par la famille i_1 . Dans ce cas, cette inégalité calcule la somme des tailles des lots élémentaires compris entre les positions p et r des familles différentes de i_1 .

$\sum_{i \in F \neq i_1} \sum_{k=p+1}^{r-1} U_{ik} * TailleF_i$ correspond au volume total de la famille i sur toutes les positions k , si

tous les lots élémentaires sont complets.

$\sum_{i \in F \neq i_1} \sum_{k=p+1}^{r-1} U_{ik} * TailleF_i - compU_{ip} * (TailleF_i - compTailleF_i)$ correspond au volume total de

la famille i sur toutes les positions k , pour tous les lots élémentaires, dont un éventuel lot complémentaire.

C9- Afin de respecter la contrainte d'insertion d'une famille donnée, il est interdit d'avoir la succession de deux lots élémentaires de cette famille.

$$U_{ip} + U_{ip+1} \leq 1 \quad \forall (i_1, Di_1) \in D \quad \forall p \in \{1, 2, \dots, P-1\} \quad (4.30)$$

C10- Respecter le fait de positionner le lot complémentaire d'une famille à la fin de la liste si $var=1$. Si un lot de la famille i est en position r et son lot complémentaire est en position p alors $(U_{ir} + compU_{ip} - 1) = 1$. L'inégalité (4.31) permet d'avoir $p \geq r$, c-à-d que le lot complémentaire occupera une position supérieure à celle d'un autre lot de la famille i .

$$p * Var \geq (U_{ir} + compU_{ip} - 1) * r * Var$$

$$\forall i \in \{1, 2, \dots, F\} \quad \forall p \in \{1, 2, \dots, P\} \quad \forall r \in \{1, 2, \dots, P\} \quad (4.31)$$

IV.4.3.2. Expérimentations et résultats du Modèle 3 strict

Nous testons le cas réel déjà testé avec le modèle 1 strict présenté auparavant. Ainsi nous avons les données déjà présentées dans le tableau IV-1: les familles, leurs volumes respectifs $VolumeF_i$ et leurs tailles $TailleF_i$. Par contre, nous n'avons pas les mêmes valeurs de X_i . Ceci est dû au calcul du lot complémentaire directement dans le modèle linéaire et non pas en phase de prétraitement (cf. IV.4.1). En effet, nous avons le nombre des lots complémentaires $CompV_i$ ainsi que leurs tailles respectives $CompTailleF_i$. Le nombre total de

lots élémentaires (y compris tous les lots complémentaires) des familles à ordonner est

$$P = \sum_{i=1}^F (X_i + \text{comp}V_i) = 24.$$

Nous avons les mêmes contraintes de non succession et d'insertion. Nous rappelons que l'ensemble des contraintes de non succession est $S = \{(F, C), (C, F), (G, C), (G, J), (J, F)\}$. L'ensemble des contraintes d'insertion est $D = \{(C, 80), (D, 24), (F, 24), (G, 24), (H, 24), (I, 24), (J, 80)\}$. Le tableau IV-7 résume les données de notre cas réel.

Familles F	Besoins $\text{Volume}F_i$	Tailles des lots élémentaires $\text{Taille}F_i$	Nombre de lots élémentaires à produire X_i	Nombre de moteurs d'insertion D_i	Nombre de lots complémentaires à produire $\text{Comp}V_i$	Taille des lots complémentaires $\text{CompTaille}F_i$
A	342	90	3	0	1	72
B	192	60	3	0	1	12
C	330	72	4	80	1	42
D	12	36	0	24	1	12
E	72	36	2	0	0	0
F	12	24	0	24	1	12
G	110	50	2	24	1	10
H	0	30	0	24	0	0
I	48	60	0	24	1	48
J	198	72	2	80	1	54

Tableau IV-7: Données des familles des moteurs – cas avec 10 familles (2^{ème} approche)

La résolution du cas réel avec Cplex est obtenue après 8 secondes de calcul avec une fonction objectif de $\sum_{i=1}^F \text{Max}F_i = 9$ correspondant à la solution optimale. La liste ordonnée des familles est présentée dans le tableau IV-8.

Position	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Liste familles	C	A	C	G	E	I	C	J	B	C	B	G	B	G	F	J	C
Nombre de moteurs	72	90	72	50	36	48	72	72	60	72	60	50	60	10	12	72	42

Position	18	19	20	21	22	23	24
Liste familles	A	D	A	B	J	A	E
Nombre de moteurs	90	12	90	12	54	72	36

Tableau IV-8: Liste ordonnée des familles des moteurs – cas avec 10 familles (2^{ère} approche)

Nous constatons que nous avons obtenu une solution qui respecte toutes les contraintes de non succession et d'insertion. Vu que les lots complémentaires ont été traités par le programme linéaire, ils ont été considérés comme des lots à part entière. Nous observons que le lot complémentaire de la famille B, placé en position 21, a une taille de 12. Or la taille de la famille B, $TailleF_B$, est égale à 60. L'inconvénient de cette 2^{ème} approche est de toujours attribuer au lot complémentaire le reste des moteurs, et ceci quelle que soit la valeur. Par exemple, si nous avons un besoin égal à $TailleF_i + 1$, nous aurons un lot complémentaire de 1 moteur. Nous pourrions le rajouter directement dans le lot principal comme dans la première approche. Malgré le risque d'avoir des lots complémentaires très faibles, la deuxième approche reste plus performante pour le respect de toutes les contraintes, en particulier celles d'insertion.

IV.4.3.3. Modèle 4 relaxé - cas où il n'y a pas de solution optimale

De la même manière que pour notre première approche, notre deuxième modèle est inspiré du modèle 3 strict présenté ci-dessus. Nous adoptons les mêmes données et les mêmes variables de décision. Nous rajoutons la variable binaire de décision suivante :

$P_{nonsucc_p}$ correspond au nombre de viols de la contrainte de non succession.

Nous modifions la fonction objectif comme suit :

$$\text{Minimiser} \quad \sum_{i=1}^F MaxF_i + \alpha * \sum_{p=1}^P P_{nonsucc_p} \quad (4.32)$$

Le but est de minimiser le nombre maximal de positions successives occupées par la même famille et de minimiser le nombre de viols des contraintes de non succession. α est une pénalité pour le viol de la contrainte de non succession.

Nous modifions les contraintes C7 comme suit :

$$C7.2- U_{i_1 p} + U_{i_2 p+1} - P_{nonsucc_{p+1}} \leq 1 \quad \forall (i_1, i_2) \in S \quad \forall p \in \{1, 2, \dots, P-1\} \quad (4.33)$$

Cette inégalité représente la contrainte de non succession. Le cas échéant, nous calculons le nombre de viols réalisés.

Nous modifions aussi les contraintes C8 comme suit :

C8.2-

$$D_{i_1} (U_{i_1 p} - U_{i_1 p+1} + U_{i_1 r} - 1) \leq \sum_{i \text{ in } F \neq i_1} \sum_{k=p+1}^{r-1} U_{ik} * TailleF_i - compU_{ip} * (TailleF_i - compTailleF_i)$$

$$\forall (i_1, Di_1) \in D \quad \forall p \in \{1, 2, \dots, P\} \quad \forall r \in \left\{ p + 2, \dots, \min(p + 2 + sumF_i + (\frac{D_{i_1}}{\min TF}), P) \right\} \quad (4.34)$$

Cette inégalité cherche à respecter la contrainte d'insertion. Dans ce cas, deux lots de i_1 ne peuvent pas se suivre, et $(U_{i_1 p} - U_{i_1 p+1} + U_{i_1 r} - 1)$ est donc égal à 1. Lorsque ceci n'est pas possible, deux lots de i_1 peuvent se suivre, et $(U_{i_1 p} - U_{i_1 p+1} + U_{i_1 r} - 1)$ est égal à 0. La contrainte est donc relâchée.

Enfin, nous supprimons les contraintes C9 du modèle 3 strict. Ceci nous autorise à dégrader le lissage des lots des familles ayant une contrainte d'insertion. Ainsi, nous acceptons d'avoir plusieurs lots élémentaires successifs de cette famille. Par conséquent, ceci autorise la violation éventuelle de la contrainte d'insertion.

IV.4.3.4. Expérimentations et résultats du modèle 4 relaxé

Nous testons le cas déjà testé avec le modèle 2 relaxé présenté ci avant. Ainsi, nous avons les données déjà présentées dans le tableau IV-4: les familles, leurs volumes respectifs $VolumeF_i$ et leurs tailles $TailleF_i$. Par contre, comme nous l'avons expliqué dans la section IV.4.3.2, nous n'avons pas les mêmes valeurs de X_i . Ceci est dû au calcul du lot complémentaire directement dans le modèle linéaire (cf. IV.4.1). En effet, nous avons le nombre des lots complémentaires $CompV_i$ ainsi que leurs tailles respectives $CompTailleF_i$. Le nombre total de lots élémentaires (y compris tous les lots complémentaires) des familles à ordonner est $P = \sum_{i=1}^F (X_i + compV_i) = 32$.

Nous avons les mêmes contraintes de non succession et d'insertion. Nous rappelons que l'ensemble des contraintes de non succession est $S = \{(F, C), (C, F), (C, G)\}$. L'ensemble des contraintes d'insertion est $D = \{(C, 80)\}$. Le tableau IV-9 résume les données de notre exemple.

Familles F	Besoins $VolumeF_i$	Tailles des lots élémentaires $TailleF_i$	Nombre de lots élémentaires à produire X_i	Nombre de moteurs d'insertion D_i	Nombre de lots complémentaires à produire $CompV_i$	Taille des lots complémentaires $CompTailleF_i$
A	360	90	4	0	0	0
B	192	60	3	0	1	12
C	608	42	14	80	1	20
D	12	12	1	0	0	0
E	60	36	1	0	1	24
F	6	6	1	0	0	0
G	110	30	3	0	1	20
H	3	3	1	0	0	0

Tableau IV-9: Données des familles de moteurs – cas avec 8 familles (2^{ème} approche)

La résolution de cet exemple avec Cplex est obtenue après 12 secondes de calcul avec une fonction objectif $\sum_{i=1}^F MaxF_i + \alpha * \sum_{p=1}^P Pnonsucc_p$ égale à 9. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau IV-10.

Position	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Liste	C	A	C	A	G	C	C	A	C	B	F	G	C	C	E	B	C
Nombre de moteurs	42	90	42	90	30	42	42	90	42	60	6	30	42	42	36	60	42

Position	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
Liste	C	A	D	C	C	B	G	C	C	E	B	C	C	H	G
Nombre de moteurs	42	90	12	42	42	60	30	42	42	24	12	42	42	3	20

Tableau IV-10: Liste ordonnée des familles des moteurs – cas avec 10 familles (2^{ème} approche)

De même que la solution trouvée par notre 1^{ère} approche, nous constatons que nous avons obtenu une solution qui respecte toutes les contraintes de non succession, mais pas toutes les contraintes d'insertion. En effet, nous comptons maintenant 6 violations des contraintes d'insertion de la famille C. Comme illustré dans le tableau IV-10, il s'agit des positions suivantes : 7, 14, 18, 22, 26 et 30. Nous rappelons que nous avons compté 7 violations des contraintes d'insertion de la famille C avec notre modèle 2 relaxé. Nous concluons que la solution trouvée avec la deuxième approche est meilleure que celle trouvée par la première approche.

IV.4.4. Comparaison des tests entre les deux approches

Nous avons effectué plusieurs tests en nous basant sur des cas réels correspondant à des journées de production des ateliers de montage des usines de moteurs de PSA Peugeot Citroën. Nous nous sommes inspirés de ces cas réels pour simuler d'autres tests en modifiant les besoins à produire ou en augmentant le nombre total de familles. Le Tableau IV-11 représente un récapitulatif des résultats des quelques tests effectués avec les modèles 1 strict, 2 relaxé, 3 strict et 4 relaxé. Il présente une comparaison des résultats, obtenus entre les deux approches, selon les critères suivants : le nombre de familles, le nombre de lots élémentaires à produire, le temps de résolution, la valeur de la fonction objectif, le nombre de variables, le nombre de contraintes et le respect des contraintes. Nous constatons que :

- pour chaque exemple, nous trouvons la même fonction objectif pour les deux approches.
- pour chaque exemple, le respect des contraintes est le même pour les deux approches.
- Sur l'ensemble des tests réalisés, la deuxième approche conduit à avoir moins de variables et plus de contraintes que la première.
- dans tous les cas réels, le temps de résolution est très rapide : seulement quelques secondes. Comme nous l'avons précisé, le temps de résolution doit être très court pour pouvoir industrialiser au sein de PSA Peugeot Citroën les travaux réalisés. La limite du temps de calcul a été convenue à 5min suite à la demande du manager.

Le temps de résolution de la deuxième approche est quasiment toujours plus court que celui de la première. Dans certains cas, comme présenté dans le tableau IV-11, nous avons trouvé une solution optimale avec la deuxième approche alors que la première n'en fournit pas au bout de 5 minutes. Nous précisons que notre modèle 2 relaxé a trouvé une solution au bout de 5 min, mais il n'a pas encore trouvé la solution optimale. Si le temps de calcul dépasse la limite de 5min, nous avons toujours une solution, ce qui est très important d'un point de vue industriel, mais pas forcément optimale.

Comme nous l'avons précisé, la deuxième approche satisfait mieux le respect de la contrainte d'insertion. En plus, le temps de résolution est un critère discriminant pour le choix d'une des deux approches. Nous concluons donc que la deuxième approche est plus performante que la première.

		Approche 1							Approche 2							
	Nombre de familles	Nombre de lots élémentaires à produire	Temps de résolution	Fonction objectif	Nombre de variables	Nombre de contraintes	Respect des contraintes	Modèle utilisé	Nombre de lots élémentaires à produire	Nombre de lots complémentaires à produire	Temps de résolution	Fonction objectif	Nombre de variables	Nombre de contraintes	Respect des contraintes	Modèle utilisé
Exemples réels des usines de moteurs de PSA	8	31	35s	9	849	2417	NON	2 relaxé	28	4	29s	9	554	10315	NON	4 relaxé
	9	22	10s	9	474	2774	OUI	1 strict	19	5	8s	9	443	7598	OUI	3 strict
	6	19	11s	6	294	1385	OUI	1 strict	15	5	9s	6	248	3561	OUI	3 strict
	6	11	10s	6	174	557	OUI	1 strict	6	6	7s	6	152	1296	OUI	3 strict
	6	24	11s	6	369	2392	OUI	1 strict	20	4	9s	6	296	5485	OUI	3 strict
Exemples simulés à partir des données réelles en modifiant les volumes et le nombre de familles	8	59	Abandon au bout 5min	9	1605	5427	NON	2 relaxé	55	4	1min 27s	9	1013	33075	NON	4 relaxé
	9	43	39s	9	915	8129	OUI	1 strict	38	6	16s	9	803	22733	OUI	3 strict
	6	41	37s	6	624	5826	OUI	1 strict	38	4	18s	6	512	14589	OUI	3 strict
	10	34	Abandon au bout 5min	11	1136	3178	NON	2 relaxé	31	4	2min 29s	11	747	14940	NON	4 relaxé
	12	28	14s	12	771	4538	OUI	1 strict	25	5	24s	12	734	14348	OUI	3 strict
	10	36	44s	10	841	5530	OUI	1 strict	32	6	14s	10	732	17050	OUI	3 strict

Tableau IV-11: Comparaison des résultats des tests entre les deux approches

IV.5. Modèle de lissage des références des moteurs

Après l'ordonnancement des lots des familles de moteurs, l'objectif est d'ordonnancer les références à l'intérieur de chacun de ces lots. L'ordonnancement des références doit respecter le lissage de la production et les contraintes des références : le respect de la taille d'UC des références et de la taille d'un lot minimum.

IV.5.1. Modélisation

Nous allons appliquer ce modèle pour chacune des familles. Nous avons les données suivantes pour une famille donnée :

K : le nombre total de références

V_j : le volume de la référence j

UC_j : la taille d'Unité de Conditionnement de la référence j

$MiniLot_j$: la taille minimum d'un lot d'une référence j . $MiniLot$ est le plus souvent égale à la taille UC pour une référence donnée j mais dans quelques cas $MiniLot$ est un multiple d' UC .

Afin de respecter la contrainte de la taille du lot minimum, nous supposons que la taille d'un lot d'une référence doit être, non seulement au moins égale à $MiniLot$, mais aussi un multiple de $MiniLot$. Nous respectons ainsi la contrainte de la taille d' UC aussi.

Afin d'illustrer notre modèle de lissage des références, nous le testons sur un exemple de 3 références d'une famille donnée. Nous détaillons les résultats de chaque procédure sur cet exemple. Le tableau IV-12 présente les données de cet exemple.

j	1	2	3
V_j	36	10	18
UC_j	6	5	6
$MiniLot_j$	6	5	6

Tableau IV-12: Données d'entrée d'un exemple de 3 références

A partir des données de notre problème, nous calculons les paramètres nécessaires à notre modèle :

N_j : le nombre de lots de chaque référence à fabriquer par jour. $N_j = 1$ si le volume V_j d'une

référence j est inférieur à $MiniLot_j$, sinon $N_j = \left\lfloor \frac{V_j}{MiniLot_j} \right\rfloor$.

N_{total} : le nombre total des lots de toutes les références.

La procédure suivante permet de calculer les deux paramètres N_j et N_{total} .

Pour (chaque référence j) **faire**

Si ($V_j < MiniLot_j$) **alors**

$N_j = 1$;

Sinon

$N_j = \text{arrondi inférieur}(V_j / MiniLot_j)$;

Fin Si

$N_{total} = N_{total} + N_j$

Fin Pour

Pour notre exemple, nous aurons $N_{total} = 11$ et $N_j = \{6, 2, 3\}$.

Le processus du modèle de lissage des références est composé de plusieurs étapes :

1- Nous commençons par trier les volumes des références N_j en ordre décroissant, la 1^{ère} référence $R1$ est celle qui a le volume le plus grand N_{max} .

Fonction Tri (N_j)

Pour notre exemple, nous aurons les références $R1$, $R2$ et $R3$ avec leurs volumes respectifs $N1 = N_{max} = 6$, $N2 = 3$ et $N3 = 2$.

2- Nous avons deux cas possibles :

Cas 1: si N_{max} est inférieur ou égal à la somme des volumes de toutes les références sauf $R1$. Dans ce cas, nous passons directement à l'étape 3. Il existe une solution avec uniquement des lots égaux à 1.

Cas 2: Si N_{max} est supérieur à la somme des volumes de toutes les références sauf $R1$. Dans ce cas, il n'y a pas de solution avec uniquement des lots égaux à 1. Nous proposons alors de

découper N_{max} en deux volumes $N'1$ et $N''1$ avec $N'1 = \left\lfloor \frac{N_{total}}{2} \right\rfloor$ et $N''1 = N_{max} - N'1$.

Nous créons deux références fictives $R'1$ et $R''1$ qui correspondent aux volumes $N'1$ et $N''1$. Ensuite, nous trions de nouveau les N_i avec les références fictives en ordre décroissant. Nous ramenons ainsi notre problème au cas 1, avec $K + 1$ références.

Si ($N_{total} > 1$) et ($N_{max} > \sum_{j=2}^K N_j$) **alors**

$N'1 = N_{total}/2$

$N''1 = N_{max} - N'1$

Fin Si

Tri (N_i)

Pour notre exemple, $N_{max} = 6$ est supérieur à $\sum_{j=2}^K N_j = 5$. Ainsi, notre exemple est de type cas

2. Nous appliquons donc la procédure décrite ci-dessus et nous aurons les références $R'1$, $R2$, $R3$ et $R''1$ avec leurs volumes respectifs $N'1 = 5$, $N2 = 3$, $N3 = 2$ et $N''1 = 1$. Nous ramenons notre exemple au cas 1.

3- Pour construire la liste ordonnée, nous calculons, pour chaque référence sauf la première, le ratio maximum (RatioMax j) entre son volume et le volume maximum.

Pour (chaque référence j sauf $j=1$) **faire**

RatioMax $j = N_j / N_{max}$

Fin Pour

Pour notre exemple, les ratios RatioMax j sont : 0,6 ; 0,4 ; 0,2 pour $j \in \{2,3,4\}$.

4- Nous plaçons les premiers lots de toutes les références en commençant par la 1^{ère} référence. Pour chaque référence j , nous définissons un compteur appelé Compt(j) qui représente le nombre de lots placés.

Pour (chaque référence j) **faire**

Placer les R_j un par un

Compt(j) = Compt(j) + 1

Fin Pour

Le tableau IV-13 présente le résultat de cette procédure appliquée à notre exemple.

Position	1	2	3	4
Référence	R'1	R2	R3	R''1
Taille	1	1	1	1

Tableau IV-13: les résultats de l'étape 4 sur l'exemple de 3 références

5- Ensuite, nous construisons le reste de la liste ordonnée en fonction des ratios. Nous plaçons un lot d'une référence si son ratio courant est inférieur à son ratio objectif.

Pour (chaque référence j) **faire**

Si j=1 **alors**

 Placer R1

 Compt(1)=Compt(1)+1

Sinon

 Ratio = Compt(j)/ compt(1)

Si ratio < ratioOpt (j) **alors**

 Placer Rj

 Compt(j)=Compt(j)+1

Fin Si

Fin Si

Fin Pour

Le tableau IV-14 présente le résultat de la liste en appliquant cette procédure à notre exemple.

Position	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
référence	R'1	R2	R3	R''1	R'1	R2	R'1	R3	R'1	R2	R'1
Taille	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tableau IV-14: les résultats de l'étape 5 sur l'exemple de 3 références

6- Si nous sommes dans le cas 2, il faut alors remplacer les références fictives R'1 et R''1 par R1. Cette étape est à appliquer seulement dans le cas 2.

Le tableau IV-15 présente le résultat final de la liste des références en appliquant cette étape à notre exemple.

Position	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
référence	R1	R2	R3	R1	R1	R2	R1	R3	R1	R2	R1
Taille	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tableau IV-15: les résultats de l'étape 6 sur l'exemple de 3 références

Notre algorithme permet l'étalement des lots des références tout au long de la journée. Il respecte les contraintes des références à savoir : la taille d'UC et la taille du lot minimum. Placer un lot de chacune des références au début de la liste permet le lissage des lots des références qui ont un gros volume. Mais ceci impose aussi que les références qui possèdent un seul lot soient placées au début de la liste. Un décalage des premiers lots des références pourrait être une solution si besoin.

IV.5.2. Expérimentations et résultats

Après avoir présenté les résultats obtenus au niveau des familles, nous reprenons le même cas réel avec le modèle de lissage au niveau des références. Les données des références utilisées dans la résolution du modèle sont illustrées dans le tableau IV-16.

Référence	Famille	V j	UC j	MiniLotj
R1	A	48	6	90
R2	A	6	6	90
R3	A	24	6	90
R4	A	264	6	90
R5	B	30	6	60
R6	B	108	6	60
R7	B	54	6	60
R8	C	36	6	72
R9	C	246	6	72
R10	C	48	6	72
R11	D	12	6	36
R12	E	72	6	36
R13	F	6	6	24
R14	F	6	6	24
R15	G	50	5	50
R16	G	60	5	50
R17	H	0	6	60
R18	I	48	6	60
R19	J	174	6	72
R20	J	24	6	72

Tableau IV-16: Données des références d'une ligne de montage – cas avec 10 familles

Le modèle a été codé en VBA et la résolution de ce cas réel sous Excel était quasi instantanée. Le modèle est appliqué sur chacune des familles de moteurs. Nous présentons par exemple la liste ordonnée des références de la famille A dans le tableau IV-17. Nous remarquons une liste assez courte avec de gros volumes. Ceci est dû aux bornes inférieures

MiniLotj. Nous observons qu'elles sont assez grandes dans ce cas réel, ce qui n'est pas toujours le cas.

Position des références	Référence	Vj
1	R4	90
2	R1	48
3	R2	6
4	R3	24
5	R4	90
6	R4	84

Tableau IV-17: Liste ordonnée des références de la famille A

IV.5. Conclusion

Ce chapitre nous a permis de traiter la problématique d'ordonnancement et de lissage des moteurs sur une ligne de montage au niveau des familles et des références. Après la description de la problématique, nous nous sommes intéressés, dans un premier temps, à l'ordonnancement au niveau des familles. Nous avons étudié deux approches afin de séquencer les familles de moteurs. Dans un deuxième temps, nous avons proposé un modèle de lissage afin de traiter l'ordonnancement au niveau des références. Des tests des modèles proposés, sur des cas réels, ont été décrits, ainsi qu'une analyse des résultats obtenus.

Les versions présentées dans ce chapitre sont le fruit de plusieurs variantes de programmes linéaires. Ces variantes résultent des différents retours d'expérience obtenus de la part des utilisateurs au travers de l'outil d'ordonnancement qui fait l'objet du chapitre 5.

Notre démarche consistait à trouver dans un premier temps une liste ordonnée qui satisfait toutes les contraintes de production puis, dans un second temps, de satisfaire au mieux le lissage. Notons que le groupe développe de nouveaux processus avec le minimum de contraintes industrielles. Le lissage de production deviendra alors le critère le plus important à respecter. Nous avons essayé de rajouter une contrainte de lissage directement dans les modèles d'optimisation des familles de moteurs, dans la deuxième approche. Nous avons testé le modèle 3 strict avec la contrainte de lissage sur l'exemple présenté dans la section IV.4.3.2. Nous avons trouvé une solution au bout de 11 secondes. Par contre, nous avons eu d'autres exemples où nous n'avons pas obtenu de solution. Nous avons testé aussi le modèle 4 relaxé avec cette contrainte de lissage sur l'exemple présenté dans la section IV.4.3.4. Nous n'avons

pas obtenu de solution. Il a fallu relâcher la contrainte de lissage sur la famille ayant une contrainte d'insertion afin d'obtenir une solution au bout de 1 minute et 21 secondes.

CONFIDENTIEL

CONFIDENTIEL

Chapitre V

Un outil d'aide à la décision pour l'ordonnancement

V.1. Présentation de l'outil d'ordonnancement	102
V.1.1. Architecture de l'application	103
V.1.2. Processus de l'application	104
V.1.3. Fonctionnalités de l'application	105
V.2. Les prétraitements des données	107
V.3. Les post-traitements des résultats intermédiaires	107
V.4. Application au cas industriel	108
V.4.1. Présentation du cas industriel	108
V.4.2. Analyse des résultats	109
V.4.2.1. Première approche : prise en compte en pré- et en post- traitement des lots non complets	109
V.4.2.2. Deuxième approche : prise en compte dans le programme linéaire des lots non complets	110
V.5. Conclusion	111

La problématique majeure de l'ordonnancement du montage des moteurs est de trouver un compromis entre le respect des contraintes et le lissage de la production. Dans ce chapitre, nous présentons un outil d'aide à la décision pour notre problématique. Il permet d'avoir une liste ordonnée journalière du montage des moteurs. Il s'agit d'un prototype technique qui permet de valider la performance des méthodes d'optimisation sur des cas réels. Il a été développé avec les modèles présentés au chapitre précédent. Nous décrivons l'architecture, le processus et les fonctionnalités de l'application. Ensuite, nous abordons en détails les étapes de prétraitements et de post traitements nécessaires pour traiter les données et les résultats. Par ailleurs, nous exposons le cas d'application industriel étudié et les résultats obtenus par nos deux approches présentées dans le chapitre 4. Finalement, nous terminons par une comparaison des résultats de ces deux approches.

V.1. Présentation de l'outil d'ordonnancement

Cette application est un prototype fonctionnel présentant à l'utilisateur une interface pour l'aide à la décision. Notre premier objectif a été de rendre l'utilisation de ce prototype la plus facile possible. Nous avons donc développé une interface utilisateur qui permet d'utiliser les modèles de manière conviviale. Sachant que les décideurs sont des utilisateurs principalement d'Excel, nous avons développé une interface sous Excel afin de faciliter son appropriation. Et, d'après les retours que nous avons pu avoir, notre interface est effectivement appréciée pour sa souplesse et sa facilité d'utilisation. Néanmoins, nous nous sommes aperçus que la complexité du mode opératoire d'utilisation a nécessité de faire évoluer le prototype afin de le rendre le plus automatisé possible. Pour y parvenir il y a eu plusieurs versions, qui ont été améliorées au fur et à mesure, pour aboutir à cette version finale présentée dans ce chapitre.

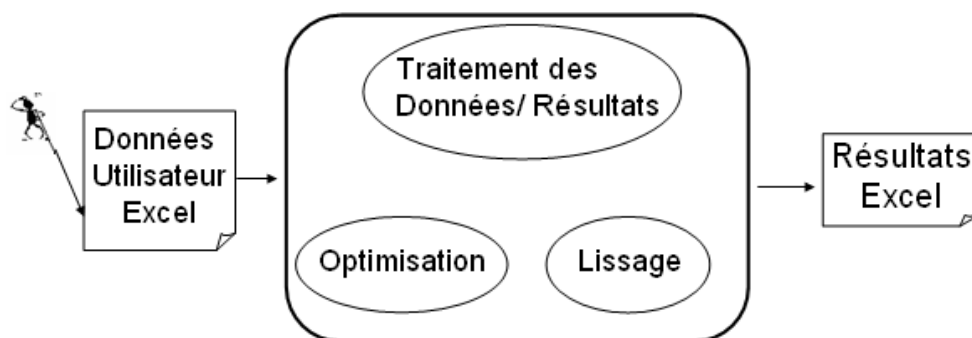


Figure V-1: Schéma général de l'application

La figure V-1 présente une vue simplifiée de l'application. A partir des paramètres fournis par l'utilisateur, les données de la production sont collectées dans une feuille Excel. L'application propose de réaliser des traitements de données, des optimisations et des analyses des résultats. Ces derniers sont ensuite renvoyés et affichés sous Excel.

V.1.1. Architecture de l'application

La figure V.2 présente l'architecture technique de l'application. L'application lit les données d'entrée du fichier Excel. Les modèles d'optimisation au niveau des familles de moteurs sont développés sous le langage OPL (Optimization Programming Language), dans l'environnement de modélisation algébrique OPL Studio (IBM/ILOG) (Guide d'utilisation, 2008). Il s'agit d'un langage qui offre un environnement complet pour construire et éditer rapidement et facilement les modèles mathématiques. Les modèles de lissage, les algorithmes de pré-traitement et de post-traitement sont réalisés sous Visual Basic. Les données de sorties sont réécrites dans le fichier Excel d'entrée. L'automatisation des liens entre le fichier Excel et l'interface OPL est réalisée sous un exécutable Auto It qui permet de gérer le transfert des données. Auto It est un logiciel gratuit permettant une automatisation sous le système d'exploitation Microsoft Windows. Il possède un langage de script destiné à créer des scripts d'automatisation pour des programmes Microsoft. Notons qu'un script peut être compilé en un exécutable compressé autonome, lequel peut alors être exécuté sur des ordinateurs dépourvus de l'interpréteur AutoIt.

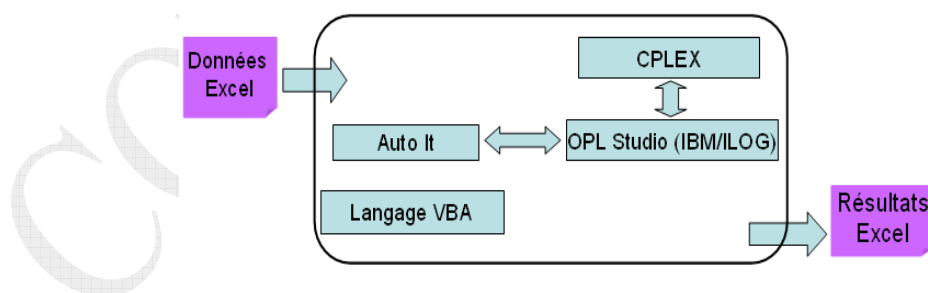


Figure V-2: Architecture technique de l'application

L'objectif est d'industrialiser cette application au sein de PSA Peugeot Citroën et de l'intégrer au sein du système d'information de l'entreprise. Le choix de cette architecture facilite l'intégration de l'application. OPL Studio (ILOG / IBM) est un environnement de modélisation algébrique de programmation linéaire et d'optimisation combinatoire. Il permet une gestion facile des données. En effet, ces données d'entrée peuvent être extraites

automatiquement des bases de données et/ou des feuilles de calcul. Les résultats peuvent être exportés vers des bases de données et/ou des feuilles de calcul. OPL Studio (ILOG / IBM) permet un suivi graphique des calculs en temps réel grâce à une interface graphique très évoluée comprenant de nombreuses fonctionnalités. Ainsi, nous pouvons suivre l'évolution des solutions trouvées par les modèles d'optimisation au cours du temps. OPL Studio (ILOG / IBM) est basé sur le seul langage d'optimisation OPL. Ce dernier supporte un module de programmation linéaire, issu du solveur CPLEX, et un module de programmation par contraintes issu du solveur ILOG Solver. Les solveurs sont appelés de manière transparente par ILOG OPL CPLEX Studio, ce qui permet de spécifier des problèmes d'optimisation en utilisant un langage unifié.

V.1.2. Processus de l'application

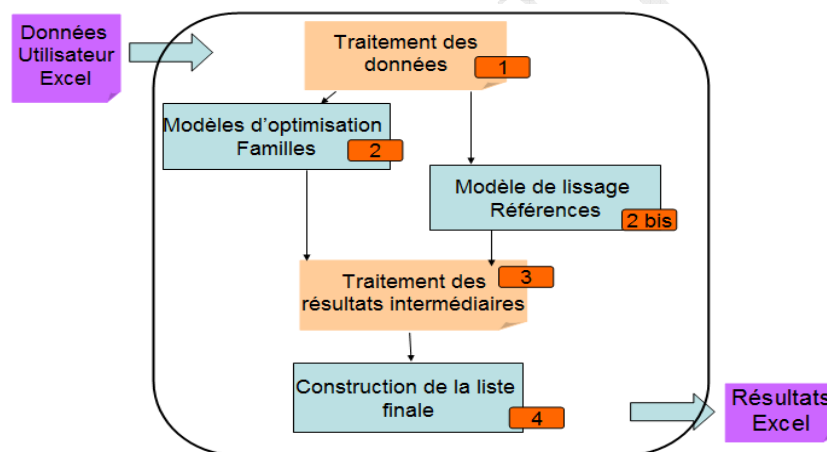


Figure V-3: Processus général de l'application

Nous rappelons que nous cherchons à ordonnancer le montage des moteurs sur deux niveaux : les familles et les références. Notre application traite ces deux niveaux de manière indépendante. Elle traite les modèles d'optimisation au niveau des familles et les modèles de lissage au niveau des références. La figure V.3 présente le processus de l'application. Ainsi, le prototype comporte cinq étapes :

- 1- Prétraitement au niveau des familles et des références des paramètres définis par l'utilisateur
- 2- Résolution des modèles d'optimisation au niveau des familles
- 2bis- Résolution du modèle de lissage au niveau des références

- 3- Post-traitement des résultats intermédiaires
- 4- Construction de la liste ordonnée

V.1.3. Fonctionnalités de l'application

Comme nous l'avons précisé précédemment, l'interface de notre outil est une interface sous Excel. Notre application possède sept onglets dont deux sont destinés à l'utilisateur : menu principal et visualisation des résultats. Le reste est destiné aux calculs des données et au suivi des résultats intermédiaires des cinq étapes du processus de l'application (cf. V.1.2).

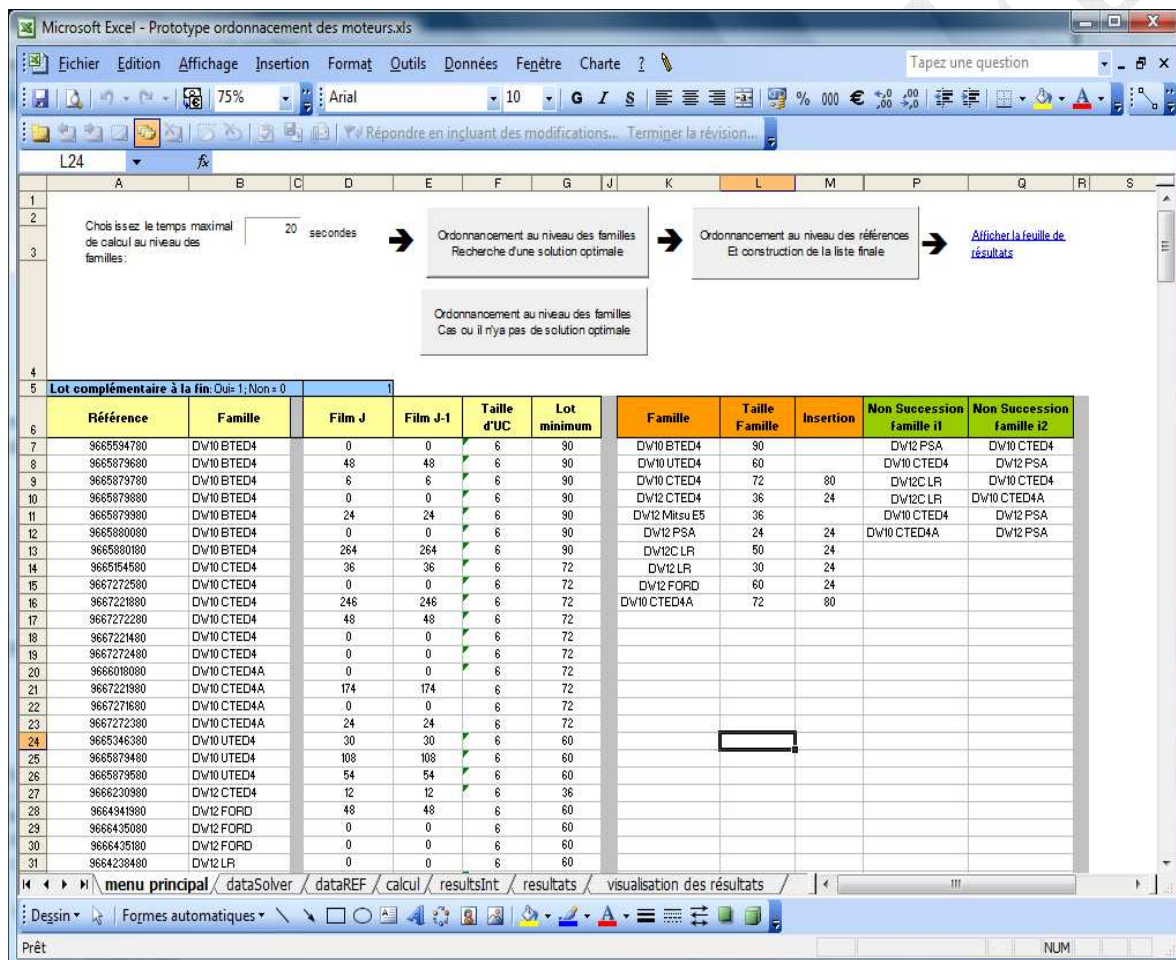


Figure V-4: Menu principal

La figure V- 4 présente l'interface de l'onglet : menu principal. Il s'agit de l'interface où l'utilisateur doit respecter l'ordre des fonctionnalités suivantes :

- 1- Saisir les données nécessaires de la production.

2- Paramétrer les contraintes d'ordonnancement : les contraintes de taille d'UC et de lot minimum pour les références, les contraintes de taille de lot de la famille, d'insertion et de non succession pour les familles de moteurs.

3- Lancer les modèles d'optimisation au niveau des familles :

L'utilisateur lance la recherche d'une solution optimale. En cas de non existence de solution qui respecte toutes les contraintes, une fenêtre sera affichée pour alerter l'utilisateur de cette situation. Ce dernier lancera alors le modèle recherchant une solution dégradée violant une ou plusieurs contraintes.

4- Lancer les modèles de lissage au niveau des références.

Indépendamment de ces quatre fonctionnalités, l'utilisateur a la possibilité d'aller vers l'onglet de visualisation des résultats s'il le souhaite.

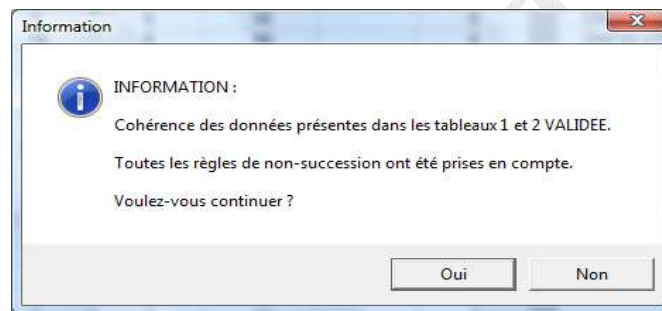


Figure V-5: Fenêtre d'information

Afin de valider les données d'entrée saisies par l'utilisateur, une fenêtre d'information se déclenche automatiquement avant chaque lancement de la fonctionnalité 3 comme indiqué dans la figure V-5. Elle pour but de :

- a- informer l'utilisateur de la cohérence ou non des données saisies,
- b- annoncer à l'utilisateur la prise en compte ou non de toutes les contraintes paramétrées
- c- demander à l'utilisateur de confirmer ou non le passage à la fonctionnalité suivante.

La figure V-6 présente l'onglet : visualisation des résultats. Il s'agit de l'interface où l'utilisateur peut découvrir la liste finale ordonnée au niveau des familles et des références des moteurs. Des alertes sous forme de couleurs informent l'utilisateur en cas de viol d'une contrainte donnée.

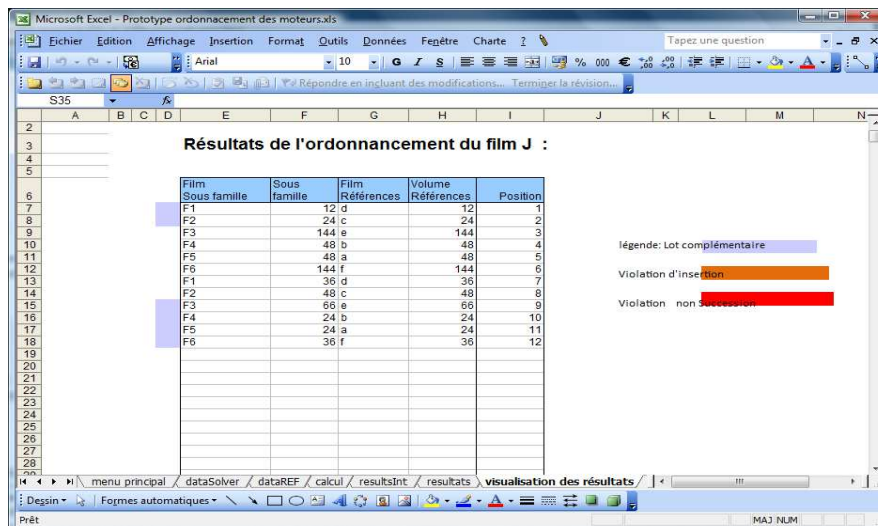


Figure V-6: Visualisation des résultats

V.2. Les prétraitements des données

Une fois la collecte des données effectuée, l'utilisateur paramètre le fichier Excel et définit les contraintes de production. Un prétraitement des données est nécessaire pour plusieurs raisons. L'utilisateur renseigne en effet toutes les contraintes de production de toutes les familles de moteurs. Or le nombre et le type des familles changent tous les jours selon le besoin. Aussi il faut définir les contraintes de production nécessaires le jour j.

Les données sont généralement extraites au niveau des références. Il est donc nécessaire de définir les données d'entrée au niveau des familles. Certains paramètres des modèles d'optimisation et de lissage n'existent pas dans le système d'information industriel, et il est nécessaire de les calculer pour la résolution des modèles. Le travail de prétraitement permet, par conséquent, d'obtenir les données attendues des modèles d'optimisation et de lissage à partir des informations collectées et remplies par l'utilisateur.

V.3. Les post-traitements des résultats intermédiaires

Un post-traitement des résultats intermédiaires fournis par les modèles d'optimisation et de lissage est nécessaire pour une raison principale : gérer les exceptions. Celles-ci concernent les besoins des familles de moteurs, s'ils ne sont pas multiples de la taille minimum d'une unité de familles. Elles concernent aussi les besoins des références, s'ils sont inférieurs à la taille minimum d'une unité de référence.

Le travail de post-traitement permet de rassembler les résultats intermédiaires des modèles d'optimisation et des modèles de lissage. Il permet la construction des listes ordonnées des familles et des références des moteurs. Il permet aussi de visualiser les listes ordonnées des familles et des références des moteurs, tout en montrant les éventuels viols des contraintes.

V.4. Application à un cas industriel

Rappelons que notre problématique consiste à trouver la liste ordonnée du montage des familles et des références de moteurs. Nous avons exposé deux approches afin d'optimiser l'ordonnancement au niveau des familles. Nous proposons de tester le même cas réel que celui présenté dans le chapitre 4 avec notre outil d'ordonnancement. Nous expérimentons les deux approches et nous analysons les résultats obtenus. L'objectif est de valider l'efficacité de notre application.

V.4.1. Présentation du cas industriel

Pour présenter le cas industriel, nous présentons dans le tableau V-1 les volumes des références, leurs tailles d'UC, leurs tailles de lot minimums, les volumes des familles, leurs tailles **Taille_F**, les nombres de moteurs d'insertion pour chaque famille concernée et la liste de familles concernées par la contrainte de non succession. Nous rappelons que ce sont les mêmes données que pour le cas réel présenté dans le chapitre 4 (cf. tableau IV-13 et tableau IV-1). Nous utilisons le terme « lot » pour désigner un lot élémentaire.

Référence	Famille	Volume référence	Taille d'UC	Lot minimum	Famille	Volume famille	Taille lot famille	Nombre de moteur d'insertion	Non Succession famille i1	Non Succession famille i2
R1	A	48	6	90	A	342	90	0	F	C
R2	A	6	6	90	B	192	60	0	C	F
R3	A	24	6	90	C	330	72	80	G	C
R4	A	264	6	90	D	12	36	24	G	J
R5	B	30	6	60	E	72	36	0	J	F
R6	B	108	6	60	F	12	24	24		
R7	B	54	6	60	G	110	50	24		
R8	C	36	6	72	H	0	30	24		
R9	C	246	6	72	I	48	60	24		
R10	C	28	6	72	J	198	72	80		
R11	D	12	6	36						
R12	E	72	6	36						
R13	F	6	6	24						
R14	F	6	5	24						
R15	G	50	5	50						
R16	G	60	6	50						
R17	I	48	6	60						
R18	J	174	6	72						
R19	J	24	6	72						

Tableau V-1 : Les données du cas industriel

V.4.2. Analyse des résultats

La dernière étape de notre application consiste à construire la liste ordonnée finale de la ligne du montage. En effet, pour chaque lot de famille, il faut attribuer la liste des lots des références qui lui correspond tout en respectant l'ordre de la liste ordonnée des références.

V.4.2.1. Première approche : prise en compte en pré- et en post- traitement des lots non complets

Le tableau V-2 présente la liste finale du cas industriel obtenue par la première approche. Les lots alertés en couleur bleu correspondent aux lots complémentaires des différentes familles. Nous observons par exemple le premier lot de la famille A placé en position 2 qui contient le premier lot de la liste ordonnée des références. Dans ce cas, la taille du lot de R4 est égale à la taille du lot de la famille A à savoir 90. Or, il n'est pas toujours possible d'avoir des tailles identiques. Nous pouvons observer le lot de la famille A placé en position 4. Il contient les lots R1, R2, R3 de la liste ordonnée des références et 12 moteurs seulement du lot R4. Nous découpons la taille du lot de la référence afin de respecter la taille du lot de sa famille. Ce découpage doit respecter obligatoirement la taille d'UC de la référence sans dépasser la taille de la famille correspondante.

Liste ordonnée famille	Taille lot famille	Liste ordonnée références	Taille lot références	Position lot famille
C	72	R9	72	1
A	90	R4	90	2
C	72	R9	72	3
A	90	R1	48	4
A	90	R2	6	4
A	90	R3	24	4
A	90	R4	12	4
C	72	R8	36	5
C	72	R10	36	5
A	90	R4	90	6
C	72	R10	12	7
C	72	R9	60	7
A	72	R4	72	8
C	42	R9	42	9
B	60	R5	30	10
B	60	R6	30	10
J	72	R19	72	11
B	60	R6	60	12
G	50	R15	50	13
B	72	R6	18	14
B	72	R6	52	14
J	72	R19	72	15
G	60	R16	60	16
E	36	R12	36	17
J	54	R19	30	18
J	54	R20	24	18
E	36	R12	36	19
D	12	R11	12	20
F	12	R13	6	21
F	12	R14	6	21
I	48	R18	48	22

Lot complémentaire

Tableau V-2 : La liste finale ordonnée du cas industriel (1ère approche)

V.4.2.2. Deuxième approche : prise en compte dans le programme linéaire des lots non complets

Le tableau V-3 présente la liste finale du cas industriel obtenue par la deuxième approche. De même que dans la première approche, les lots alertés en couleur bleue correspondent aux lots complémentaires des différentes familles. Nous avons au total deux lots supplémentaires par rapport à la première approche à savoir 24 contre 22. Ceci est dû à la gestion différente de la prise en compte des lots complémentaires (cf. IV.4.1). Dans cette approche, les lots complémentaires des familles sont bien placés à la fin de la liste ordonnée contrairement à ce qui a été obtenu dans la première approche. Nous constatons aussi qu'il existe une différence d'ordre entre les listes fournies par les deux approches.

Liste ordonnée famille	Taille lot famille	Liste ordonnée références	Taille lot références	Position lot famille
C	72	R9	72	1
A	90	R4	90	2
C	72	R9	72	3
G	50	R15	50	4
E	36	R12	36	5
I	48	R17	48	6
C	72	R8	36	7
C	72	R10	36	7
J	72	R18	72	8
B	60	R5	30	9
B	60	R6	30	9
C	72	R10	12	10
C	72	R9	60	10
B	60	R6	60	11
G	50	R16	50	12
B	60	R6	18	13
B	60	R7	42	13
G	10	R16	10	14
F	12	R13	6	15
F	12	R14	6	15
J	72	R18	72	16
C	42	R9	42	17
A	90	R1	48	18
A	90	R2	6	18
A	90	R3	24	18
A	90	R4	12	18
D	12	R11	12	19
A	90	R4	90	20
B	12	R7	12	21
J	54	R18	30	22
J	54	R19	24	22
A	72	R4	72	23
E	36	R12	36	24

Lot complémentaire

Tableau V-3 : La liste finale ordonnée du cas industriel (2ème approche)

La deuxième approche convient mieux au besoin des utilisateurs pour deux raisons essentielles :

- le temps de résolution de la deuxième approche est plus court que celui de la première (cf. IV.4.4).

- la gestion des lots complémentaires dans le programme linéaire de la deuxième approche permet de les avoir dans les dernières positions de la liste et d'éviter le risque de violation de la contrainte d'insertion (cf. IV.4.2.2).

En conclusion, c'est la deuxième approche qui sera adoptée.

V.5. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre un prototype d'ordonnancement du montage des moteurs. Ce prototype a été développé afin de formaliser le besoin des utilisateurs sous forme d'un outil informatique d'aide à la décision. Notons que l'expert a toujours la possibilité de respecter ou modifier la liste proposée par l'application. Nous avons décrit le processus et les fonctionnalités de notre application. Ensuite, nous l'avons testée sur un cas réel d'une ligne de montage des moteurs de Trémery, et nous avons analysé les solutions optimales obtenues avec nos deux approches.

Nous avons mis notre application à disposition des utilisateurs. Sa prise en main s'est faite rapidement. Nous nous sommes alors engagés dans une période de test de plusieurs semaines durant laquelle il y a eu plusieurs allers-retours. Ceci a, d'une part, permis d'améliorer l'ergonomie des interfaces. D'autre part, différents cas de figure remontés par les utilisateurs ont permis de faire évoluer les algorithmes proposés afin d'obtenir la version présentée. A la suite de cette période d'essai, les utilisateurs ont validé les algorithmes d'optimisation et de lissage proposés. Les travaux ont été d'ores et déjà intégrés par le service de développement au sein du système d'information de PSA Peugeot Citroën.

CONFIDENTIEL

Conclusion générale

Dans cette thèse, nous avons étudié la planification ainsi que l'ordonnancement de la production au sein des usines de mécanique, en collaboration avec le constructeur automobile français PSA Peugeot Citroën. Ce choix de périmètre des travaux de recherche menés dans le cadre de cette thèse part du constat qu'un écart très important s'est creusé depuis plusieurs années entre la gestion des flux des usines terminales et celle des usines de mécanique.

L'analyse de l'existant réalisé au début de la thèse a permis de cerner et de comprendre les contraintes industrielles des usines de mécanique. Cette étape est une phase stratégique qui nous a permis d'identifier les spécificités de ces usines. Dans ce cadre, nous avons étudié deux cas d'étude qui illustrent de manière pertinente des problématiques auxquelles les usines de mécanique sont confrontées.

Dans un premier temps, nous avons tout d'abord fait un état des lieux au sein de l'usine de production d'amortisseurs et avons mis en évidence la problématique à laquelle le secteur d'usinage des tiges était confronté, à savoir le besoin de mener une planification de la production en prenant en compte le dimensionnement des ressources humaines. Nous avons pu répondre à cette problématique en proposant deux modèles. Le premier est un modèle de planification de la production qui permet d'établir un planning de la production et d'engager un nombre minimum de ressources humaines. Le deuxième modèle permet l'équilibrage de la distribution de la production sur les machines. Les deux modèles proposés sont basés sur une modélisation mathématique en programmation linéaire.

Dans un deuxième temps, nous avons fait un état des lieux du fonctionnement des usines de production de moteurs de PSA Peugeot Citroën. Nous avons mis ainsi en évidence la problématique d'ordonnancement des lignes de montage, marquée par la présence de contraintes de production fortes voire bloquantes. Nous avons recherché un modèle permettant l'ordonnancement de la production des références de moteurs. Il s'agit d'un modèle basé sur une programmation linéaire en nombre entiers. Il permet de résoudre le problème de dimensionnement et de séquençement des lots des moteurs tout en prenant en compte l'ensemble des contraintes industrielles. Il s'agit de trouver la liste ordonnée des lots de références des moteurs. Notre objectif est de chercher la solution optimale qui minimise le nombre total des lots tout en respectant toutes les contraintes.

Malgré le souhait de respecter toutes les contraintes d'ordonnancement, des cas de figures surviennent où aucune solution n'existe. Dans ce cas, notre modèle proposé n'est pas adapté. Nous pouvons proposer comme perspective de futurs travaux de recherche une approche permettant de minimiser des pénalités des viols de contraintes.

Mais au cours de la thèse, le groupe PSA Peugeot Citroën s'est engagé dans une démarche de lissage de la production, qui a fait évoluer nos travaux de recherche. Nous traitons ainsi la problématique d'ordonnancement et de lissage de la production du montage des moteurs au niveau des familles et des références. Il s'agit de proposer une méthode permettant une séquence de lots de familles, chacun des lots étant lui-même une séquence de références. Il s'agit de respecter l'ensemble des contraintes de production et de lisser au mieux la production des familles et des références. Notre démarche consiste à trouver dans un premier temps une séquence qui satisfait toutes les contraintes de production puis dans un second temps de satisfaire au mieux le lissage.

Au niveau des familles, nous avons ainsi proposé deux approches basées sur la programmation linéaire. Elles diffèrent en deux points principaux. Le premier point concerne la notion de positions. Dans la première approche, une position peut être attribuée à plusieurs lots élémentaires ayant une taille fixée à l'avance. Par contre, dans la deuxième approche, une position ne peut être attribuée qu'à un seul lot élémentaire de taille fixée à l'avance. Le deuxième point concerne la gestion d'éventuels lots incomplets. La première approche gère les éventuels lots non complets en pré traitement et en post traitement. La deuxième approche gère les éventuels lots non complets dans le modèle linéaire lui même. L'objectif est de trouver la solution qui étale les lots des familles tout en respectant les contraintes industrielles appliquées aux familles.

Au niveau des références, nous avons proposé une heuristique de lissage appliquée sur chaque famille. L'objectif est de lisser les lots des références tout en respectant les contraintes industrielles appliquées aux références.

Nous avons proposé un outil d'aide à la décision pour l'ordonnancement des montages de moteurs, basé sur les modèles proposés. Une phase de test a été engagée avec les utilisateurs, qui a conduit à la validation des résultats obtenus. Nos travaux ont été implémentés à ce jour dans les systèmes d'information de PSA Peugeot Citroën pour une utilisation au sein de l'usine de production de moteur de Tremery. Un déploiement est prévu à destination de l'usine des boîtes de vitesse et des liaisons au sol.

Ces travaux ont fait l'objet d'une première étude appliquée aux usines de mécanique au sein de PSA Peugeot Citroën. Le chemin est ouvert pour de futurs travaux de recherche. Notons que le groupe développe de nouveaux processus avec le minimum de contraintes industrielles. La notion de lissage de la production prendra alors toute sa dimension. Ceci pourra faire l'objet de futurs travaux de recherche : étudier les problématiques d'ordonnancement de la production en mettant en avant l'objectif d'avoir un lissage optimal. Une deuxième perspective de recherche pourra être d'utiliser d'autres outils que la programmation linéaire afin de résoudre les problématiques d'ordonnancement des moteurs.

CONFIDENTIEL

Bibliographie

Absi N., *Modélisation et résolution de problèmes de lot-sizing à capacité finie*, thèse de doctorat, Université ParisVI, 2005.

Baptiste P., Giard V., Hait A., Soumis F., *Gestion de production et ressources humaines : méthodes de planification dans les systèmes productifs*, Presses Internationales Polytechnique, 2005.

Bernier V., *Sur une nouvelle politique de gestion de flux: le cadencement reséquençable*, thèse de doctorat, INP de Grenoble, 2000, CIFRE PSA.

Chan F.T.S. *Effect of kanban size on just-in-time manufacturing systems*, Journal of Materials Processing Technology 116 (2001) 146-160.1999.

Courtois A., Martin-Bonnefous C., Pillet M., *Gestion de production*, Les éditions d'organisations. 1996.

Document interne PSA, *Référentiel logistique*, novembre 98.

Document interne PSA, *manuel convergence DMB*, mars 2006.

Fakhfakh M., Di Mascolo M., Frein Y., Gourguechon O., *Planning production with sizing of human resources in automotive industry*, 42nd CIRP Conference on Manufacturing Systems, 3 - 5, Juin, France, Grenoble, 2009.

Fakhfakh M., Di Mascolo M., Frein Y., Finke G., Collardey M., *Scheduling of an engine assembly workshop*, International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM' 2011), 25 – 27 Mai, France, Metz, 2011.

Guide d'utilisation, *ILOG AMPL CPLEX system*, Version 11.0, 2008.

Lambersend F., *Organisation et gestion de production : concepts d'optimisation des flux industriels par stock zéro, délai zéro*, Ellipses, 1999.

Lesert A., *Sur l'évaluation de la flexibilité de l'atelier montage d'une usine terminale automobile.*, thèse de doctorat, INP de Grenoble, 2006. CIFRE PSA.

Liker J., *Le modèle Toyota – 14 principes qui feront la réussite de votre entreprise*, Pearson Education France, 2006.

Matzka J., Di Mascolo M., Furmans K., *Buffer Sizing Of A Heijunka Kanban System*, Journal of Intelligent Manufacturing: special Issue on pull systems, Volume 23, Number 1, pp 49-60, February 2012.

Muhl E., *Contribution à la vision globale de l'ordonnancement du flux véhicule : Vers un outil d'aide à la décision. Application pour un grand constructeur automobile*, thèse de doctorat, université Henri Poincaré Nancy1, 2002.

Ohno T., *l'esprit Toyota*, collection « Productivité de l'Entreprise », MASSON, pp 40-56, 1989.

Régin J. C. et Puget. J. F., *A filtering algorithm for global sequencing constraints*. Proceedings of the twelfth national conference on Artificial intelligence, 1994.

Schemeleva K., Dolgui A. et Grimaud F., *Une approche génétique pour un problème de lotissement et de séquençement sous aléas*, MOSIM'10, 2010.

Solnon C., Cung V.D., Nguyen A. et Artigues C., *The car sequencing problem: Overview of state-of-the-art methods and industrial case-study of the ROADEF'2005 challenge problem*, European Journal of Operational Research 191 (2008) 912-927, 2008.

Soulard N., *La méthode KANBAN dans l'industrie automobile actuelle*, note technique, 2002.

Souilah S., *Reengineering du pilotage des flux dans une relation client/fournisseur. Application au cas de l'industrie automobile*, thèse de doctorat, Ecole Centrale de Paris, 2008.

Sugimori Y., Kusunoki K., Cho F. et Uchikawa S., *Toyota production system and Kanban system Materialization of just-in-time and respect-for-human system*, International Journal of Production Research, Vol 15, n°66, 553-564, 1977.

Suon M., *Optimisation de la logistique internationale à horizon stratégique Application à un constructeur automobile*, thèse de doctorat, UNIVERSITE BLAISE PASCAL - CLERMONT-FERRAND II, 2011.CIFRE PSA.

Toso E. A.V., Morabito R., Clark A. R. *Lot sizing and sequencing optimization at an animal feed plant*, Computers & Industrial Engineering 57 (2009) 813–821, 2009.

Twohey S., France A., *A Review of Lean Manufacturing: More than a Tool-Box*, 9th ANZAM Operations, Supply Chain and Services Management Symposium, Deakin University, Geelong, Australia, 2011.

Villeminot A., *Modélisation et simulation de la logistique d'approvisionnement dans l'industrie automobile Application pour un grand constructeur*, thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2004. CIFRE PSA.

Winston, W.L., *Introduction to mathematical programming: operation research*, Volume one, Duxbury Pr Eds, 2003.

Wolosewiz C., *Approche intégrée en planification et ordonnancement de la production*, thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2008.

CONFIDENTIEL

Liste des tableaux

Introduction générale	11
Chapitre I : Le contexte industriel automobile	15
Chapitre II : L'analyse de l'existant.....	35
Chapitre III : Ordonnancement des moteurs	51
Tableau III-1: Les données.....	61
Tableau III-2: Les résultats obtenus par Cplex	62
Tableau III-3: Les résultats obtenus par l'ordonnanceur.....	62
Chapitre IV : Ordonnancement et lissage des moteurs : une approche à deux niveaux	65
Tableau IV-1: Données des familles des moteurs – cas avec 10 familles (1 ^{ère} approche)	76
Tableau IV-2: Liste ordonnée des familles des moteurs – cas avec 10 familles (1 ^{ère} approche)	77
Tableau IV-3: Résultats de la phase post-traitement – cas avec 10 familles (1 ^{ère} approche) ..	78
Tableau IV-4: Données des familles des moteurs – cas avec 8 familles (1 ^{ère} approche)	80
Tableau IV-5: Liste ordonnée des familles des moteurs – cas avec 8 familles (1 ^{ère} approche)	81
Tableau IV-6: Résultats de la phase post-traitement – cas avec 8 familles (1 ^{ère} approche)	81
Tableau IV-7: Données des familles des moteurs – cas avec 10 familles (2 ^{ème} approche)	87
Tableau IV-8: Liste ordonnée des familles des moteurs – cas avec 10 familles (2 ^{ème} approche)	87
Tableau IV-9: Données des familles des moteurs – cas avec 8 familles (2 ^{ème} approche)	90
Tableau IV-10: Liste ordonnée des familles des moteurs – cas avec 8 familles (2 ^{ème} approche)	90
Tableau IV-11: Comparaison des résultats des tests entre les deux approches.....	92
Tableau IV-12: Données d'entrée d'un exemple de 3 références	93
Tableau IV-13: Résultats de l'étape 4 sur l'exemple de 3 références	96
Tableau IV-14: Résultats de l'étape 5 sur l'exemple de 3 références	96
Tableau IV-15: Résultats de l'étape 6 sur l'exemple de 3 références	96
Tableau IV-16: Données des références des moteurs – cas avec 10 familles	97

Tableau IV-17: Liste ordonnée des références de la famille A.....	98
Chapitre V : Un outil d'aide à la décision pour l'ordonnancement.....	101
Tableau V-1: Les données du cas industriel.....	108
Tableau V-2: La liste ordonnée du cas industriel (1 ^{ère} approche)	109
Tableau V-3: La liste finale ordonnée du cas industriel (2 ^{ème} approche).....	110
Conclusion générale	113

CONFIDENTIEL

Liste des figures

Introduction générale.....	11
Chapitre I : Le contexte industriel automobile.....	15
Figure I-1: Une chaîne logistique automobile	18
Figure I-2 : Bobines d'acier	19
Figure I-3 : Points de soudure	19
Figure I-4 : Pose des laques par des robots	19
Figure I-5 : Pose automatisée du pare-brise	19
Figure I-6 : Les flux d'approvisionnements de PSA Peugeot Citroën.....	21
Figure I-7 : Niveaux de décision hiérarchisés.....	24
Figure I-8 : Les niveaux de la planification de la production	26
Figure I-9 : Ordonnancement en journée glissante	30
Figure I-10 : Ordonnancement en journée reproductible	31
Chapitre II : L'analyse de l'existant.....	35
Figure II-1: Les usines de mécaniques et bruts de PSA Peugeot Citroën	36
Figure II-2: Une usine de mécanique	37
Figure II-3: Le mécanisme intérieur d'un amortisseur.....	38
Figure II-4: Les différentes étapes de fabrication des tiges.....	38
Figure II-5: L'atelier d'usinage des tiges d'amortisseurs.....	39
Figure II-6: Une ligne principale de montage de moteurs.....	43
Figure II-7: Une ligne secondaire - Zone AEB d'une ligne de montage de moteurs.....	44
Figure II-8: Une ligne de préparation - Zone Biturbo d'une ligne de montage de moteurs.....	45
Figure II-9: Une Unité de Conditionnement d'un type de moteur	46
Figure II-10: La contrainte de non succession	47
Figure II-11: La contrainte d'insertion.....	48
Chapitre III : Ordonnancement des moteurs	51
Figure III-1: Les contraintes de production au niveau des références de moteurs	53
Figure III-2: Film de production	56
Chapitre IV : Ordonnancement et lissage des moteurs : une approche à deux niveaux.....	65
Figure IV-1: Les listes d'ordonnancement du montage de moteurs au niveau des familles et des références de moteurs	68

Figure IV-2: Les contraintes de production au niveau des familles et des références de moteurs	69
Figure IV-3: Le lissage de la production.....	70
Figure IV-4: Comparaison des deux approches	72
Chapitre V : Un outil d'aide à la décision pour l'ordonnancement.....	101
Figure V-1: Schéma général de l'application.....	102
Figure V-2: Architecture technique de l'application.....	103
Figure V-3: Processus général de l'application.....	104
Figure V-4: Menu principal.....	105
Figure V-5: Fenêtre d'information	106
Figure V-6: Visualisation des résultats	107
Conclusion générale	113

CONFIDENTIEL

Annexe

Planning production with sizing of human resources in automotive industry

M. Fakhfakh^{1,2}, M. Di Mascolo¹, Y. Frein¹, O. Gourguechon²

¹G-SCOP Laboratory, Grenoble INP, UJF, CNRS – UMR5272, Grenoble, France

²PSA PEUGEOT CITROEN, Montbéliard, France

Abstract

In automotive industry, the assembly plants are facing new requirements. These ones result in new constraints and risks for suppliers, such as the components manufacturing plants, which are the object of our study. This paper is dealing with the production planning problem in components manufacturing plants. We thus present two linear models which help the manager in taking the best decisions. The first model makes it possible to establish customers' needs planning for the production workshop with a sizing of human resources. The second enables to balance the production distribution. We apply this tool on real data, coming from a plant producing damper rods, and the obtained results are compared to the current situation.

Keywords:

Components manufacturing plant, production planning, mixed linear programming, human resources.

1 INTRODUCTION

The manufacturing systems are complex, dynamic, stochastic systems with a wide variety of products, processes, production levels, and unforeseen disturbances as well [1]. Because of the high competition that exists in the economical market, it is very important that the costs and the production lead times can be reduced, and that the due dates can be met. In this respect, the goal of the components manufacturing plants is the control of the costs and the improvement of the productivity to bring significant profits in terms of efficiency.

In this paper, emphasis is put up the sector of automotive industry. The production rates and the rhythm of new models development do not cease accelerating, bringing about an increasing sensitivity of the operating processes to the disturbances. In consequence, the assembly plants are facing new requirements. These requirements result in new constraints and risks for the suppliers, like the components manufacturing plants. It clearly appears, both from the increasing number of publications, and from the directions taken by most enterprises in this sector, that working globally on the management and the optimization of flows in assembly plants has become a major issue. We cite the case of PSA PEUGEOT CITROEN. Several works were done during the latter years concerning optimization of logistic costs [2], scheduling of car flows [3], simulation of logistic flows [4]... These works have lead to a better answer to the customer's expectations and needs. But the same kinds of results are still not reached for the components manufacturing plants. In this context of production in constant evolution, the car manufacturers must more and more early take into account manufacturing constraints in their design process. The control and the management resources of production systems cannot be ignored to support a flexible and powerful production process. Today, it is necessary to undertake works aiming at the improvement of the units' production systems in order to answer to their new constraints. Tools are missing for helping their managers in the phase of production flows

control (planning of the needs and human resources allocation).

In automotive industry, many disturbances perturb the components manufacturing plants. These disturbances include: the arrival of new orders, order cancellations, changes in order priority, processing delays, changes in release dates, machine breakdowns, and the unavailability of raw materials, personnel, or tools [1].

The work presented in this paper is done during a CIFRE¹ PhD thesis, in partnership with a car manufacturer. Our primary goal is to provide a new tool for dynamic planning of engagements of the resources (material and human) and production inside a mechanics plant. This tool should enable to answer to the current challenges in automotive industry: very short delivery periods in a context of strong diversity subject to uncertainties.

Many works were done about the planning problem and the management of human resources. We cite some of them in order to illustrate the different aspects of problems treated in our PhD thesis. Beaumont [5] treated a problem of scheduling a workforce. The objective was to find the necessary staff to satisfy the care requests. Cheng and Rich [6] approached the nurse tour problem in a home health. This problem consisted in finding an optimal planning of nurse tour which permitted to minimize the working time costs and to assure the personnel's availabilities. Baptiste et al [7] evoked the production planning problem in the context of orders-contracts. The idea was to rely on capacities flexibility of human resources (offered by the workforce's organization) and the use of stocks in order to assure the optimal management. Borsani et al [8] proposed an integer linear programming in order to plan the human resources and to permit the home cares. The goal was to balance the workload.

In this paper, we treat aspects mentioned above but we base our work on a real industrial case. We study the

¹CIFRE : Industrial Convention of Formation by REsearch

production planning problem in components manufacturing plants. We are interested in the case of a plant which contains a sufficient number of material resources to produce the necessary needs. However, the request remains variable. Consequently, there is a flexibility of human resources. So the frequently asked question is: what is the optimal number of shifts to be engaged? Our aim is: to help the manager in taking the best decisions in order to enhance the productivity of the plant and to better manage the unforeseen disturbances. For that, we decompose our study into two parts: first we establish customer's needs planning for the production workshop with a sizing of workers. It is the so-called optimisation model. Then, once we know the optimal number of workers needed, we look for balancing the production among the machines. It is the so-called balancing model.

The paper is organized as follows. In section 2 we present the problematic and our case study. In section 3 we describe our optimization model of customers' needs planning and we present and discuss the obtained results. In section 4 we describe our balancing model and we comment the obtained results. In section 5 we conclude.

2 THE PROBLEMATIC AND CASE STUDY

2.1. General description

The components manufacturing plants are made up of two types of workshops: assembly and machining workshops. We can have one or more assembly workshops in which the components of mechanical units are assembled and one or more machining workshops in which the necessary components are produced.

As we already said in the introduction, this paper focuses on a machining workshop which does not prove any capacity problem. In view of the variability of customers requests, we find ourselves face to a flexibility of human resources. We treat the case of a workshop producing damper rods. It is a real case study for better explaining our approach. At present time, the planning for the production is done periodically by means of a laborious tool in which

the initial stocks and the uncertainties are not taken into account. Moreover, the planning remains manual. It is summarized with an assignment of needs through a calculation spreadsheet. Approximately three hours are needed for the manager to carry out the estimated monthly engagement, often disturbed because of the fluctuation of customers' request. Moreover, it is not possible to take into account new forecasts during the period.

Because of the great diversity, the complexity of flows, the large volumes and the real time constraint, the plant producing damper rods problem is a complex and difficult problem of production management. So it will be necessary to have a powerful tool. This tool should be capable to provide the results more rapidly and it should be used by the manager as often as necessary.

2.2 The plant and the process

The workshop producing damper rods process is decomposed into three successive stages (before chroming, chroming, and after chroming) separated by buffers stocks (see figure 1). The stage before chroming is also decomposed into three successive operations (hardening, turning, and resurfacing). It consists of five machining lines. The chroming stage contains a chromium installation. The stage after chroming consists of six machining lines (see figure 2). 70 damper rods references and 70 machines are present in this workshop. We differentiate the references according to the diameters and the different lengths of the rod. There exist four types of diameter: diameter 12, diameter 14, diameter 20 and diameter 22.

Production planning consists in determining a tentative plan for how much production will occur in the next several time periods, during a time interval called the planning horizon [9]. In our components manufacturing plants, the production planning problem consists in planning the customers' needs in technical's resources with a sizing of human resources.

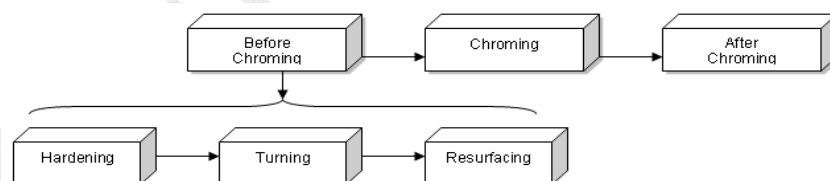


Figure 1: production operations

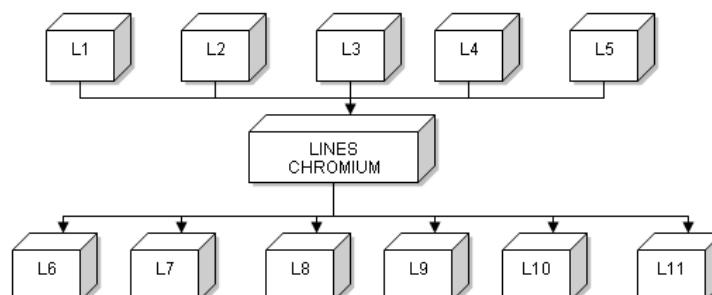


Figure 2: lines production process for the workshop producing damper rods

3 OPTIMIZATION MODEL

In this section, we present the optimization model whose goal is to establish customer's needs planning for the production workshop with a minimum of workers.

3.1 Reference family definition

For each operation, we define families of references. By definition, a family of references is a set of the references which share two common characteristics. The first is: the set of references which can be produced by one or more identical machines. The second is: the level of priority between the machines is the same for all the references.

Example of reference families:

	M1	M2	V.4.1. M3
R1	X		
R2	X	X	X
R3	X	X	X
R4	X	X	
R5	X	X	

Table 1: Production possibilities of references, of one operation, for the references R1, R2, R3, R4 and R5

	M1	M2	V.4.2. M3
F1(R1)	X		
F2 (R2/R3)	X	X	X
F3 (R4)	X	X	
F4(R5)	X	X	

Table 2: Production possibilities of references families

Table 1 presents the production possibilities of the references R1, R2, R3, R4 and R5 on machines M1, M2 and M3. R1 is the only reference that can be produced only on M1. So we create the first family F1 which contains only R1. R2 and R3 both can be done on the same machines M1, M2 and M3. So they are grouped in the same family F2 (see table 2). Finally, R4 and R5 both can be done on the same machines M1 and M2. But for R4, the level of priority of M2 is higher than that of M1. So we can use M1 only as last resort. This high level of priority of M2 is due to the loss of changing times of the necessary tools for adapting M1 to R4. Then for R5, M1 and M2 have the same priority. So we create two families F3 and F4 for R4 and R5. In this paper, we study the after chroming part for which the machines have the same priority.

3.2 General hypothesis

Our approach is based on the following assumptions:

□ The practical average production rate of a machine is defined as the number of pieces produced per hour by the machine. We consider the same cycle time for all the references for one machine. We talk about practical rate because in this rate, we take into account the breakdowns of machine, the scrap of pieces and other little production interruptions.

□ A shift of workers for full-time works 8 hours a day. So a half-shift works 4 hours a day. The number of shifts by machine is the same during all the month.

□ The working days are from Monday to Friday in the considered period. Saturday is a working day in overtime. On Sunday the plant is closed. The period is defined as an integer number of weeks.

Uncertainties on the decisions are currently managed based on the workers experience. The proposed optimization model will make it possible to improve the productivity and to better manage the unforeseen disturbances.

3.3 Simplified problem

3.3.1 Additional hypothesis

In addition of the general hypothesis mentioned in section 3.2, we consider that:

- All the shifts are the same i.e. they have the same number of workers. □
- The machines are independent i.e. one given shift works on one single machine at a time.

3.3.2 Problem modelling

Material resources are fixed. Our purpose is to establish customer's needs planning for the production workshop and calculate the human resources to be engaged in a considered period. We have to be able to produce all the customers' needs expressed in the considered period, by taking into account the problem constraints, with the optimal number of human resources. For that, we will use a linear program.

The linear programming is based only on the variables and the constraints of the problem and aims at finding optimal solutions [10]. To carry out the production planning, we had resort to mathematical modelling by working out a linear program (LP) with mixed variables.

For this, we use the following integer data:

F : Number of references families;

M : Number of machines;

$Nbr1$: Number of days (Monday to Friday) during the considered period;

$Nbr2$: Number of Saturday during the considered period;

N_i : Customers' needs of references family i during the considered period;

$Y_{i,j}$ = Boolean variable used to define the production possibilities for the families (see table 3).
 $\begin{cases} 1 & \text{if references family } i \text{ can be processed by machine } j \\ 0 & \text{else} \end{cases}$

And we use the real data:

$Rate_j$: Practical production rate of machine j per hour.

The Decision Variables are the following:

$X_{i,j}$: Provisional production quantities of reference family i to be done on machine j per period;

NS_j : Number of half-shifts needed each day of the period for machine j ;

$NSover_j$: Number of half-shifts in over time needed each day of the period for machine j .

We introduce the following intermediate variables for helping some intermediate computations:

$Vtotal_j$: Total provisional volume to be done during the considered period on machine j ;

V_j : Provisional volume to be done during the working days (Monday to Friday) of the considered period on machine j ;

$Vover_j$: Provisional volume to be done in over time (Saturday) on machine j ;

By using the notations described above, the LP formulation is the following one:

Objective function:

Minimize the half-shifts number of workers (including those used in over time that are 1.45 times more expensive)

$$\text{Minimize} \quad \sum_{j=1}^M NS_j + (1.45 * NSover_j) \quad (1)$$

Subject to:

Respect of production possibilities of the references families in the machines (using Big M method)

$$X_{i,j} \leq 9999999 * Y_{i,j} \quad \forall i = 1..F$$

$$\forall j = 1..M \quad (2)$$

Satisfaction of customers' needs

$$N_i = \sum_{j=1}^M X_{i,j} \quad \forall i = 1..F \quad (3)$$

Total volume to be engaged including the over time

$$Vtotal_j = \sum_{i=1}^F X_{i,j}$$

$$\forall j = 1..M \quad (4)$$

$$Vtotal_j = V_j + Vover_j$$

$$\forall j = 1..M \quad (5)$$

Production capacity

$$V_j \leq Rate_j * Nbr1 * 24$$

$$\forall j = 1..M \quad (6)$$

$$Vover_j \leq Rate_j * Nbr2 * 24$$

$$\forall j = 1..M \quad (7)$$

Calculation of the number of half-shifts for machine j (this number is equal to the total volume to be done, divided by the maximum volume that can be done by a half shift. It is an integer)

$$V_j \leq (Rate_j * Nbr1 * 4) * NS_j$$

$$\forall j = 1..M \quad (8)$$

Calculation of the number of half-shifts in over time for machine j

$$Vover_j \leq (Rate_j * Nbr2 * 4) * NSover_j$$

$$\forall j = 1..M \quad (9)$$

The aim of this LP is to optimise the production in the workshop producing damper rods with a minimum of workers. The cost of one overtime is more expensive of 45% compared to the cost of one normal work hour, what explains the multiplication of $NSover_j$ by 1.45 in the objective function.

From the results obtained with this model, we can calculate the number of hours in over time for each machine j .

3.3.3 Tests and results

In this part, we propose to solve the mathematical model.

This linear program can be solved by several solvers and we choose the solver Cplex: ILOG OPL V5.2 STUDIO. Cplex is rapid and functional. It is powerful and it contains a complete language of scripts [11]. It comprises a language of modelling and an environment of development integrated to create optimization applications in many industrial fields.

We illustrate the results obtained for one part of the after chroming process. It is composed of 3 machines and 3 references families. It is an extract of the data on a simple case, independent from the rest, in order to illustrate our approach. But the linear program has a vocation to be applied to the whole workshop. (See next section)

Our data are the following:

$$Nbr1 = 16 \quad Nbr2 = 5$$

	M1	M2	V.4.3. M3
F1			X
F2	X	X	
F3		X	X

Table 3: Production possibilities ($Y_{i,j}$)

The optimal solution is obtained with the solver after 2.40 seconds. For confidentiality reasons, we do not show the real data of N_i and $Rate_j$ and we have multiplied all the obtained results by different coefficients.

The results obtained this way are shown in Table 4. The first three rows show the values obtained for variables $X_{i,j}$, for each family F_i and each machine M_j . The last row shows the potential for each machine, i.e., the maximum number of parts that can be done on each machine M_j with NS_j half-shifts.

	M1	M2	V.4.4. M_3
F1	0	0	39760
F2	692810	655780	0
F3	0	1398380	75440
NS_j	6	12	2
V_{total_j}	692810	2054160	115200
V_j	692810	2054160	115200
$Potential_j$	717270	2054160	115200

Table 4: Results obtained with CPLEX

$Vover_j$ and $NSover_j$ are null.

	M1	M2	V.4.5. M_3
F1	0	0	39760
F2	1183060	165530	0
F3	0	1473820	0
NS_j	10	10	2
V_{total_j}	1183060	1639350	39760
V_j	1183060	1639350	39760
$Potential_j$	1195450	1740600	115200

Table 5: current results

$Vover_j$ and $NSover_j$ are null.

Table 5 presents the results obtained manually by the manager. Our linear program enables a profit in the number of half-shifts. This profit is due to the engagement of machine M3 for producing the references family F3. In reality, the managers follow their management habits. In this case, the manager is used to avoid the engagement of F3 on M3 because of the loss of time coming from tools changes. After presenting these results to the manager of the workshop producing damper rods and discussing with him, we concluded that the results obtained with our linear program are applicable. But we observe a saturation of machines

2 and 3. In section 4, we show how we can balance the production between the three machines in order to avoid machines saturations.

3.4 General problem

3.4.1 Hypothesis

In the preceding sections, we presented a simple case, independent from the rest of the problem, in order to illustrate our approach. In this simple case, as we already said, we consider that the shifts are all identical and the machines are independent.

It is true for this part of the workshop, but in the rest of the plant each shift can contain until five workers, according to the machine on which it is affected, and there is dependence between the machines. A worker can be affected to two machines at the same time. So we modify here assumptions mentioned above in order to take these new characteristics into account.

In addition of the general hypothesis mentioned in section 3.2, we consider that:

- The shifts have a variable number of workers depending on the machine to which they are affected.
- A given worker can either be affected to one single machine or to two machines, depending on the machines.
- A given machine has only one shift affected to it.

3.4.2 Problem modelling

Remind that our objective is to be able to produce all the customers' needs expressed in the considered period, by taking into account the problem constraints, with the optimal number of human resources. We present now the modified linear program derived with our new assumptions. For this, we use the same data as those presented in section 3.3.2:

$$F, M, Nbr1, Nbr2, N_i, Rate_j, Y_{i,j}$$

And we add new data:

$Z_{k,j}$ defines the dependant machines (i.e. using the same half shifts).

$Z_{k,j}$ = Boolean variable

$$\begin{cases} 1 & \text{if the same half-shift works on machine k and machine j} \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

If one shift works on different machines at a same time, we count it only once for the calculus of human resources. Therefore, α_j defines the machine on which the shift is affected for the calculus of human resources.

α_j = Boolean variable

$$\begin{cases} 1 & \text{if machine j is the machine that we used for the total calculus of the human resources} \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

Finally, as the number of workers in a shift is variable, we define:

P_j = the number of workers by shift for machine j.

We use the same decision variables as those presented in section 3.3.2

$X_{i,j}, NS_j, NSover_j, Vtotal_j, V_j$ and $Vover_j$.

We use the same LP formulation as the one presented in section 3.3.2 but we modify the objective function which becomes:

Minimize

$$\sum_{j=1}^M \alpha_j * P_j * NS_j * 2 + (P_j * 1.45 * NSover_j * 2) \quad (1')$$

We multiplied the number of half-shifts by 2 in order to get the number of shifts and by P_j in order to take into account the number of workers. Also, we multiplied the result by α_j in order to take into account that one shift can work on two machines at same time.

And we add a new constraint:

$$NS_k = NS_j$$

$$\forall j = 1..M \quad \forall k = 1..M \quad \text{such that } Z_{k,j} = 1 \quad (14)$$

3.4.3 Tests and results

In this section, we apply this new linear model on real data coming from the plant producing damper rods which contains 60 references families and 70 machines. We compare the obtained results to the current situation. For confidentiality reasons, we have multiplied all the obtained results by different coefficients.

	With CPLEX		Current results	
Work shop	Number of shifts	Number of workers	Number of shifts	Number of workers
	87	138	92	146

Table 6: comparison of results

We observe that the optimization model provides the optimal solutions in a few seconds and improves significantly the current situation.

4 BALANCING MACHINES

4.4 Description

In this section, we present the balancing model which aims to balance the production distribution among the machines. We search to maximize the minimum deviation between the maximum volume which can be produced with the minimum number of half-shifts and the volume which we want to be produced by the machine. The model enables to share out in the best way the production among the machines.

4.5 Balancing Model

For this, we use the same data as those presented in section 3.1:

$F, M, Nbr1, Nbr2, N_i, Rate_j, Y_{i,j}$

And we consider NS_j also as a data.

The Decision Variables are the following:

$X_{i,j}$: Provisional production quantities of reference family i to be done on machine j;

Z : The maximum of the minimum deviation between the produced volume and the potential volume.

We introduce the following intermediate variables for helping some intermediate computations:

V_j : Provisional volume to be done during the working days (Monday to Friday) of the considered period on machine j;

$Potential_j$: Provisional volume that can be produced by machine j during the considered period with NS_j half – shifts.

$Deviation_j$: Deviation between V_j and $Potential_j$.

By using the notations described above, the LP formulation is the following:

Objective function:

Maximize the minimum deviation between the provisional engaged volume and the provisional volume really produced by machine

Maximize Z

Subject to:

We keep the same constraints, (2) and (3) as in the preceding model presented in section 3.2 and we add the following constraints:

$$V_j = \sum_{i=1}^F X_{i,j}$$

$$\forall j = 1..M \quad (10)$$

$$Potential_j = Rate_j * Nbr1 * 4 * NS_j \quad \forall j = 1..M \quad (11)$$

$$Deviation_j = \frac{Potential_j - V_j}{Potential_j} \quad \forall j = 1..M \quad (12)$$

$$Z \leq Deviation_j \quad \forall j = 1..M \quad (13)$$

4.6 Tests and Results

For the resolution of the LP, we apply the same solver as the one used for the optimization model.

We apply this tool on the same real data coming from the plant producing damper rods as in section

3.4 (the case of the after chroming part which is composed of 3 machines and 3 references families). We used the same data as in section 3.4 and we use the number of half-shifts by machines like a new data (see table 6)

	M1	M2	M3
NS_j	6	12	2

Table 6: number of minimum half-shifts

	M1	M2	M3
F1	0	0	39760
F2	711190	637400	0
F3	0	1399360	74460
V_j	711190	2036760	114220
Potential	717270	2054160	115200

Table 7: results with CPLEX

The solver provides an optimal solution after 0.79 seconds. Table 7 presents the results with CPLEX. By comparing this solution with the solution obtained using the optimization model, in the previous section, we remark that the machines are not saturated any more. In the same way, we apply this tool on the same real data coming from the whole workshop as in section 3.4.3 and we find also a balancing production distribution with an optimal number of workers. This solution seems interesting for the manager because it enables to have less saturated machines.

5 SUMMARY

In automotive industry, the manufacturing systems know a high continuous competition which gives raise to the current challenge: very short delivery periods in a context of strong diversity subject to uncertainties. In this respect, this article is dealing with the production planning problem in components manufacturing plants. We presented two linear models in order to help the manager to take the best decisions. In the first part, we presented the first model: the optimization model whose goal is to establish customers' needs planning for the production workshop with a sizing of human resources. In the second, we presented the second model: balancing model which aims to balance the production distribution among the machines.

We applied the two linear programs on real data, coming from a plant producing damper rods. The obtained results are better than the current results since they enable to do the same production with less workers. Our tool makes it possible to have the results within a short time, what will give the possibility to the manager to readjust his planning as much as necessary during the considered period.

Finally, in our model we assume that we start from empty stocks at each period. Future research could enable us to take the initial stocks into account.

6 REFERENCES

- [1] Xiang, W., Lee, H.P., 2008, Ant colony intelligence in multi-agent dynamic manufacturing scheduling, *Engineering Applications of Artificial Intelligence* - Elsevier, pp. 73-85.
- [2] Petitjean, F., 2004, Optimisation des coûts logistiques, *Master thesis, Henri Poincaré university - Nancy*
- [3] Muhl, E., 2002, Contribution à la vision globale de l'ordonnancement du flux véhicule: Vers un outil d'aide à la décision, *PhD thesis, Henri Poincaré university - Nancy*
- [4] Villemainot, A., 2004, Modélisation et simulation de la logistique d'approvisionnement, *PhD thesis, Henri Poincaré university - Nancy*
- [5] Beaumont, N., 1997, Scheduling staff using mixed integer programming, *European Journal of Operational Research, Elsevier*, pp. 473-484.
- [6] Cheng E., Rich J.L., 1998, A Home Health Care Routing and Scheduling Problem, *Technical Report TR98-04, Department of Computational And Applied Mathematics, Rice University*.
- [7] Baptiste, P., El Bedoui, K., Moalla, M., 2003, Couplage de la planification a moyen terme a l'ajustement des charges et des capacités dans le contexte des commandes-contrats, *4eme conférence francophone de MODélisation et SIMulation, MOSIM'03, Toulouse*.
- [8] Borsani V., Matta A., Beschi G. and Sommaruga F., 2006, A Home Care Scheduling Model For Human Resources, *International Conference on Service Systems and Service Management, ICSSSM '06, Troyes (France)*.
- [9] Saharidis, G., Dallery, Y., Karaesmen, F. 2003, Centralized versus decentralized production planning, *Fourth Aegean International Conference on Analysis of Manufacturing Systems, Samos Island-Greece, July 1-4 2003*.
- [10] Winston, W.L., 2003, Introduction to mathematical programming: operation research, Volume one, Duxbury Pr Eds.
- [11] User's guide, 2008, ILOG AMPL CPLEX system, Version 11.0.

CONFIDENTIEL

CONFIDENTIEL