



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A/Mira de Béjaïa
Faculté des Sciences Exactes
Département de Recherche Opérationnelle

Mémoire de Master en Recherche Opérationnelle
Option : *Modélisation Mathématique et Techniques de Décision*

Thème

Ordonnancement et Affectation des tâches
du cycle de production :
Cas de l'entreprise Ifri



Soutenu devant le jury composé de :

Promoteur : P^r D. Aïssani
Co-Promotrice : M^{elle} Z. Aoudia
Président : M^r N. Khimoum
Examineurs : M^r S. Ziani
M^{elle} F. Ghellab

Présenté par :

M^{elle} Kadri Samira
M^{elle} Kartout Kahina

Promotion 2014/2015

Remerciements

Tout d'abord, nous devons remercier le Dieu le tout puissant de nous avoir donné tout le courage et la santé pour achever ce travail.

Nous tenons à remercier notre promoteur Monsieur Aïssani Djamil, pour nous avoir suivis durant notre travail, pour ces conseils précieux, pour sa disponibilité et la compétence de son encadrement, qu'elle trouve ici notre reconnaissance et notre respect.

Nous tenons également à remercier notre Co-promotrice Melle Aoudia Zouhra pour ses précieux conseils, ses commentaires et ses encouragements tout au long de ce travail.

Nous remercions aussi notre encadreur de stage Monsieur Guechari Ahacéne pour avoir proposé et dirigé ce travail et dont les conseils nous ont été très précieux.

Nous remercions Monsieur Khimoum Nourdine de nous avoir fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire.

Nous remercions les membres de jury pour avoir accepté de juger ce travail.

Enfin nous remercions nos familles et nos amis pour leurs soutien moral et leurs aides, ainsi que tous ce qui nous avaient soutenu et aidé tout au long de ce travail.

Dédicaces

Je tiens à dédier ce travail à :

La mémoire de mon père, que dieu ait son âme ;

A Ma très chère Mère ;

A Mes sœurs Lila, Assia et son fils Islam ;

A Mes frères Zahir, Boualem et Karim ;

A Mes copines de chambre ;

A Ma binôme Kahina ;

A Tous mes amis (es) et mes collègues de la recherche opérationnelle.

Samira

Dédicaces

Je tiens à dédier ce travail à :

Mes très chers parents, à qui je dois ce que je suis ;

A mes frères et soeurs Nabil, Lyes et Nabila ;

A mes grands parents et à toute ma famille ;

A mes adorables amis (e) Khalida, Fadila, Yasmine, Nacira, Hiba, Farid ;

A ma binôme Samira ;

A toute l'équipe du club scientifique SCOR ;

A tous ceux qui me sont cher avec toute mon affection..

Kahina

Table des matières

Table des matières	iii
Table des figures	v
Liste des tableaux	v
Introduction générale	1
1 Présentation de l'entreprise Ifri	3
1.1 Description de l'entreprise Ifri	3
1.2 L'environnement de la société	4
1.3 Les filiales dérivées de l'entreprise Ifri :	4
1.4 Missions et objectifs de l'entreprise Ifri	5
1.4.1 Missions :	5
1.4.2 Objectifs	5
1.5 La structure organique de l'entreprise Ifri	6
1.6 Processus et chaînes de production de l'entreprise	9
1.6.1 Processus de production :	10
1.6.2 Les différentes lignes de production :	10
1.7 Position du problème	11
2 Approches de résolution pour les problèmes de planification du personnel	13
2.1 Problèmes classiques d'optimisation combinatoire	14
2.1.1 Qu'est ce qu'un problème d'optimisation combinatoire?	14
2.2 Problème d'ordonnancement	14
2.2.1 Eléments de l'ordonnancement	15
2.2.2 Concepts de base	17
2.2.3 Classification des problèmes d'ordonnancement	19

2.2.4	Représentation des problèmes d’ordonnancement	21
2.3	Problème d’affectation	24
2.3.1	Définition d’un problème d’affectation	25
2.3.2	Problème d’affectation simple	25
2.3.3	Problème d’affectation généralisé	26
2.3.4	Techniques de résolution retenues	26
2.4	Gestion du personnel	29
2.5	Problématique de l’équilibrage	30
2.5.1	Méthodes de base de résolution des problèmes d’équilibrage	31
2.6	Conclusion	32
3	Application	33
3.1	Description du problème	33
3.1.1	Qu’est ce qu’un changement de format ?	33
3.1.2	Ligne de production CSD	34
3.2	Modélisation du problème central	35
3.2.1	Élaboration du modèle	36
3.3	Collecte des données	38
3.4	Procédure de prétraitement	43
3.5	Résultats et interprétation	49
	Conclusion générale	57

Table des figures

- 1.1 Organigramme de l'entreprise Ifri 7
- 2.1 Diagramme de Gantt 21
- 3.1 Principe d'une ligne de production CSD (soda) 34
- 3.2 Diagramme de Gantt 41
- 3.3 Le plan de charge de chaque ressource dans la ligne CSD 42
- 3.4 Diagramme de Gantt sans affectation 43
- 3.5 Le plan de charge de chaque ressource dans la ligne CSD après affectation 52
- 3.6 Réseau de PERT 55
- 3.7 Diagramme de Gantt après affectation 56

Liste des tableaux

3.1	Tableau des activités du processus de changement de format	40
3.2	Capacités et disponibilités des ressources	44
3.3	Matrice de compétences	46
3.4	Matrice des temps d'utilisation des tâches par les ressources	48
3.5	Matrice d'affectation	51
3.6	Tableau des tâches du processus de changement après affectation	54

Introduction générale

L'intensification de la concurrence conduit les entreprises à opérer de profonds changements au niveau de leurs productions. Afin de répondre aux exigences des consommateurs, les entreprises alimentaires portent plus d'intérêt à la réduction de leurs coûts de production, à l'amélioration des délais de mise à disposition et à la qualité des produits offerts. Pour rester en lice, l'industriel doit soigneusement concevoir son système de production. Il faut créer un système qui sera à la fois efficace du point de vue de la qualité des produits fabriqués et du point de vue du capital dépensé.

Le problème étudié dans ce mémoire apparaît à l'étape de la conception des lignes de production de différents types quand un nouveau produit (ou une nouvelle famille de produits) avec ses gammes de production sont déjà connus, particulièrement la conception du processus de changement de format. Cette étape suit l'analyse des produits à produire et la planification du processus de production. Les problèmes survenant au stade de la configuration du changement de format sont de nature combinatoire. Le concepteur de la ligne cherche la (les) solution(s) optimale(s) parmi les autres solutions admissibles. C'est une tâche difficile en tenant compte d'une explosion combinatoire des solutions possibles. Ainsi, le choix d'une méthode de résolution dans ces conditions est décisif. La méthode appliquée doit être efficace par rapport à la qualité des solutions obtenues et au temps de calcul.

Dans ce processus, la fonction ordonnancement vise à organiser l'utilisation des ressources humaines pour répondre à une demande ou satisfaire un plan de production préparé par la fonction planification. L'accent dans notre travail est mis sur la modélisation des conflits pour l'utilisation des ressources, il est important d'équilibrer les charges et les capacités de ces derniers avant de faire l'ordonnancement. Un intérêt particulier est porté au problème d'ordonnancement en temps réel des activités du personnel, plus spécifiquement, au problème de planification des ressources travaillant sur une ligne de productions de soda (CSD), cas de l'entreprise Ifri lors d'un changement de format.

Le problème de l'équilibrage consiste à affecter les opérations de production aux ressources de la ligne de façon à équilibrer les charges entre les opérateurs tout en respectant des contraintes de production. Ce problème se pose lors de la conception préliminaire d'une nouvelle ligne, mais également au moment d'un changement important de la production. En effet, une mauvaise affectation des opérateurs aux tâches peut entraîner un temps mort non justifié et donc des coûts supplémentaires inutiles pour chacune des pièces produites. La modélisation du problème porte alors sur des décisions de type "ordonnancement" mais également sur des décisions de type "affectation".

Ce travail est organisé en trois chapitres.

Le premier chapitre est consacré à la présentation structurelle et fonctionnelle de notre lieu de stage (l'entreprise Ifri), notamment le processus de production et les différentes lignes existantes, ainsi que la position du problème.

Dans le deuxième chapitre nous intéressons aux problèmes d'ordonnements et d'affectations, aux multiples méthodes et approches dédiées à la résolution des problèmes de planification du personnel, nous présentons un état de l'art sur le rôle du capital humain dans le processus de conception de lignes de production, nous positionnons ensuite le problème d'équilibrage auquel on aura recours dans notre travail, afin de mieux cerner les différentes approches proposées pour le modéliser.

Dans le troisième et le dernier chapitre, nous considérons le problème de changement de format sur une ligne de production de soda CSD, le fonctionnement de la ligne ainsi que le principe de l'opération changement de format. Tout d'abord, nous proposons une modélisation du problème posé, ce qui nous permettra par la suite de développer un algorithme sous Matlab consistant à affecter un nombre de tâches aux ressources disponibles, de sorte à équilibrer la charge de travail entre ceux-ci afin d'avoir un ordonnancement qui minimise le coût total du changement de format.

Notre travail s'achève par une conclusion générale.

Présentation de l'entreprise Ifri

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la description de l'entreprise Ifri, l'environnement, la structure organique, les objectifs et les missions de la société, les gammes et les filiales dérivées de celle-ci. Une attention particulière est apportée au système de production, le processus ainsi que les différentes lignes de production.

1.1 Description de l'entreprise Ifri

La société à responsabilité limitée (SARL) FILS Ifri est une entreprise de production qui a évolué dans le domaine agro-alimentaire. Elle se situe à Ighzer Amokrane, chef lieu de la commune et daïra d'ifri Ouzellaguen, dans la Wilaya de Béjaïa, qui est connue comme étant une région riche par sa biodiversité et son massif montagneux du Djurdjura. La naissance de cette organisation remonte à l'année de 1986 quand elle était "LIMONADERIE IBRAHIM" crée par les fonds de Monsieur Ibrahim Laid, en 1996, l'entreprise hérite un statut juridique de SNC (Société Non Collective) puis le statut de la SARL (Société à Responsabilité Limitée) composée de plusieurs associées.

Elle est un Pionnier dans l'utilisation du PET (polyéthylène téréphtale) au niveau national. Ifri inaugure son premier atelier d'embouteillage d'eau minérale en bouteille dès le 20 juillet 1996. Durant la même période, plus de 20 millions de bouteilles sont commercialisées sur l'ensemble du territoire national. Ce chiffre atteint 48 millions d'unités en 1999 puis 252 millions de litres en 2004 avant de franchir le cap de 500 millions de litres (emballage PET) en 2005. La société Ifri exploite des lignes de production automatisées et équipées de système de contrôle et de qualité de la dernière génération, dans toutes les unités et à toutes les étapes de la production.

1.2 L'environnement de la société

Environnement de consommateurs et de fournisseurs, avec toutes les contraintes en amont et en aval. La société IFRI opère avec les acteurs économiques tant nationaux qu'étrangers suivants [1] :

- **Les fournisseurs** : il y a deux types de fournisseurs
 - Les fournisseurs de biens (matières premières, pièces de rechange).
 - Les fournisseurs de services (réparation et maintenance).

- **Les consommateurs** : ils représentent la clientèle de la société Ifri, qui couvre la quasi-totalité du pays (national et international, à savoir la France, l'Angleterre, l'Espagne, l'Italie, l'Allemagne, la Belgique, le Luxembourg, le Soudan, le Mali, le Niger et les Emirats Arabes Unis), car elle a mis à sa disposition plusieurs produits de marque et de qualité. Elle dispose de 1500 clients divers (hôtels, dépositaires, les clubs sportifs, aire port d'Algérie).

- **Les concurrents** : Coca-cola, Pepsi, Hammoud Boualem, Star...

1.3 Les filiales dérivées de l'entreprise Ifri :

Marque(s) commercialisée(s) [2] : Ifri (pour les eaux minérales naturelles et boissons diverses).

- **Général Plast** : production de préformes en PET et bouchons en PEHD en col 38mm avec différents grammages.
- **Bejaia Logistique** : extension du parc roulant, elle transport sur toutes distances.

- **SARL Huileries Ouzellaguen** : activité agricole, transformation d'olives et mise en bouteille d'huile d'olive extra vierge.

- **Ifri** : marque commercialisée pour les eaux minérales naturelles, sodas et boissons fruitées diverses avec actuellement près de 80 références.

1.4 Missions et objectifs de l'entreprise Ifri

1.4.1 Missions :

L'entreprise Ifri a pour raison la production et la commercialisation des produits agro-alimentaires. Sa gamme est trop diversifiée, à savoir [1] :

- L'eau minérale naturelle.
- Les sodas.
- Les boissons fruitées.
- Les boissons fruitées au lait.
- Un nouveau produit énergétique.

1.4.2 Objectifs

Classification des objectifs par catégorie [1] :

○ **Economique**

- Développement de la région.
- Amélioration du pouvoir d'achat.

○ **Social**

Baisse du taux de chômage, par l'ouverture de postes de travail.

○ **Environnement**

Son impact sur l'environnement est positif (aucun rejet toxique ou déchets).

Il existe des objectifs stratégiques (à long terme) et des objectifs opérationnels (à court et à moyen termes) :

○ **Objectifs stratégiques**

- Etre leader dans son domaine.
- Avoir plus de postes sur le marché international.

- Assurer la durabilité de l'entreprise et suivre l'évolution du marché des eaux minérales et boissons diverses.

○ **Objectifs opérationnels**

Chaque responsable de service ou direction de la société, doit traduire les objectifs opérationnels

– **Aspect financier**

- Amélioration de la rentabilité de la société.
- Améliorer la trésorerie.
- Augmentation des bénéfices.
- Procéder à des extensions.

– **Aspect commercial**

- Augmenter le chiffre d'affaires, par augmentation des ventes.
- Etre compétitif sur le marché en améliorant le rapport qualité/prix.

– **Aspect production**

Chercher une meilleure production par :

- La maîtrise des outils de production.

1.5 La structure organique de l'entreprise Ifri

La Sarl Ifri est constituée d'une direction générale, un secrétariat, cinq services et huit directions comprenant chacune une ou plusieurs sections représentées dans l'organigramme de l'entreprise [2].

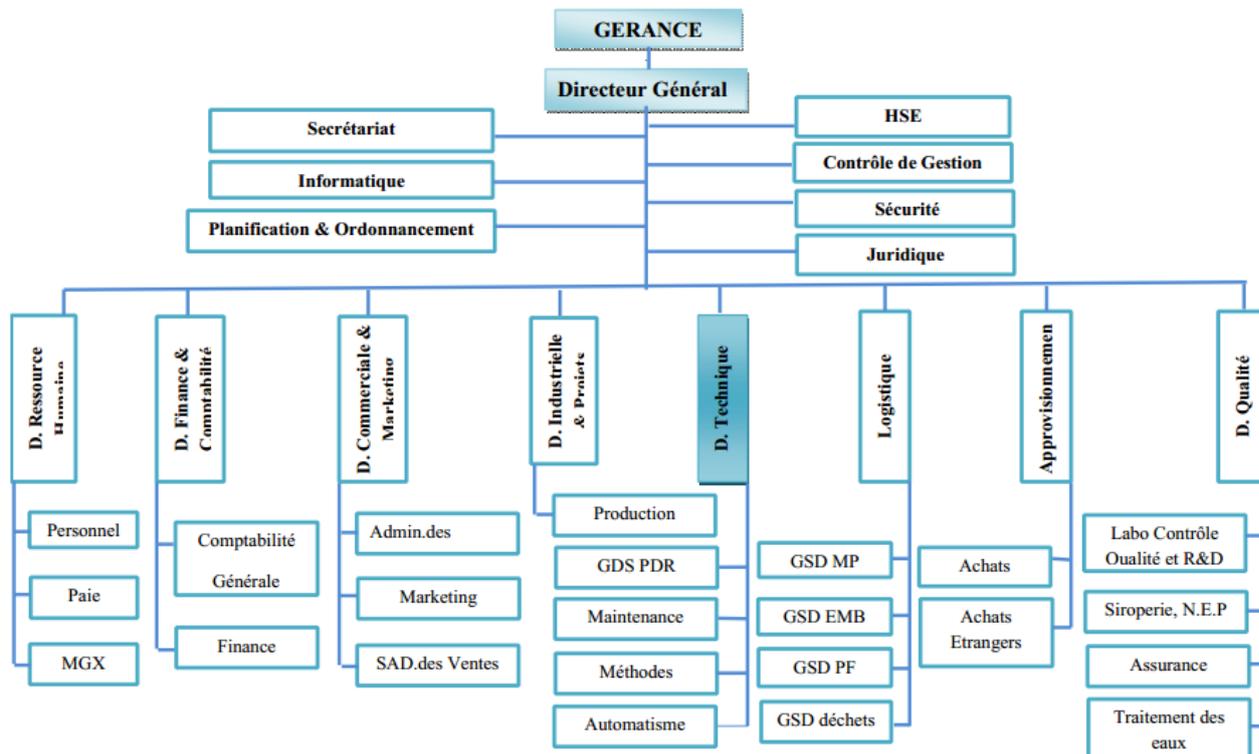


FIGURE 1.1 – Organigramme de l'entreprise Ifri

► **La Direction Générale**

Dirigée par un Directeur Général (DG) qui assure et applique les décisions prises lors des différents conseils d'administration. La Direction Générale d'ifri est le poumon de l'ensemble de la société où tout se coordonne et se décide pour tout ce qui a trait au quotidien et à la politique de gestion de la SARL.

► **La Direction des Ressources Humaines**

Ses sections sont : paie, social, suivie des carrières. Cette direction en plus du règlement des problèmes sociaux du personnel, de la bonne tenue de ses dossiers, et du suivi de ses mouvements, et carrières, élabore également les paies.

► **La Direction Finances et Comptabilité**

Avec ses sections comptabilité générale et finances, son rôle est :

- Assurer la conformité des opérations comptables.
- Etablir les situations financières.

- Planifier les financements et les investissements.
- Gérer les recettes et les dépenses.

► La Direction Commerciale et Marketing

Subdivisé en deux sections, à savoir recouvrement et section facturation, ce service s'occupe de :

- Recevoir les bons de commandes des clients.
- Etablir les pro-formats et les ordres de versement pour les clients.
- Etablir et viser les factures et les bons de livraison.
- Répondre à toute demande de la clientèle sur les plans de qualité et de la quantité.
- Rapprocher le plus possible le produit du consommateur (marketing).
- Etre à la disposition du consommateur pour toute réclamation ou suggestion.
- On y trouve la section vente qui s'occupe de toutes les ventes.

► La Direction Logistique

Cette direction est décomposée en gestion des stocks matières, gestion des stocks produits finis, gestion des stocks emballage, gestion des déchets. Ses principales activités sont :

- La coordination des activités des magasins.
- Veiller à la bonne tenue des stocks.
- Le contrôle des différents documents relatifs aux entrées et sorties dans les divers magasins.
- La gestion des stocks pièce de rechange.

► La Direction Industrielle et Projet

A pour mission principale :

- La production.
- La gestion des projets.
- La gestion des équipements de tous les projets.

► La Direction Technique

Dotée de tous les moyens d'intervention et de trois sections : maintenance, moyens généraux et le laboratoire d'analyse et de préparation des sirops. Il a pour rôle la maintenance des équipements de production en :

- Veillant au bon fonctionnement des équipements de production.
- Réglant les machines.
- Assurant la maintenance et l'entretien des machines et de tous les véhicules.

► **La Direction Approvisionnement**

Cette direction est muni d'un service d'achats locaux et étrangers. Elle prend en charge la gestion des achats, et assure les suivis des commandes jusqu'à leurs réception, en assurant les délais comptabilisés avec l'urgence des besoins aux moindres coûts.

► **La Direction Qualité**

Sa mission principale est :

- La mise en place des procédures de travail de chaque structure.
- Assurer l'établissement, la mise en œuvre et l'entretien des processus nécessaires au système de management de la qualité.
- Représenter l'organigramme auprès des parties externes relatif au système de management de la qualité.

► **Le service planification et ordonnancement**

Est le service où on a effectué notre stage pratique. Son rôle principal est de :

- Etre garant des mouvements des stocks des matières premières et emballages.
- Planifier les tâches de chaque ligne par semaine et par jour.
- Etablir des prévisions de production, et consommation de la matière première.
- Déclarer des achats en matière première et emballages.
- Réaliser et suivre les tableaux de bord pour chaque ligne de production, par volume. par jour, par semaine, par mois, par trimestre, par semestre, et par année.

1.6 Processus et chaînes de production de l'entreprise

Un processus de production, quel que soit, est composé d'un processus technique qui regroupe tous les équipements, les technologies utilisées, les méthodes de transformation des matières premières en produits finis, les méthodes de contrôle et un processus opérationnel qui caractérise plutôt la partie organisationnelle de la fabrication, le management et la formation des équipes, l'organisation du travail et la gestion et l'organisation des flux dans l'usine.

Dans les dernières décennies, le succès incontestable d'applications des nouvelles technologies dans l'industrie a créé l'hypothèse qu'un processus technique innovant apportera toujours et simultanément une augmentation de la productivité de l'usine. Cette hypothèse se transforme très souvent dans un gaspillage des ressources et dans une source de non productivité de l'usine, tout simplement par le fait que le développement du processus opérationnel n'est pas considéré comme une priorité et ignoré par la plupart des entreprises. Un décalage et un dysfonctionnement entre les deux processus est donc inévitable. Actuellement ce décalage est devenu un gaspillage considérable de la capacité de production parce que les personnes des usines ne possèdent pas assez de connaissances pour manipuler et utiliser des machines assez complexes pour assurer une maintenance préventive de ces équipements et bien évidemment pour résoudre les moindres problèmes ou pannes, sans avoir besoin de l'aide d'un technicien. Les entreprises qui développent des processus techniques de plus en plus complexes ne peuvent plus ignorer le développement de leur personnel, de leurs systèmes de gestion de production, de produits ou des activités [3].

1.6.1 Processus de production :

La production se fait sur des chaînes de production. Une chaîne de production est un ensemble de machines en série effectuant des opérations ordonnées, transformant une matière première en un produit fini.

Les produits passent par une succession d'opérations bien définies sur les chaînes de production. La préparation de l'emballage est la première étape de la production. S'il s'agit d'un emballage en PET (Poly Ethylène Terephthalate), la préforme sera transformée en une bouteille PET et si on est en présence d'emballage en verre, un nettoyage des bouteilles s'impose. Les bouteilles ainsi prêtes, passent par la remplisseuse où elles se remplissent du mélange préparé. Ensuite, elles passent par la bouchonneuse, les étiqueteuses puis le dateur. Les bouteilles de verre sont mises dans des caisses et les bouteilles en PET sont emballées sous forme de fardeaux. Les caisses ou les fardeaux sont rassemblés en palettes qui seront dirigées vers les stocks.

1.6.2 Les différentes lignes de production :

La SARL ifri comporte neuf chaînes de production :

- **Chaîne 1** : appelée SASIB, spécialisée dans la production de toutes les bouteilles d'eau minérale de 0.33, 0.50, 1.50 en PET avec un débit de 12000 bouteilles par heure.

- **Chaîne 2** : appelée COMBI 12, elle produit uniquement les bouteilles d'eau minérale en PET de 1.50 avec une cadence de 16800 bouteilles par heure.
- **Chaîne 3** : COMBI 20, elle aussi est spécifiquement spécialisée dans la production des bouteilles d'eau minérale en PET de 1.50 avec un débit de 32000 bouteilles par heure.
- **Chaîne 4** : c'est la KSB, elle produit toute les bouteilles d'eau minérale en PET de 0.30, 0.50 de capacité 45000 bouteilles par heure et un 1.5 litres de capacité 36000 bouteilles par heure.
- **Chaîne 5** : la chaîne CSD, produit toutes les boissons gazeuses (SODA et Eau Minérale Gazifiée) en bouteilles PET avec une capacité de production : 32000 bouteilles par heure pour les bouteilles de 0.33 litre, 28000 bouteilles par heure pour les bouteilles de 1 litre et 1.25 litre, 25000 bouteilles par heure pour les bouteilles de 1.25 et de 2 litres.
- **Chaîne 6** : appelée CRONES 1, cette chaîne est spécialisée dans la production des eaux fruitées en boutielles de verre avec un débit de 25000 boutielles de 0.25 litre par heure et 15000 boutielles de 1 litre par heure.
- **Chaîne 7** : CRONES 2, destinée à produire tous les sodas en bouteilles de verre de capacité de production égale à celle de CRONES 1.
- **Chaîne 8** : on parle de CRONES MIXTE, destinée à produire les bouteilles d'eau minérale et l'eau minérale gazifiée en verre de capacité 12000 bouteilles par heure de 0.25 litre, 10000 bouteilles par heure de 0.50 litre et de 8000 bouteilles par heure de 1 litre.
- **Chaîne 9** : c'est la ligne ASEPTIQUE, spécialisée dans la production des boisson fruitées, jus au lit et le purs jus avec un débit de 36000 bouteilles de 0.20, 0.33, 0.50 litres, 27000 bouteilles de 1 litre et de 20000 bouteilles de 2 litres.

1.7 Position du problème

A l'heure actuelle, la demande du marché est devenue pratiquement imprévisible. Les entreprises ne peuvent plus créer des stocks de produits, pour répondre aux demandes de leurs clients pendant la production d'un autre format de produits, tout simplement parce que ces stocks risquent de ne pas être vendus. Les usines doivent donc développer leur capacité de réagir et de s'adapter à la demande du marché dans un temps réduit. Autrement dit, de réaliser des changements de format sur les lignes de production le plus vite et le plus souvent possible.

La problématique de changement de format est l'expression la plus visible puisqu'elle pénalise directement le rendement des lignes. Un changement de format engendre les arrêts de ligne les plus longs. En effet, durant le temps du changement, la ligne ne produit rien et ainsi

l'usine ne gagne rien. Or cela peut durer plus de trois heures s'il y a besoin d'un nettoyage et jusqu'à deux heures pour des changements qui nécessitent une modification de la configuration de la ligne. Il faut dans ce cas réinstaller une autre machine et la régler. Ensuite, il faut au moins une heure de rodage. Toute-fois, il arrive que des ajustements de réglages soient fait par les opérateurs lors de la mise en route de la ligne. Autant dire que ces temps morts peuvent représenter un souci majeur pour l'usine.

Le temps de réglage permettant de passer d'un format à un autre correspond à l'exécution de multiples opérations (tâches) nécessitant des compétences diverses. Il est donc possible d'optimiser le temps perdu et la surcharge des ressources de façon à régler la ligne de production en affectant les opérations (tâches) aux bons opérateurs aux bons moments, avec pour objectif de minimiser la perte de production engendrée par ce changement et de parvenir à la consommation de ressources la plus efficace sans l'augmentation de la durée totale du procédure.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes structures de l'entreprise Ifri. Dans le chapitre suivant, nous allons présenter quelques éléments théoriques concernant l'ordonnancement et l'affectation.

Approches de résolution pour les problèmes de planification du personnel

La planification du personnel [4] relève de nombreux problèmes d'optimisation. Ces problèmes ressemblent aux problèmes d'optimisation combinatoire classiquement étudiés en recherche opérationnelle, mais présentent également certaines spécificités : issus d'applications réelles, ils sont le plus souvent complexes et de grande taille.

Face à des problèmes réels de grande taille, les algorithmes de programmation linéaire en variables mixtes (continues et discrètes) perdent rapidement leur efficacité. C'est pourquoi, en pratique, pour des problèmes de planification, on se contente souvent de solutions faisables qui remplissent certains critères de qualité, même si elles ne sont pas optimales. Des méthodes approchées sont alors utilisées à la place des méthodes exactes. L'avantage de ces méthodes est qu'elles présentent un très bon rapport entre la qualité de la solution fournie et le temps de calcul.

Dans ce chapitre nous nous intéressons aux problèmes d'ordonnancements [5] et d'affectations, aux multiples méthodes et approches dédiées à la résolution des problèmes de planification du personnel, nous nous présentons ensuite le problème d'équilibrage des lignes auquel on aura recours dans notre analyse, afin de mieux cerner les différentes approches proposées pour le modéliser.

2.1 Problèmes classiques d'optimisation combinatoire

2.1.1 Qu'est ce qu'un problème d'optimisation combinatoire ?

L'optimisation est une branche des mathématiques et de l'informatique en tant que disciplines, cherchant à modéliser, à analyser et à résoudre analytiquement ou numériquement les problèmes qui consistent à déterminer quelles sont la ou les solution(s) satisfaisant un objectif quantitatif tout en respectant un ensemble des contraintes.

Un problème d'optimisation combinatoire (on dit aussi d'optimisation discrète) (POC) consiste à rechercher une solution optimale (optimisation) à un problème comportant un grand nombre de solutions possibles (combinatoire). Dans sa forme la plus générale, un problème d'optimisation combinatoire consiste à trouver dans un ensemble discret un parmi les meilleurs sous-ensembles (ou solutions) réalisables. On cite quelques problèmes classiques d'optimisation combinatoire [6] :

- Problème de sac à dos.
- Problème du plus court chemin.
- Problème de l'arbre de poids minimum.
- Problème d'affectation.
- Problème de voyageur de commerce.
- Problème d'ordonnancement.

2.2 Problème d'ordonnancement

Un problème d'ordonnancement est un problème d'optimisation combinatoire, se pose lorsqu'il s'agit d'organiser dans le temps, l'exécution de diverses tâches soumises à des contraintes et auxquelles sont attribuées des ressources, de manière à satisfaire un ou plusieurs objectifs donnés. Ordonnancer, c'est programmer l'exécution d'une réalisation en attribuant des ressources aux tâches et en fixant leurs dates d'exécution.

Les problèmes d'ordonnancement, apparaissent dans tous les domaines de l'économie, l'informatique, la construction (suivi de projet), l'industrie (problèmes d'ateliers, gestion de production), l'administration (emploi du temps)... . Les tâches sont le dénominateur commun des problèmes d'ordonnancement, il faut programmer ces tâches de façon à optimiser un certain objectif qui sera, suivant le cas, la minimisation de la durée totale (c'est le critère le plus fréquemment employé) ou le respect des dates de commande ou encore la minimisation d'un coût [7]. D'une manière générale, trois types d'objectifs sont essentiels dans la résolution

des problèmes d'ordonnancement : l'utilisation efficace des ressources, un délai d'exécution des tâches aussi faible que possible et le respect des dates d'achèvement prescrites à l'avance.

Un problème d'ordonnancement est composé de façon générale d'un ensemble de tâches soumises à certaines, et dont l'exécution nécessite des ressources. Résoudre un problème d'ordonnancement, consiste à organiser ces tâches, c'est à dire à déterminer leur dates de démarrage et à leur attribuer des ressources, de telles sorte que les contraintes soient respectées.

2.2.1 Éléments de l'ordonnancement

- **Tâche**

Une tâche est un travail élémentaire nécessitant un certain nombre d'unités de temps et de ressources. Ordonner un ensemble de tâches, c'est programmer leur exécution en leur allouant les ressources requises et en fixant leur date de début. Elle est généralement symbolisée par un vecteur (ou arc orienté, ou liaison orientée) sur lequel seront indiqués l'action à effectuer, la date de début t_i , la date de fin c_i et une durée d'exécution p_i . Il existe des tâches successives, simultanées ainsi que convergentes.

Pour chaque tâche on peut calculer une marge, qui correspond au degré de liberté qui caractérise chaque tâche qui qualifie un retard d'exécution ou un début anticipé sans remettre en cause le début d'une autre tâche ou le délai du projet.

- **Ressource**

Une ressource est un moyen, technique ou humain, permettant la réalisation des tâches et dont la disponibilité limitée ou non est connue a priori. On distingue deux types de ressources : les ressources renouvelables et les ressources consommables.

- **Ressource renouvelable** : il s'agit d'une ressource pouvant redevenir disponible en même quantité après avoir été allouée à une tâche (les machines, les hommes, l'équipement,...).
- **Ressource consommable** : il s'agit d'une ressource dont la disponibilité décroît après avoir été allouée à une tâche, par exemple la matière première.

Lorsque plusieurs ressources sont nécessaires simultanément pour assurer la réalisation d'une tâche, on parle de problèmes d'ordonnancement multi-ressources. En revanche,

un problème d'ordonnancement est dit mono-ressource lorsqu'une seule ressource est nécessaire et suffisante pour la réalisation de chaque tâche.

o **Contrainte**

Une contrainte exprime des restrictions sur les valeurs que peuvent prendre conjointement les variables représentant les relations reliant les tâches et les ressources.

– **Contraintes potentielles**

Elle peuvent être de deux sortes, des contraintes d'antériorité et des contraintes de localisation temporelles.

– *Contraintes d'antériorité* : les contraintes d'antériorité traduisent un ordre de réalisation ou d'exécution des tâches. Ainsi une tâche j ne peut être réalisée avant qu'une autre tâche i ne soit achevée. On dira alors que la tâche i précède j ou est antérieur la tâche j . Ceci peut s'écrire comme suit : $t_j - t_i \geq d_i$.

– *Contraintes de localisation* : les contraintes de localisation temporelle concernent des tâches devant débiter impérativement après une date précise α , ce cas s'impose généralement lors d'une commande de matériel ou d'études préalables, on obtient : $t_i \geq \alpha$. Elles peuvent aussi concerner des tâches devant être achevées avant une date précise β , dans ce cas $t_i \leq \beta$.

– **Contraintes de ressources**

Les contraintes de ressources traduisent le fait que les ressources sont disponibles en quantité limitée. On distingue deux types de contraintes de ressources, liées à la nature disjonctive ou cumulative des ressources.

– *Contraintes cumulatives* : ces ressources sont disponibles tout au long d'un projet à une capacité donnée. Une ressource cumulative peut être utilisée par plusieurs tâches en même temps à condition que la capacité disponible ne soit pas dépassée. Dans ce cas l'exécution des tâches en parallèle est possible.

– *Contraintes disjonctives* : elles imposent la réalisation non simultanée de certaines tâches. Une ressource disjonctive ne peut être utilisée que par une seule tâche. Cette contrainte peut imposer une contrainte d'antériorité entre deux ou plusieurs tâches puisque les tâches ne peuvent utiliser la ressources en même temps, dans ce cas l'exécution des ces tâches en parallèle est impossible.

Ces contraintes se manifestent en particulier lorsque les disponibilités en matériel ou personnel sont insuffisantes (ou encore, par exemple, pour satisfaire des raisons de sécurité).

2.2.2 Concepts de base

○ Définition d'un graphe

Un graphe $G = [X, U]$ est déterminé par la donnée :

- d'un ensemble X dont les éléments sont appelés des sommets ou des neuds, le plus souvent symbolisés par des numéros $X = \{1, 2, \dots, i, \dots, j\}$.
- d'un ensemble U dont les éléments $u \in U$ sont des couples ordonnés de sommets appelés des arcs. si $u = (i, j)$ est un arc de G , i (j) est l'extrémité initiale (respectivement terminale) de U . On notera souvent $|U| = V$.

○ Chemin

Dans un graphe, on appelle chemin une suite d'arcs dont l'extrémité terminale d'un arc coïncide avec l'extrémité initiale de l'arc suivant, sauf pour le dernier. Autrement dit, un chemin est une suite consécutive d'arcs dans un graphe orienté, la longueur d'un chemin est la longueur totale des arcs le constituant. Dans le cas d'un graphe non orienté on parle de chaîne.

○ Dates au plus tôt

On appelle date au plus tôt d'un évènement, la date la plus rapprochée pour commencer cet évènement. Elle représente la date à laquelle toutes les activités antérieures à cet évènement doivent être achevées. Pour déterminer les dates de début au plus tôt de chacune des tâches, on effectue la somme des durées en partant du début du projet. En cas de branches ou de tâches convergentes, on choisit la date la plus tard.

○ Dates au plus tard

On appelle date au plus tard d'un évènement, l'ultime date à laquelle toutes les activités antérieures à l'évènement doivent être réalisées de manière à ne pas retarder le projet.

Ces dates sont calculées en partant de la fin du projet, puis en soustrayant la durée de chacune des tâches. En cas de branches ou de tâches divergentes, on choisit la date la plus tôt.

o **Chemin critique**

C'est le chemin qui relie les activités dont les dates au plus tôt sont égales aux dates au plus tard, Ce chemin est composé des tâches qui ont la valeur de la marge totale est nulle. Il détermine la durée globale du projet. Tout retard de l'une quelconque de ses activités ou tâches se répercutera sur la durée totale du projet si aucune mesure corrective n'est entreprise, un projet peut avoir plusieurs chemins critiques, parallèles.

o **Tâche critique**

Si tout retard dans l'exécution de cette tâche se répercute automatiquement (par un retard égal) dans la durée de réalisation du projet, on dit alors que cette tâche est critique.

o **Tâche fictive**

Afin de représenter fidèlement les relations d'antériorités, il est parfois nécessaire d'introduire dans le réseau des activités fictives (elles sont représentées par une flèche en pointillée) qui ne correspondent donc à aucune activité réelle et dont la durée est par définition égale à zéro.

o **Marges**

Délai (retard) d'une tâche sans conséquence sur le projet. La marge de chaque tâche est défini comme la différence entre la date de début au plus tard de la tâche et sa date de début au plus tôt.

- *Marge totale* : C'est la distance en unités de temps qui sépare la position au plus tard d'une tâche de sa position au plus tôt d'une activité. C'est la durée maximale de retard qui n'influence pas le déroulement normal du projet et tout retard qui s'étendrait au delà de cette marge se répercuterait sur la durée totale du projet.

- *Marge libre* : La marge libre d'une activité est le retard maximal sur cette activité non critique sans affecter la date au plus tôt des opérations ultérieures. La marge libre d'une activité est le délai qui s'écoule entre sa date de fin au plus tôt et la date de début au plus tôt de la tâche suivante la plus proche.
- *Marge certaine* : La marge certaine d'une activité est le retard maximal sur cette activité non critique sans affecter la date au plus tôt de l'évènement final de cette activité sachant l'activité démarre à sa date au plus tard.

2.2.3 Classification des problèmes d'ordonnement

Une classification des problèmes d'ordonnement peut s'opérer selon le nombre de machines et leur ordre d'utilisation pour fabriquer un produit (gamme 1 de fabrication) qui dépend de la nature de l'atelier. Un atelier se définit par le nombre de machines qu'il contient et par son type. Les différents types possibles sont les suivants [8] :

a) Problèmes à machine unique

Un problème à machine unique est un problème dans lequel les tâches sont effectuées par une machine en exemplaire unique. Il faut alors décider dans quel ordre les tâches sont effectuées sur cette machine, celle-ci ne pouvant traiter qu'une seule tâche à la fois. Ces problèmes d'ordonnement sont sans doute ceux qui ont été le plus étudiés dans la littérature puisqu'ils sont à la fois suffisamment simples pour pouvoir établir des propriétés fortes et à la fois composants de problèmes plus complexes et largement représentés dans des contextes industriels variés. Il est ainsi courant de considérer un problème à machine unique comme relaxation de problèmes plus complexes.

b) Problèmes à machines parallèles

Un problème à machines parallèles est un problème où les tâches peuvent être exécutées par plusieurs machines. Deux types de décisions doivent être prises lors de la résolution de tels problèmes : l'affectation des tâches aux machines et le séquençement des tâches affectées sur chacune des machines.

On distingue ici généralement le cas des machines identiques, proportionnelles et non reliées. Les machines sont dites identiques lorsque toutes les machines peuvent

exécuter indistinctement toutes les tâches et que la durée d'exécution de la tâche reste la même selon la machine qui l'exécute. Les machines sont dites proportionnelles lorsqu'elles sont caractérisées par une vitesse d'exécution des tâches. Et dites non reliées lorsque le temps de traitement d'une tâche dépend à la fois de la tâche et de la machine sur laquelle cette tâche est affectée.

c) Problèmes de type Flowshop

Appelés également ateliers à cheminement unique, En flow shop, tous les jobs visitent les machines dans le même ordre, avec des durées opératoires pouvant être différentes. Les machines sont disponibles sur tout l'horizon de planification et elles ne peuvent exécuter qu'une seule opération à la fois. Par ailleurs, une opération ne peut s'exécuter que sur une seule machine à la fois. En pratique, ce cas est fréquemment rencontré; citons l'exemple d'une chaîne de fabrication ou de montage.

d) Problèmes de type job-shop

Appelés également ateliers à cheminement multiple, chaque travail passe sur les machines dans un ordre fixé, mais, à la différence du flow shop, cet ordre peut être différent pour chaque travail. Chaque job possède donc une gamme spécifique. Il s'agit ici de déterminer les dates de passage sur différentes ressources des jobs ayant des gammes différentes dans l'atelier. Ces jobs partageant des ressources communes, des conflits sont susceptibles de survenir, résultant des croisements des flux. Dans son expression la plus simple, le problème est donc de gérer ces conflits tout en respectant les contraintes données, et en optimisant les objectifs poursuivis.

e) Problèmes de type open-shop

Ce type d'atelier est moins contraint que celui de type flow-shop ou de type job-shop. Ainsi, l'ordre des opérations n'est pas fixé a priori; le problème d'ordonnancement consiste, d'une part, à déterminer le cheminement de chaque produit et, d'autre part, à ordonnancer les produits en tenant compte des gammes trouvées, ces deux problèmes pouvant être résolus simultanément. Comparé aux autres modèles d'ateliers, l'open-shop n'est pas couramment utilisé dans les entreprises.

2.2.4 Représentation des problèmes d'ordonnancement

Il existe trois sortes de représentations possibles d'un problème d'ordonnancement : le diagramme de Gantt, le graphe Potentiel-Tâches et la méthode PERT [9].

a) Diagramme de Gantt

Au début du siècle dernier, le gouvernement américain déclara la guerre à l'Allemagne, Gantt développa alors, une représentation graphique de déroulement des projets, qui prit plus tard le nom de diagramme de Gantt du nom de son inventeur Henry L. Gantt. Le diagramme de Gantt ou diagramme à barres est un outil permettant de modéliser la planification des tâches nécessaires à la réalisation d'un projet. Etant donné la facilité relative de lecture des diagrammes de Gantt, cet outil est utilisé par la quasi-totalité des chefs de projet dans tous les secteurs. Il permet de représenter graphiquement l'avancement du projet et constitue également un bon moyen de communication entre les différents acteurs d'un projet. Deux types de diagramme de Gantt sont utilisés : Gantt ressources et Gantt tâches (voir la figure) :

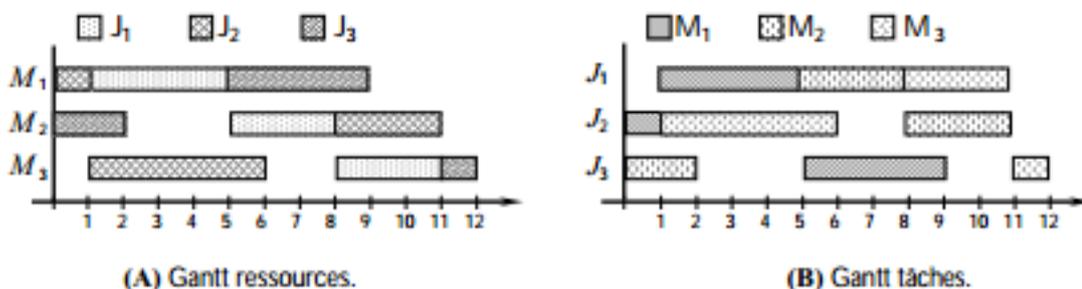


FIGURE 2.1 – Diagramme de Gantt

- Le diagramme de Gantt ressources, est composé d'une ligne horizontale pour chaque ressource (machine). Sur cette ligne, sont visualises les périodes d'exécution des différentes opérations en séquence et les périodes de l'oisiveté de la ressource.
- Le diagramme de Gantt tâches , permet de visualiser les séquences des opérations des tâches en représentant chaque tâches par une ligne sur laquelle sont visibles, les périodes d'exécution des opérations et les périodes où la tâche en attente des ressources.

b) Graphe Potentiel-Tâches

La méthode des potentiels a été développée vers la fin des années 50 par le français Bernard Roy et publiée dans la revue Métra. Parallèlement à la méthode PERT. Elle est appelée également la méthode MPM (méthode des potentiels Metra) ou encore méthode des potentiels -tâches. Ce outil graphique a été développé grâce à la théorie des réseaux de Pétri qui ont surtout servi à modéliser les systèmes dynamiques à événements discrets. Dans ce genre de modélisation, les tâches sont représentées par des nœuds et les contraintes par des arcs. les arcs disjonctifs indiquant les contraintes de ressources.

La méthode permet de construire un graphe orienté valué représentant un problème d'ordonnancement selon les principes suivants :

- Chaque tâche à ordonnancer est représenté par un sommet du graphe,
- On ajoute deux sommets, l'un représentant le début de l'ordonnancement, l'autre représentant la fin, ces deux tâches sont de durées nulles ;
- Toute contrainte d'antériorité entre deux tâches est représentée par une arête orientée de la tâche antérieure vers la tâche postérieure,
- La tâche représentant le début est considérée comme antérieure à toutes les tâches initiales ; c'est donc une source du graphe (source unique),
- La tâche représentant la fin est considérée comme postérieure à toutes les tâches initiales ; c'est donc un puits du graphe (puits unique),
- La valuation d'une arête est égale à la durée de la tâche origine de l'arête (donc, toutes les arêtes issues d'un même sommet ont même valuation), Afin de ne pas alourdir le graphe, on évite le plus souvent de créer des arêtes inutiles, en particulier :
- On ne crée pas d'arête entre la tâche début et toute tâche ayant déjà dans le problème initial des tâches nécessairement antérieures,
- On ne crée pas d'arête entre toute tâche ayant déjà dans le problème initial des tâches nécessairement postérieures et la tâche de fin. En effet, ces contraintes peuvent se retrouver par fermeture transitive du graphe de précédence.

c) Modèle PERT

PERT (Project Evaluation and Review Technique - Technique d'Elaboration et de Contrôle des Projets) [7] est une méthode de planification développée par le marine

américaine dans les années 50 pour un projet de grande dimension. Le PERT s'adapte à tout problème décomposable en activité elle-même soumises à des contraintes d'antériorités. De même, les ressources sont supposées disponibles, les durées des activités indépendantes. C'est l'outil le plus utilisé en planification, son utilisation s'élargie à d'autres domaines : construction d'immeubles, montage des fusées inter planaires, travaux administratifs, travaux industrielles,...

La méthode s'appuie en grande partie sur une représentation graphique qui permet de bâtir un réseau "PERT". Cette technique s'attache surtout à mettre en évidence les liaisons qui existent entre les différentes tâches d'un projet et à définir le chemin dit "critique", constitué de l'ensemble des opérations critiques.

○ **Le graphe PERT est composé d'étapes et d'opérations.**

- On représente les étapes par des cercles qui marquent l'aboutissement d'une ou de plusieurs tâches. Ces cercles sont numérotés afin de suivre l'ordre de succession des divers évènements.
- On représente les activités (les tâches) à effectuer par des arcs (flèches) auxquels est associé des chiffres qui représente la durée de la tâche, où les activités peuvent être :
 - Successives : elles se déroulent les unes après les autres, séparer par des étapes,
 - Simultanées : elles se déroulent en même temps,
 - Convergentes : elles aboutissent à une même étape.
- Un PERT possède un seul sommet de début, un seul sommet de fin.

○ **L'outil PERT a comme objectifs :**

- Elle vise à connaître, à chaque instant de son exécution, l'état d'avancement d'un projet et à prévoir l'influence d'événements extérieurs sur la suite de son déroulement et la correction continue des données initiales qu'elle induit permet d'optimiser les conditions de réalisation du projet.
- Le PERT est un outil permettant d'élaborer, mettre à jour et suivre un projet.
- Le PERT permet de visualiser la chronologie et la dépendance des différentes opérations à mener pour aboutir à la réalisation d'un projet. Il permet de définir : l'ordonnement des actions à mettre en œuvre, ainsi que de déterminer le temps minimum global nécessaire pour réaliser l'ensemble des opérations.

○ **Critères à respecter :**

- Le moins possible d'étapes en l'air, i.e. sans prédécesseur ou sans successeur ; cela conduit à faire un réseau avec une seule étape début (sans tâche prédécesseur) et une seule étape de fin (sans tâche successeur).
- Pas de tâches réelles en double : si deux tâches risquent de constituer un doublon parce qu'elles ont toutes les deux la même étape début et la même étape fin, on crée artificiellement une étape pour le début ou la fin d'une des deux tâches.
- Le moins possible de tâches fictives : je n'en utilise que si la logique ou si l'identification univoque d'un arc au moyen du couple nécessairement unique de ses étapes début et fin l'exigent.
- Aucun croisement d'arc de tâches réelles : seules les tâches fictives peuvent croiser d'autres arcs.
- Aucun passage d'arc de tâche fictive sur les cercles des étapes. En effet, le numéro d'étape, situé au centre du cercle, risque de plus être lisible.

2.3 Problème d'affectation

Le problème d'affectation est largement traité soit de manière dépendante des autres problèmes de niveau hiérarchique plus élevé, tels que les problèmes d'ordonnement ou de planification, soit de manière indépendante. Pour une meilleure représentation des problèmes réels, plusieurs modélisations ont été proposées, cherchant à inclure de nombreuses contraintes. Les principales contraintes relèvent de la disponibilité des employés, de leur adéquation aux tâches devant être exécutées, de la performance qu'ils engendrent. Il semble que les contraintes de disponibilité sont les contraintes les plus souvent prises en compte dans les études bibliographiques, particulièrement, lorsque le problème d'affectation est étudié simultanément avec un problème d'ordonnement. [10] qui traitent le problème d'ordonnement de n tâches non préemptives sur m machines parallèles identiques en présence d'opérateurs en vue de minimiser le critère du makespan, où les affectations sont réévaluées en fin de tâche pour deux sous-problèmes sachant que le nombre d'opérateurs étant inférieur à celui des machines. Pour ce faire une présentation de plusieurs heuristiques des deux sous-problèmes, une simulation est ensuite entreprise pour évaluer la performance de ces heuristiques. L'article [11] traite le problème d'affectation multicritère de tâches à des unités hétérogènes de traitement avec contraintes d'incompatibilité et de capacité. Dans [12] les auteurs proposent une affectation dynamiquement de la charge aux ressources adéquates en donnant à l'expert du service de maintenance le choix entre les solutions les plus intéressantes

telle que chacune des tâches doivent être réalisées est caractérisée par une compétence requise. La résolution ce problème d'affectation et d'ordonnancement nous conduira donc à trouver la bonne ressource et la bonne date de traitement de la tâche. [13] estime les niveaux des compétences acquises par les ressources humaines que ceux des compétences requises par les différentes tâches et propose une affectation qui permet d'assurer une meilleure correspondance entre les exigences des tâches et les compétences acquises par les ressources humaines tout en respectant au mieux leurs préférences.

2.3.1 Définition d'un problème d'affectation

Le problème d'affectation consiste à trouver des liens entre les éléments de deux ensembles distincts, de manière à minimiser un coût et à respecter des contraintes d'unicité de lien. En théorie des graphes, un problème d'affectation simple peut être vu comme un problème de couplage parfait dans un graphe biparti. Un graphe G s'appelle biparti si l'on peut diviser ses sommets en deux sous-ensembles X_1 et X_2 avec aucune arête de type (i, j) avec i et j dans X_1 ou bien i et j dans X_2 . On appelle couplage d'un graphe G un sous-ensemble d'arêtes non adjacentes deux à deux [14].

2.3.2 Problème d'affectation simple

Soit un ensemble de m tâches qui doivent être exécutées par n opérateurs, $n \geq m$. Chaque couple (opération i , ressource j) ($i = 1$ à m , $j = 1$ à n) a un coût associé $c_{i,j}$, qui représente la dépense associée à la réalisation de l'opération i par la ressource j . En supposant que chaque opération doit être exécutée une seule fois et que chaque ressource est utilisée au plus par une seule opération, le problème peut être modélisé de la manière suivante :

$$\min \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{i,j} x_{i,j} \quad (2.1)$$

$$\text{sous : } \sum_{j=1}^n x_{i,j} = 1; \quad \forall i = 1, \dots, m \quad (2.2)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{i,j} = 1; \quad \forall j = 1, \dots, n \quad (2.3)$$

$$x_{i,j} \in 0, 1; \quad \forall i = 1, \dots, m, \forall j = 1, \dots, n \quad (2.4)$$

où $x_{i,j}$ est une variable binaire associée à chaque paire (opération i , ressource j) et qui vaut 1 si l'opération i est effectuée par la ressource j et 0 sinon Si l'on considère que X_1 représente l'ensemble des opérations ($|X_1| = m$) et X_2 l'ensemble des ressources ($|X_2| = n$) du problème (2.1) – (2.4), avec $m \leq n$ alors chaque arête entre un sommet i de X_1 et un sommet j de X_2 signifie que l'opération i peut être effectuée par la ressource j . On associe à chacune de ces arêtes un coût égal à $c_{i,j}$.

2.3.3 Problème d'affectation généralisé

Dans un cadre plus général, où par exemple les ressources sont agrégées, la contrainte (2.3), appelée contrainte de capacité, n'est plus suffisante pour décrire l'utilisation des ressources. Dans ce cas, une ressource j est caractérisée par sa capacité b_j et chaque opération i nécessite la quantité de ressource $a_{i,j}$ si elle utilise la ressource j . La contrainte (2.3) devient :

$$\sum_{i=1}^m a_{i,j}x_{i,j} \leq b_j; \quad \forall i = 1, \dots, m, \forall j = 1, \dots, n$$

La formulation du problème d'affectation généralisé est alors la suivante :

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{i,j}x_{i,j} \\ \text{sous :} \quad & \sum_{j=1}^n x_{i,j} = 1; \quad \forall i = 1, \dots, m \end{aligned} \quad (2.5)$$

$$\sum_{i=1}^m a_{i,j}x_{i,j} \leq b_j; \quad \forall j = 1, \dots, n \quad (2.6)$$

$$x_{i,j} \in \{0, 1\}; \quad \forall i = 1, \dots, m, \quad \forall j = 1, \dots, n \quad (2.7)$$

où, la contrainte (2.5) impose à chaque tâche d'être affectée exactement à une machine, et la contrainte (2.6) assure que la capacité de chaque machine sera respectée. La contrainte (2.7) définit le domaine des variables de décision.

2.3.4 Techniques de résolution retenues

Le problème d'affectation simple (2.1) – (2.4) est parmi les problèmes combinatoires les plus faciles à résoudre. En effet, sa matrice de contraintes pour les contraintes (2.2) – (2.3) a la propriété d'unimodularité. Les contraintes binaires (2.4) peuvent donc être remplacées par les contraintes de la relaxation continue suivante sans changer la solution optimale du problème qui est naturellement binaire.

$$0 \leq x_{i,j} \leq 1; \quad \forall i = 1, \dots, m, \forall j = 1, \dots, n \quad (2.8)$$

a) L'algorithme de Busacker et Gowen

Un problème d'affectation ou de couplage maximal dans un graphe biparti peut être modélisé comme un problème de flot ; ainsi, la recherche d'une affectation optimale revient à la recherche d'un flot maximal de coût minimal. C'est un problème classique de la théorie des graphes qui cherche à faire passer un débit maximal à travers un réseau à moindre coût. L'algorithme de Busacker et Gowen [14] est une méthode simple et efficace pour

trouver un tel flot. ce dernier part d'un couplage initial non vide, obtenu en cherchant les chaînes alternées améliorantes réduites à une arête, on affecte chaque sommet de X à son premier successeur libre, c'est-à-dire n'étant pas déjà extrémité d'une arête du couplage : il part d'un flot nul et il l'augmente progressivement, par recherche des chaînes augmentantes.

A partir de cette affectation initiale, on cherche les chaînes améliorantes, par une exploration en largeur du graphe. Cette recherche vise à améliorer la solution trouvée par l'affectation initiale, puis la solution courante, par l'augmentation de la cardinalité du couplage. On part toujours d'un sommet insaturé de X et on s'arrête à la plus courte chaîne trouvée. On va explorer les sommets alternativement (un sommet de X , un sommet de Y ...), de manière que la chaîne ait une arête hors du couplage, puis une arête dans le couplage. L'algorithme s'arrête quand il n'arrive plus à trouver des chaînes améliorantes.

b) L'algorithme hongrois

Un cas particulier du problème d'affectation, souvent traité dans la littérature est celui où le nombre des opérations à effectuer est égal au nombre des ressources utilisées.

En effet, tout problème d'affectation simple peut être mis sous cette forme par introduction d'opérations fictives à coût nul pour toutes les ressources dans le cas $m \leq n$, ou de ressources fictives à coût nul pour toutes les opérations dans le cas $m \geq n$. Une méthode de résolution du problème d'affectation qui prend en compte cette structure est l'algorithme hongrois. Développé en 1955 par H.W.Kuhn, l'algorithme hongrois [14] est un algorithme dual qui utilise la modélisation sous forme de programme linéaire du problème d'affectation. Toutefois, il peut être vu comme une variante de l'algorithme de Busacker et Gowen, spécialisée pour la structure bipartite du graphe. Du fait de sa grande efficacité sur ce type de problème, c'est l'algorithme de référence en Recherche Opérationnelle pour résoudre le problème d'affectation. Son principe est basé sur le fait que les couplages de poids minimal dans le graphe du problème primal sont exactement les couplages de cardinalité maximale dans le graphe du problème dual. Une schématisation simpliste de l'algorithme hongrois pourrait être la suivante :

- Etape 1 : On crée la matrice des coûts $C_{i,j}$ ($i = 1 \dots m, j = 1 \dots n, m = n$) initiale, qui est considérée non négative.
- Etape 2 : Pour chaque ligne de la matrice, on trouve l'élément minimal et on le soustrait à tous les éléments de cette ligne. S'il reste des colonnes sans coefficients nuls, pour

chacune de ces colonnes, on trouve l'élément minimal et on le soustrait à tous les éléments de cette colonne.

- Etape 3 : On cherche une affectation admissible en vérifiant si, pour chaque ligne et chaque colonne il existe exactement une case marquée. Si oui, l'affectation trouvée est optimale. Sinon, on trace des traits (en nombre minimal) sur les lignes et les colonnes de la matrice, pour couvrir tout les 0 au moins une fois.
- Etape 4 : On cherche l'élément minimal non marqué. On le soustrait à tous les éléments non marqués et on l'additionne à tous les éléments marqués deux fois (tous les éléments qui se trouvent à l'intersection de deux traits). On retourne à Etape 3.

c) Méthode de relaxation Lagrangienne

Pour résoudre un problème d'affectation généralisé, on peut chercher à le transformer en un problème d'affectation simple et ensuite résoudre ce problème. Une méthode fréquemment utilisée pour ce genre de transformation est la relaxation Lagrangienne. En dualisant la contrainte (2.5), le critère (2.1) est remplacé par l'expression lagrangienne suivante [14] :

$$L = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{i,j} x_{i,j} + \sum_{j=1}^n \lambda_{i,j} (\sum_{i=1}^m a_{i,j} x_{i,j} - b_i).$$

En relaxant les contraintes de capacité (2.6) et en pondérant leur non-respect, on a à résoudre un problème d'affectation simple, avec les paramètres de coûts $C_{i,j}$ remplacés par les paramètres $C'_{i,j}$ définis par :

$$C'_{i,j} = C_{i,j} + \lambda_{i,j} a_{i,j}.$$

Le choix des valeurs numériques, nécessairement non négatives, des variables duales $\lambda_{i,j}$ est bien sûr très important, car la solution optimale du problème d'affectation généralisé est obtenue pour les valeurs optimales de ces variables duales. Des valeurs candidates pour les paramètres $\lambda_{i,j}$ peuvent être obtenues en résolvant le problème d'affectation généralisé dans lequel les contraintes binaires sur les variables ont été relaxées. Cela revient à résoudre le problème en remplaçant (2.4) par (2.8) :

$$0 \leq x_{i,j} \leq 1; \quad \forall i = 1, \dots, m, \forall j = 1, \dots, n.$$

2.4 Gestion du personnel

La force de travail est représentée par l'ensemble des opérateurs, appelés aussi agents, susceptibles de couvrir la charge de travail. Elle est constituée de différentes classes de personnel, les caractéristiques de base du personnel sont l'effectif et la disponibilité et les qualifications.

L'effectif: Dans une approche plus opérationnelle, l'effectif de chaque classe de personnel est contraint en nombre et en disponibilité. Vu la limitation en nombre des agents, il est possible que la charge de travail ne puisse pas être couverte entièrement. D'où l'objectif de répartition de la charge du travail est essentiel, de manière à respecter les contraintes liées à la réglementation du travail et aux disponibilités des agents, tout en prenant en compte leurs compétences.

La disponibilité: Pour qu'un agent puisse effectuer une tâche, il doit être disponible pour cette tâche. Il faut voir la disponibilité sous deux angles : d'un côté, la prise en compte des éventuelles activités pré-affectées et d'un autre côté la prise en compte des indisponibilités (congé, arrêt maladie,...) de chaque agent.

Les qualifications. Un agent peut avoir une seule qualification ou peut être multiqualifié. Il est possible que les qualifications soient hiérarchisées, il faut respecter certaines limites pour ce genre d'affectation.

La reconnaissance du rôle important du capital humain dans les problématiques liées à la conduite des processus industriels est justifiée davantage par une diversité de travaux de recherche qui s'est intéressée soit à l'intégration conjuguée des compétences et des préférences, soit à l'intégration de l'une des deux caractéristiques humaines (compétences ou des préférences dans les problèmes d'affectation, de planification ou d'ordonnement. On cite Néanmoins, les travaux existants concernent, essentiellement, la planification dans le secteur hospitalier en définissant la compétence comme une différence entre les ressources humaines en termes de grades ou de qualifications [15] pourvu de créer des plannings hebdomadaires des infirmières d'un service hospitalier. [14] s'intéresse à la modélisation et à la résolution de différents problèmes d'optimisation soulevés par la construction de plannings pour les agents qui travaillent dans un contexte aéronautique : la création de vacations, la création de rotation, l'affectation de vacations et de rotations. [16] aborde un modèle original de l'impact du partage des ressources sur les durées opératoires. Avec ce modèle, le ratio entre les durées apparentes (avec opérateur partagé) et les durées théorique (opérateur par machine) est une fonction linéaire de la somme

des taux d'occupation de chaque job dont s'occupe l'opérateur. Dans L'article [17] exprime particulièrement la nécessité d'assurer une meilleure correspondance entre les exigences des tâches et les compétences acquises par les ressources humaines tout en tenant compte de leurs préférences tout en proposant une nouvelle approche composée de trois étapes pour la résolution du problème d'affectation sous contraintes de compétences et préférences. Le problème de planification et d'affectation de ressources humaines dans une pharmacie hospitalière [18] proposent une nouvelle méta-heuristique pour la génération automatique d'emploi du temps pour le personnel de cette pharmacie, la méthode proposée s'appuie sur une variation de l'algorithme d'optimisation par colonies de fourmis pour la planification des tâches et sur une heuristique spécifique pour l'affectation des tâches aux ressources en fonction de leurs compétences. Plusieurs tests numériques sont proposés pour démontrer l'efficacité de la méthode. [19] proposent une méthodologie d'affectation des ressources humaines s'appuyant sur une intégration explicite des compétences individuelles et collectives des acteurs dans le calcul de la performance des processus d'entreprise. Un algorithme dichotomique d'affectation a été étudié permettant, vis à vis d'une approche exhaustive, d'obtenir un gain de temps très important, tout en préservant une bonne couverture des solutions admissibles. Les auteurs dans [20] s'intéressent à la recherche du personnel permettant d'assurer son travail et proposent une démarche d'affectation rapide et performante des ressources humaines s'appuyant sur un algorithme dichotomique. Le travail de recherche dans [21] porte sur le problème de prise en compte des contraintes liées aux ressources humaines, en terme d'affectation des opérateurs aux machines, dans les problèmes d'ordonnancement d'atelier.

2.5 Problématique de l'équilibrage

D'un point de vue modélisation, l'ordonnancement de projet permet d'associer les problématiques d'ordonnancement de la production avec les problématiques de l'affectation de ressources, la minimisation de la durée totale du projet n'est pas la seule fonction présente dans la réalité des projets, de nombreuses autres fonctions objectifs permettent de prendre en compte la nécessité d'équilibrer l'utilisation de ces ressources, d'ajuster la capacité et de lisser la charge du travail de chaque ressource dans le temps en prenant en compte leurs compétences afin que le profil d'utilisation des ressources soit le plus équilibré possible par rapport à la disponibilité définie.

La problématique associée à la planification et à l'équilibrage des ressources humaines dépend de l'horizon temporel à l'intérieur duquel la décision doit être prise. L'analyse des déséquilibres de la charge de travail entre les ressources humaines permet de mettre en lumière

les dysfonctionnements qui perturberaient l'évolution de l'organisation. Ce qui exige, par conséquent, de gérer ces activités et d'allouer des tâches à la meilleure ressource. En effet, un agent doit réaliser son intervention avec une précaution particulière et dans un délai plus court afin d'éviter des conflits sur les ressources (il sera impossible d'utiliser la ressource en même temps par deux tâches distinctes) et d'assurer le bon fonctionnement des machines et en perturbant le moins possible la fonction production.

L'équilibrage de charge consiste à partager entre les agents toutes les tâches à effectuer durant un intervalle temporel donné, de manière à respecter des contraintes liées à la réglementation du travail, à la prise en compte des compétences du personnel et en même temps à établir un équilibre entre la charge de travail de chaque agent. Etablir un équilibrage de charge à partir des tâches à effectuer est un problème assez difficile à résoudre, vu le nombre des tâches à effectuer et la complexité de la réglementation.

La littérature associée à des problèmes d'équilibrage de ressources humains a été largement étudié dans la littérature voir [22] l'objectif était d'équilibrer la charge de travail des infirmières tout en satisfaisant diverses contraintes. Des Modèles pour la recherche de solutions équitables en optimisation combinatoire et application aux problèmes d'affectation ont été proposés dans [23]. Le processus d'affectation des opérations et des ressources à des stations est appelé l'équilibrage d'une ligne de fabrication a été abordé dans [24].

2.5.1 Méthodes de base de résolution des problèmes d'équilibrage

a) **Fable**

C'est une procédure par séparation et évaluation [14] dont les branchements se font par l'ajout d'une opération choisie parmi les candidats à la station courante. Ainsi, l'énumération est orientée opération. Si au cours de l'énumération aucune opération ne peut être affectée à la station courante, cette station est fermée et une nouvelle station est créée (elle devient à son tour la station courante). Une solution admissible n'est obtenue qu'une fois toutes les opérations affectées. Tant qu'il reste des branchements ouverts, des retours en arrière sont opérés. Des nœuds peuvent être supprimés s'ils correspondent à des solutions partielles qui contiennent le même ensemble d'opérations. Des règles de dominances sont utilisées afin de réduire d'avantage le nombre d'énumérations (branchements). Parmi ces règles, celle proposée par Jackson (1956) stipule qu'une opération i est dominée par une opération j si le temps opératoire de i est inférieure à celui de j et que l'ensemble des successeurs de i est inclus dans celui de j .

b) **Colonies de fourmis**

Les algorithmes de colonies de fourmis (Ant Colony Optimization, ACO) [14] s'inspirent du comportement des fourmis lors de la recherche d'un chemin entre leur colonie et une source de nourriture. La méthode ACO a été proposée par Dorigo (1992) et a été formulée comme nouvelle métaheuristique. Elle a d'abord été appliquée pour la résolution du problème de voyageur de commerce, mais elle a aussi été appliquée sur un large éventail de problèmes d'optimisation combinatoire et notamment les problèmes d'ordonnement et d'équilibrage de lignes. Les algorithmes ACO correspondent à une procédure de construction itérative, les solutions étant construites élément par élément. Les éléments d'une solution sont sélectionnés selon une probabilité basée sur l'évaluation heuristique. Chaque fourmi construit une solution en suivant une probabilité lors de la sélection, elle dépose ses phéromones selon la qualité de la solution générée. La mémoire collective des fourmis est utilisée pour faire apparaître les meilleures solutions (la piste de phéromones laissée par les fourmis est plus significative quand la solution est de meilleure qualité par rapport aux autres). Un élément de la solution correspond à l'affectation d'une opération à une station. À chaque itération, nous calculons la probabilité d'affectation pour chaque combinaison possible (opération/station) selon la qualité des solutions générées. Cette procédure est répétée un grand nombre de fois (jusqu'à atteindre un critère d'arrêt). Suivant l'avancement de la procédure, les éléments qui correspondent aux meilleures solutions possèdent des pistes de phéromones plus importantes que les autres, ce qui permet à l'algorithme de converger vers les solutions de meilleure qualité.

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques modèles et méthodes que nous allons utiliser dans le chapitre suivants pour la modélisation et la résolution du problème d'équilibrage de charge. Dans la suite, nous allons voir que ce problème peut être modélisés en tant que problème d'affectation. Le principe de ce problème a été présenté ainsi que différentes méthodes de résolution pour résoudre le problème d'affectation.

Application

La modélisation d'un problème donné est une étape qui consiste à extraire une image aussi fidèle que possible du système. Cette image peut prendre plusieurs formes : mathématique comme en programmation linéaire, statistique comme dans un modèle statistique et sous forme d'un graphe comme en théorie des graphes, ou alors sous forme virtuelle comme en simulation. Nous nous intéressons dans ce mémoire à la modélisation mathématique et graphique du problème d'optimisation de changements de formats (série), qui est peu abordée dans la littérature. Elle a été étudiée par [25], la méthode proposée dans cet article est SMED. [26] les auteurs ont traité le problème d'ordonnement des opérations de réglage machine lors d'un changement de série.

3.1 Description du problème

3.1.1 Qu'est ce qu'un changement de format ?

Le changement de format est une succession de multiples tâches des intervenants (production, technique, ...) sur les différentes machines pour adapter le nouveau format, qui nécessite de changer l'outillage des machines de la ligne de production et de faire des réglages tels que : réglage suivant le format (hauteur / largeur) de la bouteille, remplacement de moule spécifique au format voulu, synchronisation des différentes machines (changement de recettes, de cadence, ...).

- **Les opérations de montage** : il s'agit de monter sur la machine l'outillage adapté au nouveau format ;
- **Les opérations de réglage** : il s'agit de régler la machine avec l'outillage pour obtenir le format désiré.

3.1.2 Ligne de production CSD

La ligne de production CSD est une unité qui permet de produire les boissons gazeuses (SODA et Eau Minérale Gazéifié) en bouteilles PET. Pour produire une bouteille, il faut que chaque opération nécessaire soit réalisée, chacune nécessitant une machine spécifique comme le montre le schéma suivant. Pour produire un nouveau format, il faut donc régler toutes les machines qui constituent la ligne.

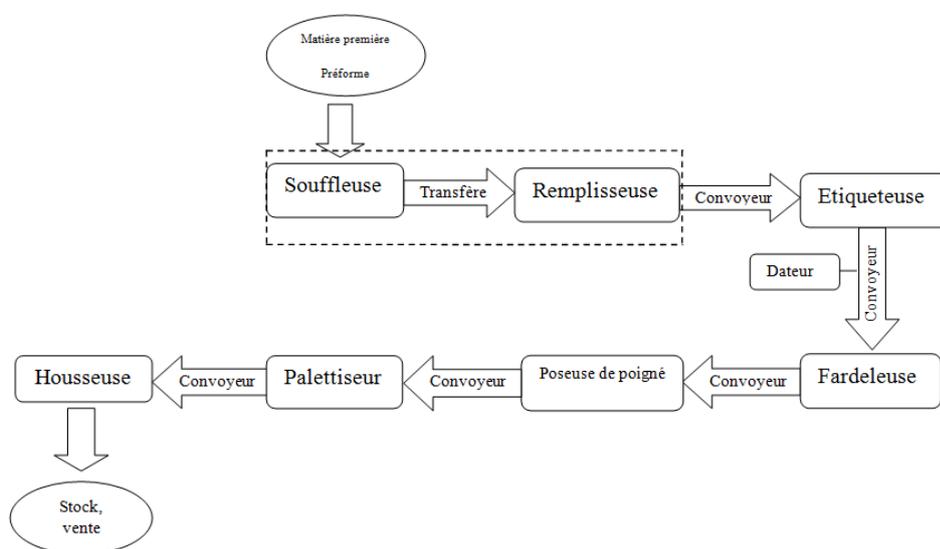


FIGURE 3.1 – Principe d'une ligne de production CSD (soda)

Le principe de chaque machine est :

- **Souffleuse** : préchauffage et soufflage.
- **Remplisseuse** : remplissage et bouchonnage (remplir en PET et capsuler).
- **Etiqueteuse** : étiquetage (mettre l'étiquette et la coller sur la bouteille), dater la bouteille (mettre la date de fabrication et d'expiration/ lot de fabrication).
- **Fardeleuse** : regroupement des bouteilles en nombre défini suivant le format (33 cl= 12bt/pack) et les emballer avec un film rétractable, ce dernier sera chauffer et coller pour obtenir la forme du pack.

- **Poseuse de poignées** : appliquer d'une manière automatique des poignées formées d'un ruban adhésif et des cartonnâtes sur des lots fardelés de produits.
- **Palettiseur** : regroupement des packs suivant un schéma automatisé, puis les ranger en plusieurs niveaux pour former une palette.
- **Housseuse** : emballer les palettes avec un film afin de maintenir la stabilité des packs
- **Convoyeur** : permet le déplacement des bouteilles d'une machine à une autre.
- **Carbomiæer** : sélectionne la recette selon le récipient et le parfum désirés.

Dans cette ligne de production CSD, trois types de formats sont disponibles :

- 0.33L avec une préforme de 21 grs ;
- 1.25L avec une préforme de 42 grs ;
- 2L avec une préforme de 52 grs.

3.2 Modélisation du problème central

Dans ce travail, le changement de format sur une ligne CSD composée de plusieurs machines réalisant diverses opérations, est effectué par plusieurs opérateurs (quatre opérateurs, un opérateur polyvalent, un opérateur qualité, un technicien supérieur et un chef d'équipe).

Par conséquent, notre étude vise à modéliser le problème permettant de minimiser ces pertes de temps liées a ce changement, donc à ordonnancer les tâches de manière à minimiser le temps de réglage total (minimiser la perte de production) tout en respectant les propriétés d'antériorité de ces dernières et de minimiser tout retard dû à ce changement. Notre démarche donc consiste à la réalisation de l'ensemble des tâches du processus de changement avec seulement les ressources disponibles durant un temps limité.

Le délai du processus doit être calculé en utilisant le diagramme Gantt. Pour le faire, nous devons prendre en considération les points suivants :

1. Enoncer clairement le contenu du problème (le projet à réaliser),
2. Lister les tâches,
3. Evaluer la durée et l'ordre des tâches ,
4. Répartir les responsabilités (pour les tâches critiques),
5. Optimiser le délai de projet,
6. Respecter le délai et les capacités des ressources.

Une fois la construction du diagramme Gantt est terminée et la durée de projet est obtenue. En fonction de ce diagramme et des ressources disponibles, nous proposerons une affectation qui permet de répartir la charge de travail de façon relativement homogène entre les ressources dans le temps en modifiant le mieux possible l'ordonnancement courant sans rallonger la durée du projet. afin de parvenir à la consommation de ressources la plus efficace sans l'augmentation de la durée totale du projet (éviter la surcharge du travail). L'affectation présentée dans la suite est un parcours pour la résolution du problème d'équilibrage de charge.

Le nombre maximum de tâches pouvant être traitées simultanément sera au plus égale au nombre de ressources. Le temps de traitement d'une tâche dépend du choix de la ressource qui en assumera la charge. Celui-ci variera si l'on choisit d'en changer l'affectation. Cependant, toutes les ressources doivent être occupées de façon à revoir une charge normale.

Les tâches de réglage des machines sont effectuées par des opérateurs multi-compétents. Ces opérateurs vont donc être les ressources du problème d'optimisation de changement de format. Pour être effectuée une tâche requiert un et un seul opérateur disponible avec la compétence nécessaire. Afin d'éviter les surcharges de travail des agents, une tâche ne sera donc pas nécessairement affectée à la meilleure ressource. Les problèmes d'ordonnancement prenant en compte les ressources humaines ont des contraintes spécifiques. L'étude de ces contraintes est une problématique émergente. Les deux principaux problèmes posés par les ressources humaines sont d'une part l'établissement des horaires de travail en fonction de contraintes légales et sociales et la prise en compte des compétences. Dans notre problème, nous considérons que le problème consistant à établir la date de l'intervention des agents ainsi que leur disponibilités sont des données connues.

3.2.1 Élaboration du modèle

1. Indices

- i : indice d'identification d'une tâche $i = \overline{1..n}$
- j : indice d'identification d'un agent $j = \overline{1..m}$

2. Données et paramètres

Le modèle nécessite les données et paramètres suivants :

- $Disp_j$: Temps de disponibilité de la ressource j dans l'atelier.
- C_j : Charge de la ressource j .

- M_i : Le sous ensemble des agents pouvant exécuter la tâche i .
- T_i : La durée de la tâche i (en minutes).
- $C_{i,j}$: Matrice de compétence de l'agent j pour l'exécution de tâche i .
- $T_{i,j}$: Temps de réalisation de la tâche i par un agent j .

3. Les variables de décision

x_{ij} : valeur binaire représentant l'affectation de la tâche i à l'agent j .

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si la tâche } i \text{ est affectée à l'agent } j; \\ 0, & \text{sinon.} \end{cases}$$

D_i : Date début de la tâche i .

4. Les contraintes

Comme nous l'avons déjà introduit, plusieurs contraintes doivent être prises en compte [27], notamment le temps de cycle, les contraintes de précédence entre les tâches et les contraintes d'exclusion entre les opérations. Toutes sont définies par les éléments suivants :

- Un agent j peut réaliser n tâches pendant une période considérée :

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} \leq n \quad \forall j \in \{1, \dots, m\}$$

- La charge totale affectée à un un agent ne doit pas excédée son temps de présence dans l'atelier :

$$\sum_{i=1}^n T_{ij} \times x_{ij} \leq Disp_j \quad \forall j \in \{1, \dots, m\}$$

- Une tâche n'est exécutée que sur une seule ressource parmi celles possibles :

$$\sum_{j \in M_i} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in \{1, \dots, n\}$$

- Une tâche ne peut pas être effectuée par une ressource "interdite" :

$$\sum_{j \notin M_i} x_{ij} = 0 \quad \forall i \in \{1, \dots, n\}$$

- La contrainte qualité impose que la ressource 8 appartient à une seule tâche (tâche qualité).

$$x_{16,8} = 1 \quad \forall j \in \{1, \dots, m\}$$

- La tâche i' ne peut commencer son exécution avant l'achèvement de la tâche i :

$$D_{i'} \geq D_i + \sum_{j \in M_i} x_{ij} * T_{i,j}.$$

avec, la tâche i est le prédécesseur de la tâche i' .

- $x_{ij} \in \{0, 1\}$; $D_i \in \mathfrak{R}^+$. $\forall j \in \{1, \dots, m\}$ $\forall i \in \{1, \dots, n\}$

5. L'objectif

Le but est de déterminer une affectation des ressources qui permette d'équilibrer leur charge temporelle, durant le processus de changement. Alors on propose la fonction :

$$\sum_{\substack{j' < j \\ j'=1}}^{m-1} |C_j - C_{j'}| \rightarrow \min$$

$$\text{Avec, } C_j = \sum_{i=1}^n T_{ij} x_{ij}$$

3.3 Collecte des données

Pour produire un nouveau format, il faut intervenir sur un certain nombre d'opérations. Leur durées et les contraintes auxquelles elles sont soumises sont données dans le tableau suivant :

Numéro	Tâche	Durée	Préd	Ressource
01	Vider et sébarasser de toute les bouteilles du premier format	20	-	R2
02	Réglage des oreinteurs	10	11	-
03	Réglage des guides rail de chargement	10	11	-
04	Changement des moules	20	11	-
05	Changement tige d'élongation et leurs butées	20	11	-
06	Réglage débit près soufflage	10	11	-
07	Sélection la recette du format en question	5	11	-
08	Changement roue d'entrée	10	01	R4
09	Changement des étoiles et guides bouteilles	30	08	R4
10	Réglage vertical convoyeur sortie visseuse	10	09	R4
11	Réglage rinceuse	5	10	R4
12	Réglage verticale contrôleur de niveau	5	11	-
13	Sélection programme contrôleur de niveau	8	11	-
14	Réglage guides convoyeurs bouteilles et leurs cellules	4	11	-
15	Sélection recette selon récipient désiré	10	11	-
16	Procéder au NEP de la remplisseuse	150	11	R8
17	Sélection recette selon récipient	5	11	-
18	Changement vis sans fin	15	11	-
19	Changement guide entrée bouteille	15	11	-
20	Changement des étoiles entrées et sortie	20	11	-
21	Changement guide centrale	15	11	-
22	Réglage vertical machine	5	11	-
23	Changement cylindre de coupe	15	11	-
24	Changement cylindre de transfert	15	11	-
25	Réglage vertical et latéral poste d'étiquetage	10	11	-
26	Changement scelette	10	11	-
27	Changement came	20	11	-
28	Changement brosse de lissage	10	11	-
29	Changement vitre	10	11	-
30	Ajustement longement d'étiquette	10	11	-
31	Sélection programme raccordement bobine	10	11	-
32	Réglage guide convoyeur	15	11	-

Continue sur la page suivante

Numéro	Tâche	Durée	Préd	Ressource
33	Réglage verticale contrôleur d'étiquette	10	11	-
34	Sélection programme contrôleur d'étiquette	10	11	-
35	Réglage vertical dateur selon récipient souhaité	15	11	-
36	Changement guide entrée	20	11	-
37	Réglage des séparateurs de bouteille entrée fardeleuse	20	11	-
38	Changement et synchronisation la cassette	20	11	-
39	Réglage guide sortie cycleur	15	11	-
40	Réglage hauteur barres de nappage	20	11	-
41	Sélection du programme	10	11	-
42	Sélection des voies entrées posseuse de poignées	10	11	-
43	Réglage vertical selon le format désiré	20	11	-
44	Réglage chemin du ruban adhésif	15	11	-
45	Changement des roulettes suivant format	20	11	-
46	Sélection du programme	10	11	-
47	Sélection le programme de palettisation adéquate au format	10	11	-
48	Sélectionner le programme du format en cours de production	10	11	-
49	Sélection la recette suivant le format	5	11	-
50	Réglage des guides suivant le format	15	11	-
51	Sélectionner l'étiqueteuse en marche	10	11	-
52	Selection la recette selon récipient et parfum désirés	10	11	-
53	Préparation des MP redemarrage des machines	20		R2

TABLE 3.1: Tableau des activités du processus de changement de format

Suivant le mode opératoire de l'entreprise, l'équipe de travail commence tout d'abord par l'exécution des tâches 1, 8, 9, 10, 11. Une fois que celles ci ont achevées, la tâche qualité 16 ainsi que toutes les autres tâches vont débuté en même temps. La fin de la tâche 16 implique la fin de toutes les tâches constituant le changement de format en question.

On associe à chaque machine voir deux un opérateur, tel que l'opérateur 2 ($R5$) intervient dans l'Etiqueteuse, l'opérateur 1 ($R4$) dans la Souffleuse et la Remplisseuse, l'opérateur 3 ($R7$) dans la Fardeleuse ainsi que dans la posseuse de poignées enfin l'opérateur 4 ($R8$) dans le palettiseur, la housseuse et les convoyeurs. L'affectation ainsi que l'enchaînement des tâches de ce processus sont illustrés dans le diagramme de Gantt suivant :

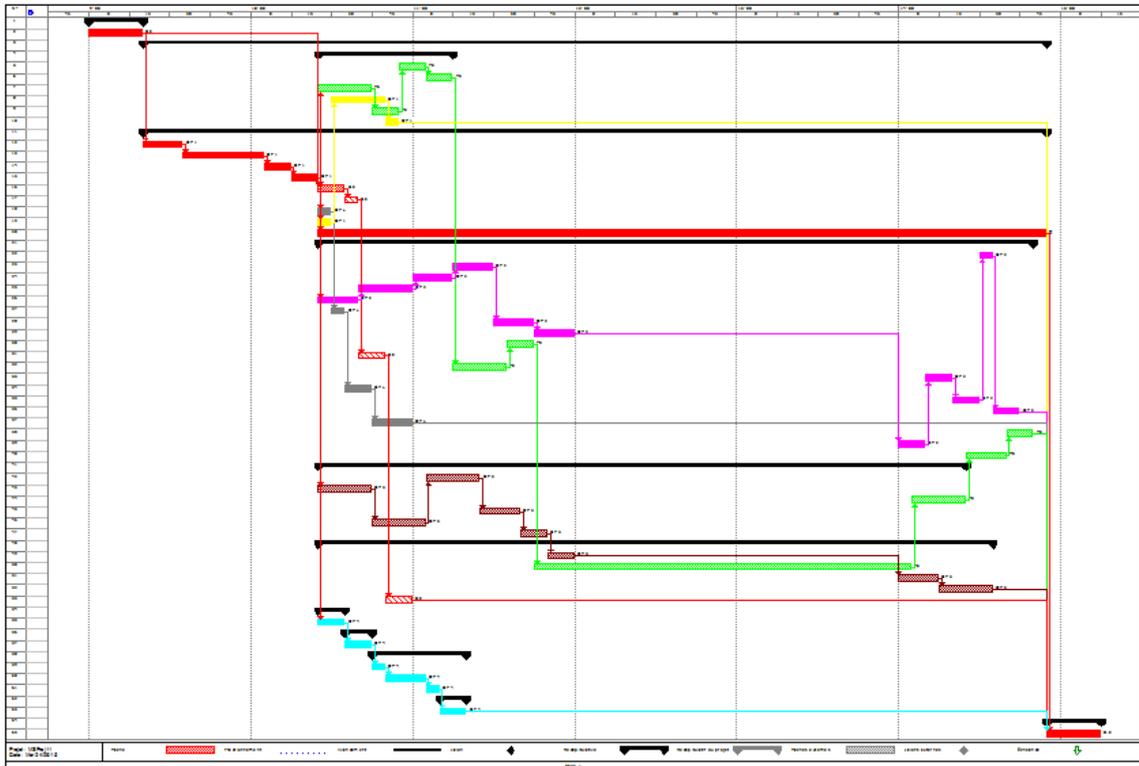


FIGURE 3.2 – Diagramme de Gantt

D'après ce diagramme, on conclut que :

- Le chemin critique est celui en rouge.
- Les tâches critiques sont : les tâches 1, 8, 9, 10, 11, 16 et 35.
- Les ressources affectées à ces tâches sont : $R2$, $R4$, $R4$, $R4$, $R4$, $R8$, $R2$ respectivement.
- La durée de projet est de 255 minutes.

L'ordonnancement qui répond à l'utilisation des ressources nous montre des surcharges de certains opérateurs par rapport aux autres. La figure suivante résume que le problème se pose au niveau des ressources suivantes :

- 1 Le technicien supérieur ($R1$) en premier lieu avec 145 minutes,
- 2 L'opérateur 2 ($R5$) en second lieu avec 135 minutes,
- 3 L'opérateur 3 ($R7$) avec 130minutes.

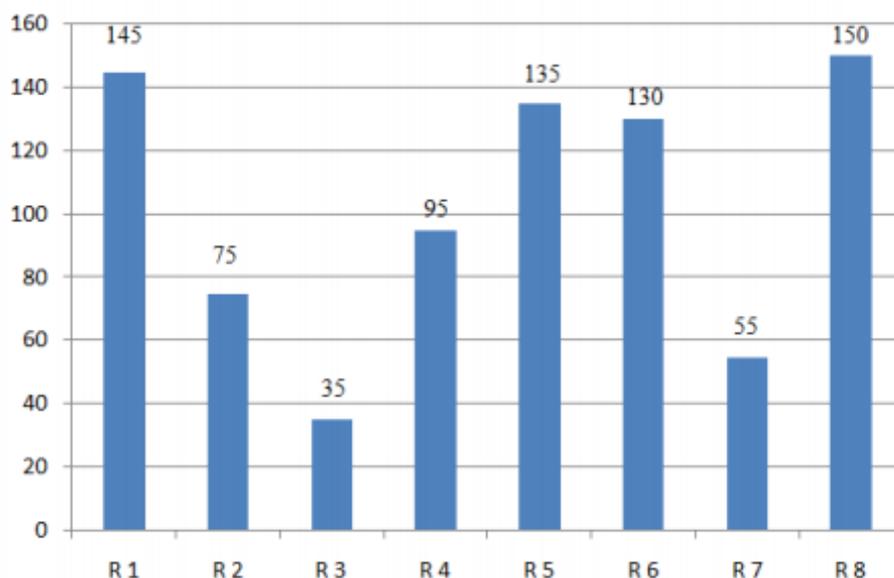


FIGURE 3.3 – Le plan de charge de chaque ressource dans la ligne CSD

L'affectation du personnel aux processus n'est pas neutre même si les employés sont considérés dans un premier temps comme apte à l'exécution de la tâche à réaliser. Cependant, même si les ressources humaines satisfont les contraintes définies en terme de compétence et de disponibilité. Les choix retenus influent largement sur la répartition des ressources.

Notre étude vise donc à proposer une nouvelle affectation des tâches aux ressources, sans dépasser la durée limite (255 minutes). à savoir qu'on connaît déjà les ressources responsables de l'exécution des tâches critiques et qu'on agit seulement sur les tâches non critiques (trouvons les ressources correspondantes à l'exécution des tâches non critiques).

Pour ce faire, nous agissons avec le même mode opératoire de l'entreprise mais cette fois ci sans prendre en considération l'affectation préconçue. La figure (3.4) respresente le mieux la situation.

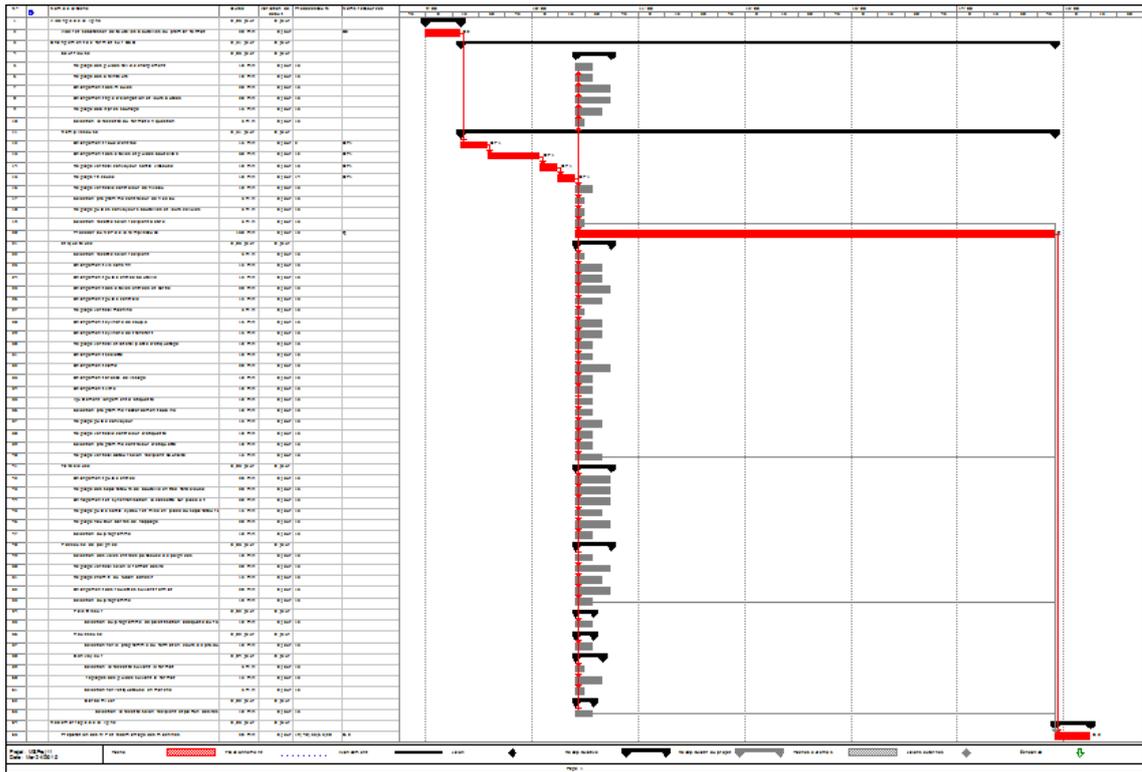


FIGURE 3.4 – Diagramme de Gantt sans affectation

3.4 Procédure de prétraitement

On considère ici le cas le plus général où chaque tâche nécessite des ressources disponibles en capacité limitée, la disponibilité des ressources est la même pour tout le monde. Le tableau suivant résume la capacité et la disponibilité de chaque ressource au cours de ce processus.

Cod	Nom de la ressource	Capacité	Disponibilité
R1	Technicien Supérieur	1	8
R2	Chef d'équipe	1	8
R3	Opérateur Polyvalent	1	8
R4	Opérateur 1	1	8
R5	Opérateur 2	1	8
R6	Opérateur 3	1	8
R7	Opérateur 4	1	8
R8	Opérateur Qualité	1	8

TABLE 3.2 – Capacités et disponibilités des ressources

Chacune des 53 tâches doivent recevoir un opérateur. 8 opérateurs sont disponibles, chacun d'eux admet un niveau de compétence.

La matrice de compétence, constitue une donnée d'entrée pour l'élaboration du plan de formation du personnel. En effet, ce niveau de compétence peut diminuer ou augmenter en fonction des activités de l'opérateur. Nous considérons un système de maintenance composé de ressources, ayant des compétences dans des machines complémentaires (souffleuse, remplisseuse, fardeuse, ...). En effet, chaque agent possède différents niveaux de compétences dans une ou plusieurs machines.

Le niveau (note) de compétence acquise $C_{i,j}$ (avec $1 \leq i \leq 52$ et $1 \leq j \leq 8$) de l'opérateur i , dans une spécialité j , peut avoir les valeurs suivantes :

- $C_{i,j} = 0$: Aucune compétence pour réaliser la tâche considérée.
- $0 < C_{i,j} \leq 5$: Niveau encore insuffisant pour réaliser cette tâche.
- $5 < C_{i,j} \leq 10$: Compétence suffisante pour accomplir un travail dans cette spécialité mais en occupant plus de temps.
- $C_{i,j} = 10$: Forte compétence pour accomplir cette tâche.

Ces valeurs sont regroupées dans une matrice, appelée matrice de compétences.

	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
1	8	10	2	2	0	0	0	0
2	10	5	0	7	3	0	0	0
3	10	5	0	8	3	0	0	0
4	10	8	8	8	8	8	8	0
5	10	5	0	10	8	0	0	0
6	10	10	0	8	3	0	0	0
7	10	10	0	10	10	0	0	0
8	10	10	5	10	8	0	0	0
9	10	10	5	10	8	0	0	0
10	10	5	0	10	0	0	0	0
11	10	10	0	10	8	0	0	0
12	10	10	8	10	5	0	0	0
13	10	10	0	10	10	0	0	0
14	10	10	10	10	10	10	10	0
15	10	10	0	10	10	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	10
17	10	10	0	10	10	0	0	0
18	10	5	0	5	10	0	0	0
19	10	5	5	10	10	0	0	0
20	10	8	0	8	10	0	0	0
21	10	5	0	5	10	0	0	0
22	10	0	10	5	10	5	5	0
23	10	0	0	8	10	5	5	0
24	10	0	0	8	10	5	5	0
25	10	5	0	7	10	5	5	0
26	10	10	10	8	10	5	5	0
27	10	0	0	0	0	0	0	0
28	10	8	6	8	10	5	5	0
29	10	8	10	8	10	5	5	0
30	10	0	0	0	10	0	0	0
31	10	10	0	7	10	0	0	0
32	10	10	10	8	10	8	10	0
33	10	8	0	5	10	0	0	0
34	10	10	0	8	10	0	0	0
Continue sur la page suivante								

	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
35	10	10	0	10	10	10	10	0
36	10	8	10	0	0	10	8	0
37	10	5	0	0	0	10	5	0
38	10	10	10	0	0	5	0	0
39	10	5	10	3	3	10	10	0
40	10	5	0	10	0	10	0	0
41	10	10	0	0	0	10	10	0
42	10	8	0	0	0	10	10	0
43	10	9	0	0	10	8	5	0
44	10	0	10	0	0	10	8	0
45	10	0	0	0	0	10	10	0
46	10	10	0	0	0	10	8	0
47	10	8	0	2	2	7	10	0
48	10	8	0	10	2	7	10	0
49	10	8	0	3	3	6	10	0
50	10	10	3	3	8	8	10	0
51	10	10	0	0	10	5	10	0
52	10	10	0	10	0	10	10	0
53	8	10	0	2	2	0	0	0

TABLE 3.3: Matrice de compétences

Notre but correspond à la mesure de l'efficacité pour répondre à la demande au travail demandée (tâche considérée), c'est à dire le temps de la main d'œuvre nécessaire pour réaliser la tâche en question. Pour cela nous avons fait appel à EXCEL [28] a fin de calculer les temps d'utilisation de chaque tâche i par un opérateur j .

Partant du principe : $10 \div C_{i,j} = t_i \div T_i$ et calculons le temps t_i de pour chaque j qu'on note $T_{i,j}$. La procédure suivie est $si C_{i,j} > 0, T_{i,j} \times 10 \div C_{i,j}; 1000$, à savoir, 1000 désigne qu'un opérateur j ne peut exécuter la tâche i .

Exemple : La ressource R_1 (technicien supérieur) ainsi que la ressource R_2 (chef d'équipe) exécute la tâche 6 en 15 minutes. Par contre la ressource R_4 (l'opérateur 1) l'exécute en 19 minutes, encore la ressource R_5 (l'opérateur 2) en 50 minutes.

Les ressources R_3, R_6, R_7, R_8 qui ont aucune compétence exécutent la tâche 6 en 1000 minutes. La matrice ci-dessus résume le temps d'utilisation des tâches par les ressources.

	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
1	25	20	100	100	1000	1000	1000	1000
2	10	20	1000	14	33	1000	1000	1000
3	10	20	1000	13	33	1000	1000	1000
4	20	25	25	25	25	25	25	1000
5	20	40	1000	20	25	1000	1000	1000
6	15	15	1000	19	50	1000	1000	1000
7	5	5	1000	5	5	1000	1000	1000
8	15	15	30	15	19	1000	1000	1000
9	30	30	60	30	38	1000	1000	1000
10	10	20	1000	10	1000	1000	1000	1000
11	10	10	1000	10	13	1000	1000	1000
12	10	10	13	10	20	1000	1000	1000
13	5	5	1000	5	5	1000	1000	1000
14	5	5	5	5	5	5	5	1000
15	5	5	1000	5	5	1000	1000	1000
16	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	150
17	5	5	1000	5	5	1000	1000	1000
18	15	30	1000	30	15	1000	1000	1000
19	15	30	30	15	15	1000	1000	1000
20	20	25	1000	25	20	1000	1000	1000
21	15	30	1000	30	15	1000	1000	1000
22	5	1000	5	10	5	10	10	1000
23	15	1000	1000	19	15	30	30	1000
24	15	1000	1000	19	15	30	30	1000
25	10	20	1000	14	10	20	20	1000
26	10	10	10	13	10	20	20	1000
27	20	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
28	10	13	17	13	10	20	20	1000
29	10	13	10	13	10	20	20	1000
30	10	1000	1000	1000	10	1000	1000	1000
31	10	10	1000	14	10	1000	1000	1000
32	15	15	15	19	15	19	15	1000
Continue sur la page suivante								

	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
33	10	10	1000	20	10	1000	1000	1000
34	10	10	1000	13	10	1000	1000	1000
35	15	15	1000	15	15	15	15	1000
36	20	25	20	1000	1000	20	25	1000
37	20	40	1000	1000	1000	20	40	1000
38	20	20	20	1000	1000	40	1000	1000
39	15	30	15	50	50	15	15	1000
40	20	40	1000	20	1000	20	1000	1000
41	10	10	1000	1000	1000	10	10	1000
42	10	13	1000	1000	1000	10	10	1000
43	25	28	1000	1000	25	31	50	1000
44	15	1000	15	1000	1000	15	19	1000
45	20	1000	1000	1000	1000	20	20	1000
46	10	10	1000	1000	1000	10	13	1000
47	10	13	1000	50	50	14	10	1000
48	10	13	1000	10	50	14	10	1000
49	5	6	1000	17	17	8	5	1000
50	15	15	50	50	19	19	15	1000
51	5	5	1000	1000	5	10	5	1000
52	10	10	1000	10	1000	10	10	1000
53	25	20	100	100	1000	1000	1000	1000

TABLE 3.4: Matrice des temps d'utilisation des tâches par les ressources

L'affectation de ressource consiste à affecter 46 tâches à 7 agents de manière à respecter les contraintes liées aux disponibilités des agents, en prenant en compte leurs compétences.

Vu la complexité du problème proposé, nous avons développé un algorithme heuristique qui permet de trouver une affectation des tâches aux ressources de manière à équilibrer la charge, et vu qu'on connaît déjà les ressources affectées aux tâches critiques, on se limite à la recherche d'une affectation de ressources pour les tâches non critiques. La syntaxe générale de l'algorithme est la suivante :

Algorithme d'équilibrage de charge

- 1 Collecte de l'information et Initialisation des données :
 - Initialiser la charge des opérateurs $C0(j)$.
 - Initialiser la matrice des temps d'utilisation des tâches par les ressources $T(i, j)$.
 - Initialiser les temps de présence des opérateurs pendant le processus de changement $Disp(j)$.
- 2 Trouver M_i : le sous ensemble des ressources pouvant exécuter la tâche i ;
- 3 Calculer la nouvelle charge de chaque opérateur de ce sous ensemble par l'équation :
$$C(j) = C0(j) + T(i, j) ;$$
- 4 Trouver le minimum des $C(j)$ calculées ;
- 5 Renvoyer l'indice j qui satisfait le minimum des charges, qu'on note $jmin$;
- 6 Si la charge de l'opérateur j trouvée est inférieure $Disp$ (sa présence pendant le processus de changement) Alors
- 7 Affecter la tâche i à l'opérateur j ;
- 8 Actualiser la charge.
- 9 Renvoyer la matrice d'affectation finale ;
- 10 Renvoyer les charges des opérateurs ;

3.5 Résultats et interprétation

Après l'application de l'algorithme d'équilibrage de charge sous MATLAB, on a obtenus les résultats suivants :

La matrice d'affectation associée à notre stratégie d'équilibrage de charge est la suivante :

	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
1	0	1	0	0	0	0	0	0
2	1	0	0	0	0	0	0	0
3	1	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	1	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	1	0	0	0
6	1	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	1	0	0	0
8	0	0	0	1	0	0	0	0
9	0	0	0	1	0	0	0	0
10	0	0	0	1	0	0	0	0
11	0	0	0	1	0	0	0	0
12	0	0	1	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	1	0	0	0
14	0	0	0	0	0	1	0	0
15	1	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	1
17	0	0	0	0	1	0	0	0
18	1	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	1	0	0	0
20	0	1	0	0	0	0	0	0
21	1	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	1	0
23	0	0	0	0	0	1	0	0
24	0	0	0	0	0	0	1	0
25	0	0	0	0	0	1	0	0
26	0	0	1	0	0	0	0	0
27	1	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	1	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0	1	0
30	0	0	0	0	1	0	0	0
31	0	1	0	0	0	0	0	0
32	0	0	0	0	0	1	0	0
33	0	0	0	0	1	0	0	0
34	0	0	0	1	0	0	0	0
Continue sur la page suivante								

	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
35	0	0	0	0	0	0	1	0
36	0	0	1	0	0	0	0	0
37	0	0	0	0	0	1	0	0
38	1	0	0	0	0	0	0	0
39	0	0	0	0	0	0	1	0
40	0	0	0	1	0	0	0	0
41	0	1	0	0	0	0	0	0
42	0	1	0	0	0	0	0	0
43	0	0	0	0	1	0	0	0
44	0	0	1	0	0	0	0	0
45	0	0	0	0	0	0	1	0
46	0	0	0	0	0	1	0	0
47	1	0	0	0	0	0	0	0
48	0	0	0	1	0	0	0	0
49	0	1	0	0	0	0	0	0
50	0	1	0	0	0	0	0	0
51	0	0	0	0	0	1	0	0
52	1	0	0	0	0	0	0	0
53	0	1	0	0	0	0	0	0

TABLE 3.5: Matrice d'affectation

La charge de travail des opérateurs après l'utilisation de l'algorithme d'équilibrage de charge est presque équilibrée sans dépasser leurs disponibilités tout en respectant le délai alloué au processus de changement de format.

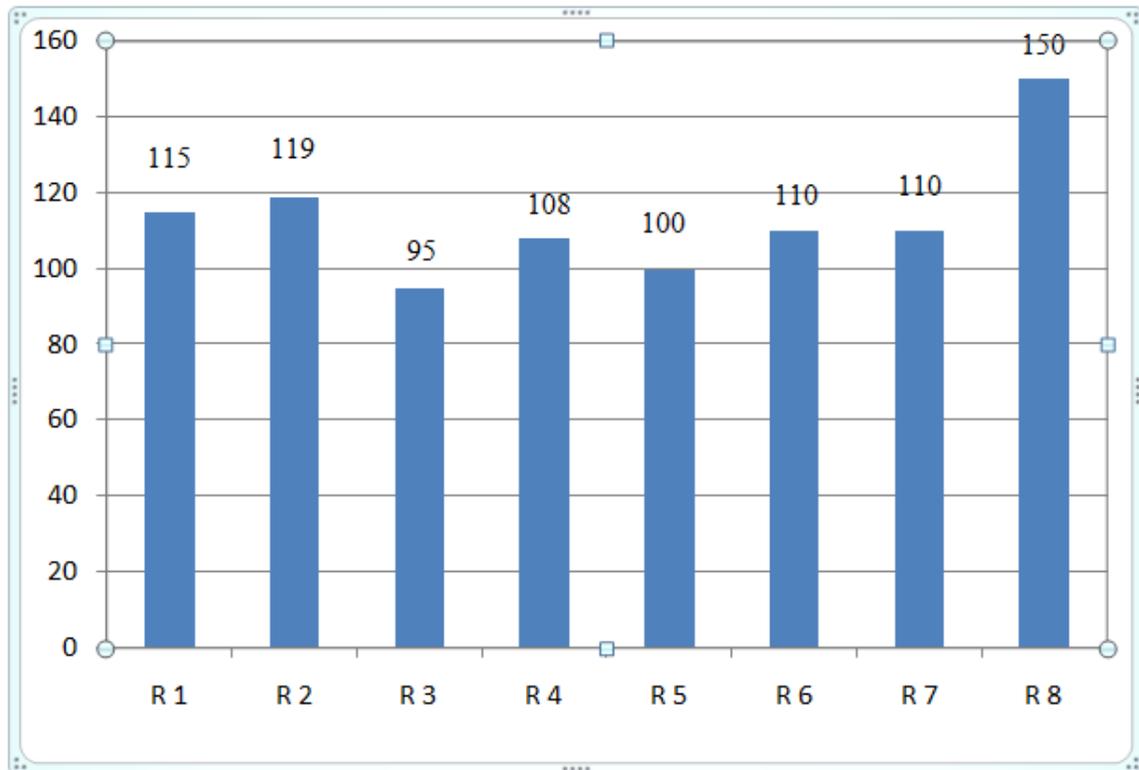


FIGURE 3.5 – Le plan de charge de chaque ressource dans la ligne CSD après affectation

L'ordonnancement qui répond le mieux à l'affectation proposée, les durées des tâches ainsi que les contraintes d'anticédances sont résumées dans le tableau suivant :

Numéro	Durée	Prédécesseurs	Ressource
1	20	-	R2
2	10	11	R1
3	10	2	R1
4	25	11	R3
5	25	11	R5
6	15	3	R1
7	5	5	R5
8	15	1	R4
9	30	8	R4
10	10	9	R4
11	10	10	R4
12	13	4	R3
13	5	5	R5
14	5	11	R6
15	5	6	R1
16	150	11	R8
17	5	13	R5
18	15	15	R1
19	15	17	R5
20	25	11	R2
21	15	18	R1
22	10	11	R7
23	30	14	R6
24	30	22	R7
25	20	23	R6
26	10	12	R3
27	20	21	R1
28	17	26	R3
29	20	24	R7
30	10	19	R5
31	10	20	R2
32	19	25	R6
33	10	30	R5
34	13	11	R4

Continue sur la page suivante

Numéro	Durée	Prédécesseurs	Ressource
35	15	29	R7
36	20	28	R3
37	20	32	R6
38	20	27	R1
39	15	35	R7
40	20	34	R4
41	10	31	R2
42	13	41	R2
43	20	33	R5
44	15	36	R3
45	20	39	R7
46	10	37	R6
47	10	38	R1
48	10	40	R4
49	6	42	R2
50	15	49	R2
51	10	46	R6
52	10	47	R1
		16-43-44	
53	20	48-50	R2
		51-52	

TABLE 3.6: Tableau des tâches du processus de changement après affectation

Le graphe PERT associé à cet ordonnancement est illustré dans la figure 3.6. La durée totale de l'ordonnancement correspond à 255 minutes, ce qui fait qu'on a respecté le délai du processus de changement de format. Le chemin critique est celui en rouge, c'est le même chemin avant l'affectation des ressources aux tâches non critiques, sauf que les tâches de précédences et d'antériorités ont changées.

L'enchaînement des tâches ainsi l'affectation fournis par le logiciel de l'ordonnancement proposé est illustré dans le diagramme Gantt que montre la figure 3.7.

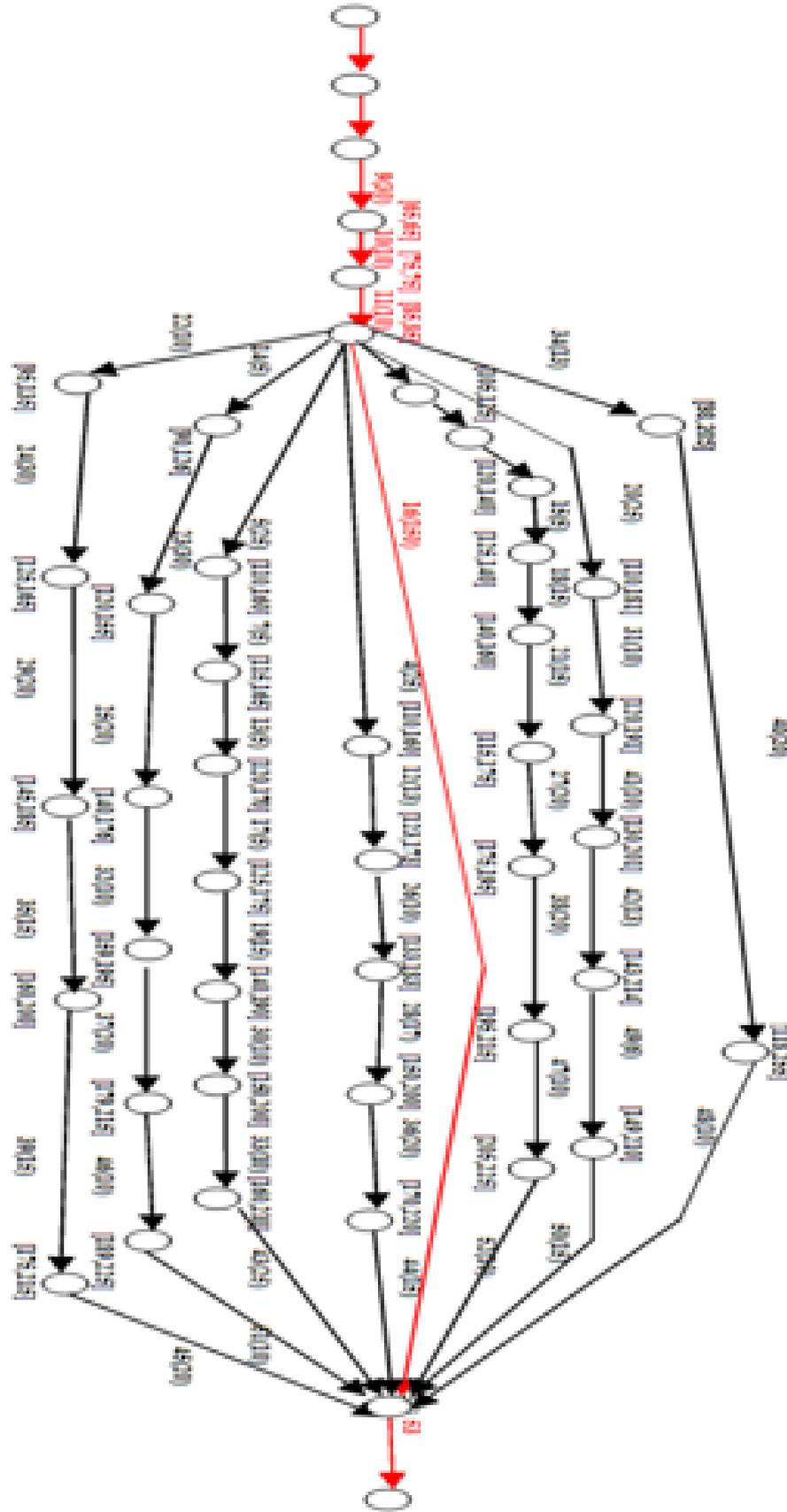


FIGURE 3.6 – Réseau de PERT

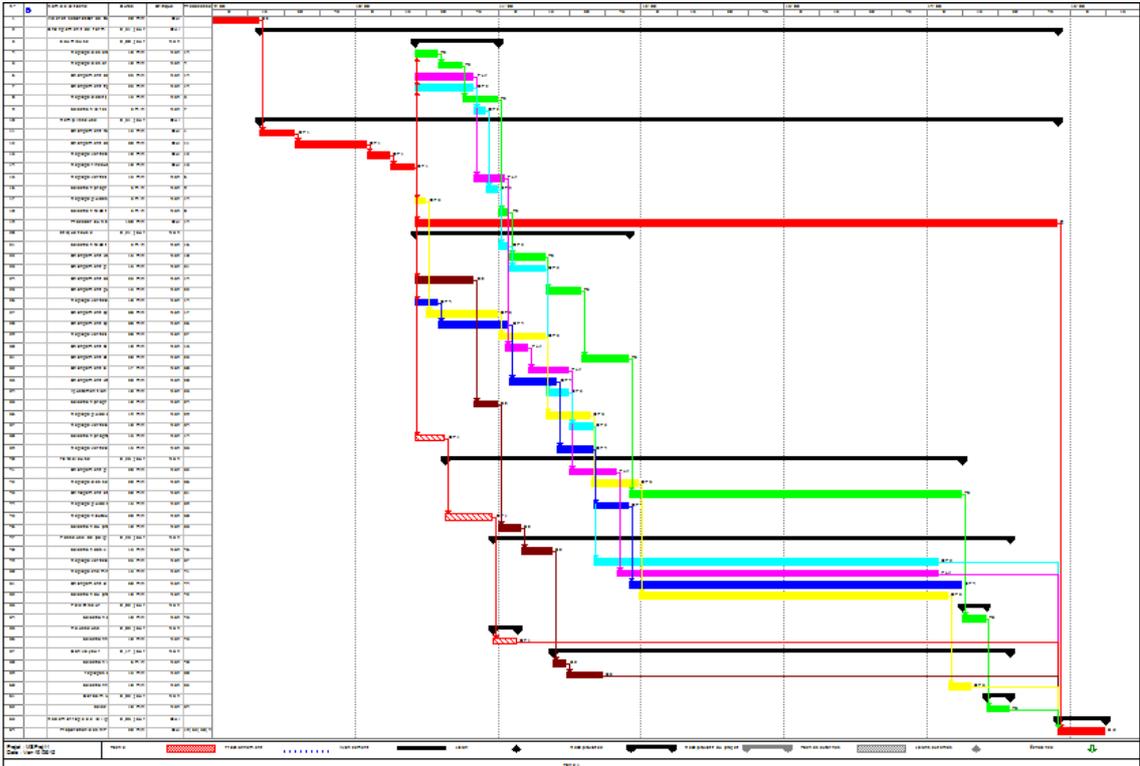


FIGURE 3.7 – Diagramme de Gantt après affectation

Conclusion générale

La gestion du personnel d'une entreprise est devenue un enjeu économique et social incontournable. En effet, une meilleure prise en compte du facteur humain dans la planification des travaux permet d'améliorer la flexibilité de l'entreprise.

Dans ce mémoire, nous avons présenté, dans un premier temps, le problème d'ordonnancement. Puis, nous avons décrit le problème d'affectation du personnel d'une manière détaillée. Après, Nous avons proposé une approche de modélisation du problème équilibrage de charge en tant que problème d'affectation. La modélisation du problème porte alors sur des décisions de type ordonnancement mais également sur des décisions de type affectation.

Nous avons pu élaborer un ordonnancement optimal du processus changement de format au niveau de la ligne de production CSD, Nous avons présenté une solution d'équilibrage de charge, et cela en appliquant un algorithme que nous avons développé sous MATLAB qui permet l'amélioration de la répartition de la charge de travail d'exécution en s'appuyant dans notre modélisation sur les tâches non critiques, ceci nous a permis également de mieux gérer les ressources. Pour un meilleur suivi de l'évolution des opérations, nous avons fait recours à la méthode PERT, le diagramme de GANTT et nous avons utilisé le logiciel MS PROJEC. De ce fait, on a estimé la durée minimale de la procédure de changement de format à 255 minutes. Nous proposons une approche de modélisation du problème en tant que problème d'affectation généralisé.

Le fait que les entreprises doivent être de plus en plus réactives vis-à-vis de leurs clients, nous laisse penser que l'ordonnancement de ce processus doit se faire d'une façon dynamique, en tenant compte du temps réel des disponibilités des ressources, dans le but d'améliorer les délais ou même de s'adapter à des événements imprévus.

Il serait intéressant de considérer une modélisation différente du problème, le modéliser comme un problème multi-objectifs, où chaque fonction objective serait de minimiser la charge de chaque ressource (agent).

Une perspective intéressante serait d'appliquer une autre méthode afin de les comparer dans le but est d'essayé d'améliorer leur efficacité.

Prendre en compte la coopération des agents pour la réalisation des tâches, notamment les tâches critiques qui pourraient diminuer les durées d'ordonnancement.

On peut également étudier la sensibilité de l'algorithme proposé par rapport à la variation dans les ressources et les tâches.

Bibliographie

- [1] E. Guechari et N. Bernine. " *Rapport de stage pratique réalisé au sein de la Sarl IBRAHIM FILS - IFRI* ", 2004.
- [2] " *Document interne de l'entreprise* "
- [3] G. Opatchi. " *Démarche d'optimisation des processus opérationnels dans l'industrie - Mémoire d'intelligence méthodologique* ", Université de Technologie Compiègne, 2013.
- [4] L. Trilling et A. Guinet. " *Planification des ressources humains* ", Cours de 5^{me} année - département génie industriel, Université Lyon, 2007.
- [5] O. Koné. " *Nouvelles approches pour la résolution du problème d'ordonnancement de projet à moyens limités* ", thèse de Doctorat en systèmes industriels, Université Paul Sabatier, HAL, 2010.
- [6] M. Ehrgott. " *Mucriteria Optimization* ", Springer, second edition, 2005.
- [7] H. Boukef. " *Sur l'ordonnancement d'ateliers job-shop flexibles et flow-shop en industries pharmaceutiques* ", Thèse de doctorat en automatique et informatique Industrielle, 2009.
- [8] A.Hadri. " *L'ordonnancement par insertion en temps reel de la production dans une atelier flexible* ", mémoire Magister en Génie Industriel, Université Hadj Lakhdhar Batna, 2012.
- [9] A. El-Montassir, L. Gadedji et K-E. Kekeh. " *Méthodes Gantt et Pert - Management de projet* ", 2007.
- [10] M. Zouba, P. Baptise et D. Renaine. " *Ordonnancement de machines identiques en présence d'opérateurs dont les affectations sont réévaluées en fin de tâche* ", Conférence internationale de modélisation et simulation - MOSIM'10, 2010.
- [11] B. Roy et R. Slowinski. " *Affectation multicritère de tâches à des unités hétérogènes de traitement avec contraintes d'incompatibilité et de capacité* ",
- [12] F. Marmier, C. Varnier et N. Zerhouni. " *Ré-ordonnancement partiel et dynamique d'un planning d'activités de maintenance* ", Laboratoire d'automatique de Besançon, Hal, France, 2007.

-
- [13] R-M. Hachicha. *"Contribution à la modélisation et résolution du problème d'affectation sous contraintes de compétences et préférences"*, thèse de Doctorat en génie industriel, Université Paris 8, 2012.
- [14] C. Draghici. *Modélisation et conception d'algorithmes pour la planification automatique du personnel de compagnies aériennes*. Thèse de doctorat en systèmes industriels, Université de Toulouse, 2005.
- [15] V-B. Campaner, R. Stock. *"Intégration du temps de formation et des desiderata des opérateurs dans un ordonnancement"*, France.
- [16] P. Baptiste et A. Munier. *"Ordonnancement sur machines parallèles avec partage d'opérateurs"*.
- [17] R-M. Hachicha, E-M. Dafaoui et A. E-Mhamedi. *"Approche de résolution du problème d'affectation sous contraintes de compétences et préférences"*, MGSI - IUT.
- [18] C. Crespy, V. Augusto, X. Xie et H. Bontemps. *"Planification et affectation des activités dans une pharmacie hospitalière par les colonies de fourmis"*, 8 ème conférence internationale de modélisation et simulation - MOSIM'10, Tunisie, 2010.
- [19] M. Bennour, D. Crestani et F. Prunet. *"Une approche de gestion des ressources humains guidée par les compétences"*, MOSIM'03, France, 2003.
- [20] M. Bennour, D. Crestani et O. Crespo. *"Une méthode d'affectation des ressources humaines aux processus industriels"*, HAL, 2008.
- [21] M. Cheurfa. *"Gestion des ressources humaines en production cyclique"*, thèse de Doctorat en Génie Industriel, HAL, 2013.
- [22] P. Schaus, P-V. Hentenryck et J-C. Régim. *"Problème d'équilibre des charges de travail dans l'affectation de patients aux infirmières"*, JFPC, 2009.
- [23] B. Golden. *"Modèles pour la recherche de solutions équitables en optimisation combinatoire et application aux problèmes d'affectation"*, 2008.
- [24] S. Kovalev. *"Problèmes combinatoires en configuration des lignes de fabrication : analyse de complexité et optimisation"*, thèse de Doctorat en génie industriel, Ecole de Saint-Étienne, HAL, 2013.
- [25] C. Pessan. *"Optimisation de changements de séries par ordonnancement des tâches de réglage"*, thèse de Doctorat en informatique, Université Tours, 2008.
- [26] C. Pessan et E. Néron. *"Ordonnancement des opérations de réglage machine lors d'un changement de série : prise en compte des compétences des opérateurs"*, GdR MACS STP Aix, 2007.
- [27] B. Dakkak, Y. Chater et A. Talbi. *"Modélisation d'un problème d'allocation des agents de maintenance"*, CIGIMS, 2012.
-

[28] C. Prins et M. Sevaux. *"Programmation linéaire avec Excel"*, Eyrolles, 2011.

Résumé

L'ordonnancement du processus de changement de format à ressources limitées avec contraintes de délais est l'une des fonctions clés dans la gestion de la production dans toute entreprise.

L'étude que nous avons menée au niveau de l'entreprise IFRI consiste à planifier dans le temps la réalisation d'un ensemble de tâches régies par des contraintes temporelles et de ressources, qui sont limitées par une capacité fixe au cours d'un délai fixe.

Une fois le problème caractérisé, nous avons pu élaborer un ordonnancement optimal à équilibrage de charge au niveau de la ligne de production CSD. Une application de l'algorithme équilibrage de charge a été réalisé qui nous a permis de répartir des charges de travail de façon égale sans augmenter le délai de réalisation du processus de changement de format.

Mots clés : Ordonnancement des tâches avec ressources limitées, équilibrage de charge, changement de format.

Abstract

The process of scheduling the format change with limited resources and deadline constraints is one of the key functions in the production management of any manufacture.

The study we have performed at the IFRI manufacture consists on scheduling in time the achievement of a set of tasks regarding some time constraints and resources, which are limited by a fixed capacity and a fixed deadline.

Once the problem is clarified, we have found an optimal schedule with balanced charge at the level of a production line (the CSD line). We have proposed and applied an algorithm for balancing the time charge, which allows a balanced repartition of the workload among the different resource without overpassing the deadline of achievement for the format change process.

Keywords : Scheduling of jobs with limited resources, charge balancing, format change.