

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRY OF HIGHER EDUCATION
AND SCIENTIFIC RESEARCH

HIGHER SCHOOL IN APPLIED SCIENCES
--T L E M C E N--



المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
École Supérieure en
Sciences Appliquées

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
-تلمسان-

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur

Filière : Génie industriel
Spécialité : Management industriel et logistique

Présenté par :

BENAZIZA Hanene

Thème

**Optimisation des tailles de lot en production: cas
d'une entreprise de fabrication des tubes
PVC/PEHD**

Soutenu publiquement, le 04/07/2023, devant le jury composé de :

M. SOUIER Mehdi	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
M. MALIKI Fouad	MCA	ESSA. Tlemcen	Directeur de mémoire
M. BENNEKROUF Mohammed	MCA	ESSA. Tlemcen	Examineur 1
Mme. SEKKAL Nour el houa	MAB	ESSA. Tlemcen	Examineur 2

Année universitaire : 2022 / 2023

Remerciement

Je remercie DIEU le tout puissant qui ma a donné la force, la volonté et le courage pour accomplir mon travail.

Je tiens à remercier mon encadrant Mr Fouad MALIKI pour m'aide et soutien pendant toute cette période ;

Je tiens à remercier aussi tout l'ensemble des enseignants et responsables de l'école supérieure des sciences appliquées - tlemcen- pour leur aide durant les cinq ans de notre formation ;

Je tiens à remercier aussi Mr Ramdane HAMACHE et madame AMINA qui mes encadrés au cours de ce stage, ainsi que tout l'ensemble de l'entreprise SOPHAL SPA pour leur aide ;

Enfin ; je tiens à remercier toutes les personnes qui ont participé de près et de loin à la réalisation de ce travail ;

Merci à vous tous ;

Dédicace

Je dédie ce mémoire à :

Mes parents que dieu les bénisse, longue vie à eux, Mon père Abd el Kader pour tout ce qu'il a fait pour moi, Ma mère Houria que dieu la bénisse et la guérisse.

Ma sœur Nadjet, Mes frères Mohamed, Ali, Toufik, Abdennacer pour leur soutien quotidien

Mes amies Amel, Ichrak, Yousra , Khawla ,Ikram, Zahra, Sonia, Salma qui mes a toujours encouragé dans mes nombreux moments de doute, d'insécurité et de questionnement.

Merci pour tout.

A toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire

Merci

Hanane. Benz

Résumé :

La planification de la production consiste à établir un planning de production afin de produire à moindre cout et satisfaire les demandes dans les délais impartis, nous visons à travers ce projet à optimiser les tailles de lot en production pour une entreprise de fabrication des tubes PVC/PEHD, pour ce faire un programme linéaire respectant les contraintes de demande et des capacités de production et de stockage a été développé. Ce modèle est résolu avec le solver CPLEX afin de déterminer les lots à fabriquer permettant de maximiser les gains.

MOTS-CLES : planification de production, tailles de lot, PVC/PEHD, CPLEX.

Abstract:

Production planning consists of establishing a production schedule in order to produce at a lower cost and meet the demands within the time limits, we aim through this project to optimize the batch sizes in production for a manufacturing company of PVC/PEHD tubes, to do this a linear program respecting the constraints of demand and production and storage capacities has been developed. This model is solved with the CPLEX solver in order to determine the batches to be manufactured in order to maximize the gains.

KEYWORDS: production planning, batch sizing, PVC/PEHD, CPLEX.

ملخص:

يتكون تخطيط الإنتاج من وضع جدول إنتاج من أجل الإنتاج بتكلفة أقل وتلبية المتطلبات ضمن الحدود الزمنية ، ونحن نهدف من خلال هذا المشروع إلى تحسين أحجام الدُفعات في الإنتاج لخط تصنيع أنابيب ، PEHD / PVC ، للقيام بذلك تم تطوير برنامج خطي يحترم قيود الطلب وقدرات الإنتاج والتخزين. تم حل هذا النموذج مع من أجل solver CPLEX تحديد الدُفعات التي سيتم تصنيعها من أجل تعظيم المكاسب

الكلمات المفتاحية تخطيط الإنتاج ، أحجام الدُفعات. PVC/PEHD. CPLEX.

Liste des figures :

Figure 1:Modèle d'une production hybride.....	19
Figure 2: l'industrie de plastique.....	32
Figure 3:Structure de base d'une machine d'injection plastique.....	35
Figure 4:Machine d'injection plastique.....	36
Figure 5:Composition d'un tube PVC.....	38
Figure 6:Processus de production des tubes PVC.....	39
Figure 7:Processus de production des tubes PEHD.....	40
Figure 8: les indices et les paramètres.....	47
Figure 9: les variables de décision.....	48
Figure 10: la fonction objectif.....	48
Figure 11: les contraintes.....	48
Figure 12: les données.....	49
Figure 13:la valeur de la fonction objectif.....	49
Figure 14: les quantités produites.....	51
Figure 15: les quantités vendues par période de chaque produit.....	52
Figure 16: les quantités stockées par période de chaque produit.....	52
Figure 17:la quantité de matière première achetée par période.....	52
Figure 18:la quantité de matière première utilisée.....	54
Figure 19:la quantité de matière première stockée.....	54

Liste des tableaux :

Tableau 1:Diamètre des tubes PVC.....	39
Tableau 2:Débit et temps de changement des lignes de production des tubes PVC.	39
Tableau 3:Diamètre des tubes PEHD.....	40
Tableau 4:Débit et temps de changement des lignes de production des tubes PEHD.....	40
Tableau 5: représentation des pourcentages de satisfaction de chaque produit.....	54

Liste des abréviations :

AP : Ordre D'achat.

ASLOG : ASsociation français de la LOGistique.

EOQ: Economic Order Quantity.

EPS: Polystyrene Expansé.

OM: Ordre de Maintenance.

OP: Ordre de Fabrication.

OT: Ordre de Travail.

PEHD: Polyéthylène Haute Densité.

PET: Polyéthylène Téréphtalate.

PVC: Polychlorure de Vinyle

Sommaire :

Remerciement	2
Dédicace	3
Résumé :	4
La planification de la production consiste à établir un planning de production afin de produire à moindre cout et satisfaire les demandes dans les délais impartis, nous visons à travers ce projet à optimiser les tailles de lot en production pour une entreprise de fabrication des tubes PVC/PEHD, pour ce faire un programme linéaire respectant les contraintes de demande et des capacités de production et de stockage a été développé. Ce modèle est résolu avec le solver CPLEX afin de déterminer les lots à fabriquer permettant de maximiser les gains. Erreur ! Signet non défini.	
MOTS-CLES : planification de production, tailles de lot, PVC/PEHD, CPLEX.	4
Abstract:	4
Liste des figures :	5
Liste des tableaux :	5
Liste des abréviations :	6
Introduction Générale	9
Chapitre 01 : La planification de production	12
1.1 Introduction :	13
1.2 La logistique	13
1.2.1 Histoire et définitions	13
1.2.2 Organisation et gestion de la production	15
1.3 Définition de production :	17
1.4 Les modes de production :	17
1.5 Les flux de production :	19
1.6 Les types de production :	20
1.7 Types de fabrication :	21
1.8 La planification de production	21
1.8.1 Définition de planification	21
1.8.1.1 Les objectifs :	22
1.8.1.2 Niveaux de planification :	22
1.8.1.2.1 La planification à long terme (PIC) :	22
1.8.1.3 La planification à court terme (PDP) :	23
1.8.1.4 Planification des ressources de production (MRP) :	23
1.8.2 La planification de lot sizing	24
1.8.3 Les méthodes de planification de lot de sizing	24

1.8.4 La méthode de programmation linéaire	25
1.9 Logiciel CPLEX	26
1.9.1 Historique	27
1.9.2 Concept de logiciel	27
1.9.3 Langage de programmation linéaire CPLEX :.....	27
1.9.4 Caractéristique et fonctionnalité de CPLEX.....	27
1.10 Conclusion:	28
Chapitre 02 : l'industrie de plastique	29
2.1 Introduction :.....	30
2.2 Origine de plastique	30
2.3 Le recyclage des déchets plastique	31
2.4 Production de plastique en Algerie	32
2.5 L'utilisation de plastique.....	32
2.6 Processus de fabrication des tubes de plastique :	34
2.6.1 Moulage par injection :.....	34
2.6.1.1 Définition :.....	34
2.6.2 Moulage par soufflage :.....	36
2.7 Département de plastique :.....	37
2.7.1 Atelier PVC :.....	38
2.7.1.1 Le processus de fabrication :.....	38
2.7.2 Atelier PEHD	39
2.7.2.1 Le processus de fabrication	40
2.8 Les entreprises qui fabriquent les produits de plastique en Algerie.....	41
2.9 Conclusion	41
Chapitre 03 : cas pratique	43
3.1 Introduction.....	44
3.2 Définition de la problématique	44
3.3 Le modèle mathématique du problème :.....	45
3.4 Programme CPLEX :	47
3.5 Interprétation des résultats :.....	49
3.6 Conclusion :	55
Conclusion générale	56
Bibliographie.....	58

Introduction Générale

L'industrie est un secteur économique crucial qui englobe la production de biens matériels à grande échelle. Elle est souvent considérée comme le moteur de l'économie, contribuant à la croissance, à la création d'emplois et au développement technologique. L'industrie couvre une vaste gamme de secteurs tels que l'automobile, l'électronique, l'agroalimentaire, la chimie, la construction, la métallurgie, la pharmaceutique et bien d'autres.

L'industrie se caractérise par l'utilisation de machines, d'équipements et de technologies avancées pour transformer les matières premières en produits finis. Elle peut impliquer des processus de fabrication complexes, des chaînes d'approvisionnement étendues et une main-d'œuvre spécialisée. L'industrie est également soumise à des réglementations et des normes de sécurité strictes pour garantir la qualité des produits et la protection des travailleurs.

Permet l'industrie y'a l'industrie plastique qui joue un rôle essentiel dans de nombreux secteurs économiques à travers le monde. Elle englobe la fabrication, la transformation et l'utilisation de matériaux plastiques pour produire une vaste gamme de produits et de composants. Les plastiques sont des matériaux polyvalents, légers, durables et peu coûteux, ce qui en fait des choix populaires dans de nombreux domaines tels que l'emballage, l'automobile, l'électronique, la construction et bien d'autres.

L'industrie plastique est caractérisée par une grande diversité de produits, allant des emballages en plastique aux pièces automobiles en passant par les appareils électroménagers. Les entreprises de cette industrie peuvent être impliquées dans différentes étapes, notamment la production de matières premières plastiques, la fabrication de produits finis en plastique ou encore la transformation et le recyclage des plastiques.

Depuis l'industrie plastique englobe la fabrication, la transformation et l'utilisation de matériaux plastiques, bénéficie grandement de l'optimisation de la planification de production. En raison de la diversité des produits plastiques et de la demande croissante dans de nombreux secteurs, il est essentiel d'optimiser la planification de la production pour atteindre une efficacité opérationnelle maximale.

L'optimisation de la planification de production revêt une importance cruciale pour une entreprise fabricant des tuyaux en polyéthylène haute densité (PEHD). Tout d'abord, il est essentiel de gérer efficacement les matières premières, en maintenant un approvisionnement adéquat en PEHD pour éviter les retards de production et les ruptures de stock, tout en évitant le sur stockage qui peut entraîner des coûts supplémentaires. Ensuite, il est nécessaire de planifier la capacité de production en fonction de la demande prévue et des contraintes de l'entreprise. Cela inclut la gestion des équipements de fabrication, des lignes de production et de la main-d'œuvre pour s'assurer que la capacité de production est suffisante pour répondre à la demande, tout en évitant les goulots d'étranglement et les inefficacités.

De plus, l'optimisation de la planification de production aide à maximiser l'utilisation des équipements de production spécifiques à l'industrie plastique, tels que les extrudeuses, les moules d'injection, les machines de soufflage, etc. Cela permet de réduire les temps d'arrêt, d'améliorer l'efficacité de production et d'optimiser les flux de travail.

En outre, l'optimisation de la planification de production dans l'industrie plastique permet de réduire les coûts de production. Cela inclut la gestion efficace des ressources, la minimisation des temps d'arrêt non planifiés, la réduction des erreurs de production et la maximisation de l'utilisation des capacités. En réduisant les coûts, les entreprises de l'industrie plastique peuvent améliorer leur rentabilité et leur compétitivité.

Dans ce contexte on va étudier un cas réel d'optimisation de planification de production pour une entreprise qui fabrique de type de produits de plastique (les tuyaux): le PVC et le PEHD ; et pour notre cas d'étude sera pour l'atelier de fabrication de PEHD de différents diamètres. Le but principal est d'optimiser la planification de production par la modélisation selon le logiciel CPLEX.

Et ce qu'on a dans cette mémoire en détail tel que le sujet de recherche est " L'optimisation de planification de production cas d'une entreprise qui fabrique les tubes PVC/PEHD ».

Pour atteindre les objectifs fixés, ce travail est divisé en trois parties présentées comme suit :

Le premier chapitre représente la partie théorique de mon travail et sera consisté de présenter tous les éléments importants pour la planification de production ; la logistique et l'outil utilisé pour modéliser notre problématique.

Dans le deuxième chapitre, j'ai fait une généralité sur le plastique et sur la production de plastique précisément les tubes de PVC et le PEHD.

Et pour le dernier chapitre j'ai fait une étude pratique d'optimisation tel que le modèle pour optimiser la planification de production, en tenant compte des contraintes spécifiques de l'atelier de PEHD de cette entreprise étudiée. Et j'ai mentionné à la fin les résultats obtenus

Chapitre 01 : La planification de production

1.1 Introduction :

La planification de production joue un rôle fondamental dans la réussite des entreprises modernes. Dans un environnement concurrentiel en constante évolution, il est essentiel de mettre en place des stratégies et des systèmes efficaces pour répondre aux demandes du marché, optimiser les ressources et garantir la satisfaction des clients. La planification de production offre une approche systématique pour atteindre ces objectifs et constitue donc un domaine d'étude crucial pour les professionnels de la gestion de la chaîne d'approvisionnement et de la production.

La planification d'entreprise est une tâche incontournable et complexe pour la direction. Faire face aux incertitudes constitue un défi de taille pour bon nombre d'entreprises. Une analyse approfondie des facteurs qui sont liés à ces incertitudes, et l'élaboration de plans de mesures concrets sont déterminantes pour le succès de l'entreprise.

Dans ce chapitre on a une vision globale sur la production, la planification ; la méthode de planification lot sizing et le logiciel CPLEX.

1.2 La logistique

1.2.1 Histoire et définitions

Que signifie le concept de LOGISTIQUE ? Le concept de logistique est une notion très ancienne qui s'est exprimée en premier lieu dans le milieu militaire. La logistique d'entreprise n'est apparue que longtemps après la fin de la deuxième guerre mondiale.

L'ASLOG (Association française de la logistique) définit la logistique comme « l'ensemble des activités qui ont pour but la mise à disposition au moindre coût d'une quantité de produits, à l'endroit et au moment où une demande existe ». Cette définition présente la logistique comme un ensemble très large de savoir faire techniques.

La notion de logistique d'entreprise n'est apparue que dans les années 50 : Marks et Taylor la définissent alors comme un « mouvement ou manutention de marchandises du point de production au point de consommation ».

Dix ans plus tard, la définition du dictionnaire reste très générale : « l'ensemble des moyens et méthodes concernant l'organisation ». L'économiste anglais John Magee (1968) complète alors cette définition comme « une technique de contrôle et de gestion des flux de matières et de produits depuis leur source d'approvisionnement jusqu'à leur point de consommation » [13].

Apparaît ici la notion d'organisation des flux tout au long du cycle du produit. Il reste alors à préciser que la logistique concerne la maîtrise de ces flux et que cette démarche se situe à deux niveaux :

- a) Les flux physiques et les flux d'information

De ce fait, la logistique concerne un très vaste domaine lié au mouvement des produits.

Concrètement, cela concerne les opérations et techniques telles que :

- la localisation des usines et des entrepôts,
- la gestion et la réception des matières premières,
- la gestion et le stockage de ces matières,
- la gestion de production,
- la gestion et le stockage des en-cours,
- la gestion et le stockage des produits finis,
- l'emballage,
- la préparation de commandes,
- la manutention,
- les transports et les tournées de livraison.

La logistique couvre donc plusieurs réalités, avec néanmoins un point de convergence, qui se détermine par l'optimisation de ces flux de produits. C'est une démarche de gestion ou d'organisation de ces flux dans le temps et dans l'espace en quatre périodes :

- gestion des flux d'approvisionnements,
- gestion des flux de production,
- gestion des flux de distribution,
- gestion des flux liés au service après-vente (logistique de soutien).

b) Logistique et gestion de production

➤ Fonctions couvertes par la logistique

Dans les entreprises, on trouve des fonctions logistiques bien différentes :

– celles qui assurent des fonctions opérationnelles :

- gestion de la flotte de camions et des prestataires de transport ;
- gestion des articles en stock ;
- gestion des entrepôts ;
- ordonnancement des travaux et approvisionnement des lignes de production en pièces pour une bonne maîtrise des flux ;

– celles qui assurent le contrôle des flux réels afin d'en dégager des axes d'amélioration ;

- celles qui organisent la productivité, qui redéfinissent les organisations logistiques ou de production (organisation interne ou externalisation) ;
- celles qui assurent le soutien logistique dans les services après-vente.

➤ Logistique ou gestion de production – Un débat d’arrière-garde

À part les fonctions opérationnelles concernant spécifiquement les transports, on retrouve ces mêmes fonctions dans le domaine de la gestion de production. Ne cherchons donc pas à opposer ces deux approches et ne cherchons pas à polémiquer pour savoir quelle approche englobe l’autre ; il faut se concentrer, avant tout, sur la maîtrise des flux de production dans le but d’améliorer les performances globales de l’entreprise.

➤ Une logistique ou des logistiques

Plusieurs associations cherchent, chacune de leur côté, à définir cette fonction logistique. Il semble se dégager deux types de logistique :

- une logistique de flux qui vise à optimiser les flux de production d’un équipement
- et
- une logistique de soutien qui vise à optimiser l’utilisation d’un équipement tout au long de son cycle de vie.

1.2.2 Organisation et gestion de la production

1. Principe de base

L’objectif principal de l’organisation et gestion de la production est d’assurer une bonne régulation du flux des produits dans l’entreprise (flux des pièces allant du fournisseur aux clients en passant par le stock de matière première, la production et le stock de produits finis).

2. Pilotage des stocks

Cette fonction a pour objet d’assurer le pilotage des approvisionnements des articles achetés ou fabriqués dans le but de satisfaire, au moment opportun, la mise à disposition de ceux-ci pour l’élaboration des produits ou pour les besoins des clients. Elle doit permettre de répondre aux trois questions clés concernant les produits à acheter ou à fabriquer : QUOI ? QUAND ? COMBIEN ?

Le pilotage des stocks se compose de 2 sous-fonctions :

- **le suivi des stocks** qui consiste en une comptabilité physique et comptable des produits en stocks. À cet effet, il est important de noter l’importance de la codification des articles ;
- **la gestion des stocks** qui consiste, pour chaque produit, à maintenir le bon niveau des stocks et à définir la politique de réapprovisionnement et de distribution la mieux adaptée.

Remarque : Il est peut être banal, mais indispensable, de rappeler qu'effectuer un suivi des stocks ne signifie pas gérer le stock.

3. Pilotage de la production

Cette fonction, plus couramment connue sous le nom d'ORDONNANCEMENT, a pour objet de prévoir et de coordonner l'ensemble des ressources physiques et humaines nécessaires à la fabrication. Elle doit permettre d'optimiser ces ressources tout en respectant les délais de réalisation fixés. Elle doit donc répondre aux trois mêmes questions : QUOI ? QUAND ? COMBIEN ?

L'objectif final de l'ordonnancement, centralisé ou décentralisé, est avant tout de piloter la production de l'entreprise. Il consiste, en fonction des prévisions de commandes clients et de disponibilité des approvisionnements et des moyens de production, à assurer la continuité du flux des pièces dans l'entreprise en :

- déterminant le calendrier prévisionnel de fabrication (planning d'atelier) ;
- distribuant les documents nécessaires à la bonne exécution des fabrications (lancement en fabrication) ;
- suivant l'exécution des fabrications (suivi de production).

4. Cohérence de ces pilotages

Il n'est pas inutile de rappeler qu'un des objectifs de la gestion de production est d'assurer la continuité du flux de produits. Toute rupture de ce flux peut être considérée comme dommageable et entraîne automatiquement une diminution des performances de l'entreprise.

De nombreux travaux ont donc été menés dans le but d'améliorer ces pilotages. Ils se sont intéressés à chaque pilotage séparément (gestion des stocks, MRPO, ordonnancement) ou simultanément (MRP1, MRP2, Kanban). D'autres travaux ont conduit à faire évoluer des modèles existants en intégrant de nouveaux concepts (OPT) ou à faire cohabiter des modèles entre eux (convivialité MRP-Kanban).

5. Dualité CONCEPT – OUTIL

Pour chaque pilotage vu précédemment, il existe plusieurs outils. Cependant, ceux-ci, adaptés chacun à des types d'organisation, ne sont pas utilisables de façon universelle. Il est donc nécessaire de mener une réflexion préalable sur la nature du flux et sur son organisation avant de définir l'outil ad hoc.

Pourtant, il n'est pas rare de remarquer que beaucoup de personnes mettent en avant l'outil sans quelquefois se soucier de son adéquation avec le problème à résoudre.

Pour notre part, nous conseillons d'utiliser une méthode structurée d'analyse de l'entreprise qui consiste

- tout d'abord à réaliser **l'étude du produit** : pour en déterminer son niveau de complexité,

- ensuite, d'effectuer **l'étude du marché** : pour dégager les volumes qui permettront, en fonction de la complexité du produit,
- de déterminer **l'organisation de la production** la mieux adaptée pour la fabrication de ce produit,
- et seulement après définir le (ou les) outil(s) nécessaire(s) [13].

1.3 Définition de production :

La production est une activité économique exploitant les ressources (matérielles et humaines), le travail et du capital dans le but de réaliser des biens ou des services.

La production être définie comme le processus par lequel des ressources, telles que les matières premières, les équipements, la main-d'œuvre et les connaissances techniques, sont utilisées pour créer des biens tangibles ou fournir des services immatériels. C'est une activité économique essentielle qui transforme les inputs en outputs, créant ainsi de la valeur ajoutée.

La production englobe toutes les étapes nécessaires pour fabriquer un produit ou exécuter un service, depuis la conception et l'approvisionnement en matières premières jusqu'à la transformation et la distribution du produit final. Cela implique la coordination efficace des ressources, des processus et des personnes afin d'atteindre les objectifs de qualité, de quantité, de coûts et de délais fixés.

La production peut se décliner en différents types, tels que la production manufacturière, la production agricole, la production industrielle, la production de services, etc. Chaque type de production a ses propres caractéristiques et exigences spécifiques, mais tous partagent l'objectif commun de fournir des biens ou des services répondant aux besoins du marché.

La gestion de la production est une discipline qui vise à optimiser les processus de production en utilisant des méthodes, des outils et des techniques appropriés. Elle comprend la planification, l'organisation, la coordination, la supervision et le contrôle de toutes les activités liées à la production, dans le but d'atteindre une efficacité maximale, d'assurer la qualité des produits et de maximiser la satisfaction des clients [2].

1.4 Les modes de production :

Le mode de production caractérise le processus de réalisation d'un produit.

➤ Production continue :

La production continue concerne des produits dont le processus de transformation des matières ne doit pas s'interrompre entre deux postes de travail consécutifs, c'est-à-dire sans stockage intermédiaire entre les postes. On parle souvent dans ce cas « d'industrie de process » [3].

Les procédés de transformation mis en œuvre dans ce type de production imposent des investissements considérables qui ne sont rentabilisés que grâce à un taux élevé

d'utilisation et à une très forte automatisation. Dans ce type de production les postes de transformation sont disposés en lignes de produits qui nécessitent un bon équilibrage, c'est-à-dire :

- une vitesse régulière de transformation et de transfert,
- un système d'approvisionnement efficace.

On a recours à ce type de production lorsque l'on a un volume important de production et une bonne stabilité de la demande.

Exemple : raffineries de pétrole, cimenteries...

➤ Production discontinue

Dans cette production, également appelée « production discrète », chaque produit est réalisé suivant un processus de production qui peut être fractionné pour permettre la reprise de produits semi-finis. La production discontinue peut-être séquentielle ou non.

L'optimisation d'une telle production vise à minimiser les en-cours, les retards... et à maximiser l'occupation des moyens de production.

Exemple : industries manufacturières...

➤ Production flow-shop/job-shop

Dans une production de type « flow-shop », les produits subissent une même séquence d'opérations avec des temps opératoires éventuellement différents.

Dans une production de type « job-shop », l'élaboration du produit entraîne une utilisation des postes de charge dans un ordre variable en fonction de son processus d'élaboration.

Généralement, ceux-ci sont regroupés en sections homogènes ou en îlots de fabrication.

➤ Production hybride

La plupart des systèmes de production actuels sont de plus en plus organisés autour d'une chaîne de production fortement automatisée. Un tel système peut alors se décomposer en trois sous-systèmes :

- un sous-système de production discontinue, en amont de la chaîne automatisée de production, chargé de la préparation des composants nécessaires à la production de la chaîne ;
- un sous-système de production continue représenté par la chaîne de production ;
- un sous-système de production discontinue en aval de la chaîne, chargé de la personnalisation, du conditionnement et de l'expédition des produits finis réalisés par la chaîne.

Ces trois sous-systèmes communiquent, entre eux, par un stock ; la figure sous dusses montre ces sous-systèmes :

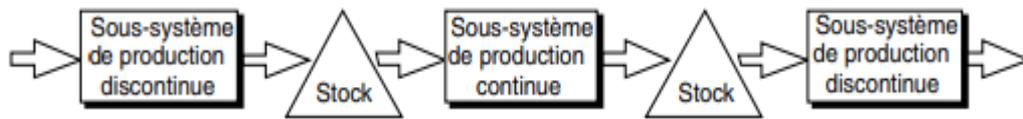


Figure 1:Modèle d'une production hybride.

- Production en flux poussé/flux tiré

Dans une production à flux poussé, on fabrique les produits à partir de prévisions de ventes, ou de commandes fermes, et les ordres concernant la fabrication sont transmis de façon à réaliser progressivement les produits.

Dans une production à flux tiré, on fabrique les produits pour remplacer les produits qui ont été vendus. Les ordres concernant la fabrication sont transmis de façon à terminer les produits ou les sous-ensembles déjà en cours de fabrication en fonction de la demande réelle [3].

1.5 Les flux de production :

Les flux de production font référence à la séquence des activités et des étapes impliquées dans le processus de fabrication d'un produit ou la prestation d'un service. Il décrit le mouvement des matières premières, des composants, de l'information et de la main-d'œuvre tout au long de ce processus.

- Flux physique : Le flux physique représente le mouvement physique des matières premières, des composants et des produits tout au long du processus de production. Il comprend les différentes étapes telles que l'approvisionnement, le stockage, la transformation, l'assemblage et l'expédition. Le flux physique peut être linéaire, où les produits passent successivement d'une étape à l'autre, ou il peut être en boucle, où certains composants ou produits reviennent à des étapes antérieures pour un traitement supplémentaire ou des ajustements.
- Flux d'information : Le flux d'information représente la circulation des données, des instructions et des informations tout au long du processus de production. Il permet la coordination et la synchronisation des différentes étapes de production. Le flux d'information peut inclure des ordres de travail, des spécifications techniques, des instructions de production, des rapports de qualité, des prévisions de demande, etc. Les systèmes d'information et de communication sont essentiels pour assurer un flux d'information efficace.
- Flux de valeur : Le flux de valeur est une composante spécifique du flux physique qui se concentre sur les activités qui ajoutent de la valeur au produit ou au service du point de vue du client. Il s'agit de toutes les étapes du processus qui contribuent directement à la transformation des matières premières en produit fini et qui répondent aux besoins du client. L'élimination des activités qui n'ajoutent pas de valeur est une préoccupation majeure dans les approches de gestion telles que le lean manufacturing.

- Flux financier : Le flux financier englobe tous les aspects monétaires associés au processus de production, y compris les coûts, les paiements, les revenus et les investissements. Il implique le suivi des dépenses liées aux matières premières, à la main-d'œuvre, aux équipements, aux frais généraux, ainsi que la gestion des flux de trésorerie, des coûts de production et des marges bénéficiaires.

L'optimisation des flux de production est un objectif clé pour améliorer l'efficacité, la productivité et la qualité dans les processus de fabrication et de prestation de services. En réduisant les temps d'attente, les mouvements inutiles, les stocks excessifs et les interruptions, les entreprises peuvent réaliser des gains d'efficacité significatifs. Des outils et des approches tels que la gestion de la chaîne d'approvisionnement, le juste-à-temps, le Six Sigma et le kaizen sont utilisés pour améliorer les flux de production [3].

1.6 Les types de production :

Le type de production d'un produit se caractérise par la quantité de produits à fabriquer lancée en une fois et s'applique uniquement dans le cas de production discontinue.

- Production par lot

Dans ce type de production, le même outil de production est utilisé pour fabriquer une grande variété de produits analogues mais non identiques. Le lot de fabrication peut être composé de quelques unités à quelques centaines d'unités. Chaque changement de lot de fabrication nécessite un nouveau réglage qui peut aller jusqu'à une reconfiguration complète du poste. Ceci se traduit par un abaissement du taux d'occupation des postes entraînant inéluctablement une augmentation du prix de revient des produits fabriqués.

Malgré ces inconvénients, ce mode de production est utilisé par le plus grand nombre d'entreprises, déterminé en termes de main-d'œuvre directe ou en terme de capital investi, car il offre une plus grande souplesse de réaction face aux demandes des clients [3].

Exemple : équipements industriels...

- Production unitaire

C'est un cas particulier de la fabrication par lot. Dans ce type de production, le produit est fabriqué à l'unité, ou en très petite série, conformément à un besoin spécifique. La réalisation de tels produits nécessite généralement beaucoup de main-d'œuvre impliquant un cycle de production relativement long.

Exemple : bâtiments, construction navale, aéronautique...

- Production de masse

Dans un tel mode, les produits sont fabriqués en très grande quantité. Ce sont des produits standards ou similaires qui nécessitent l'utilisation d'un outil de production

spécialisé constitué de machines « transfert ». Ce sont des machines très onéreuses qui, du fait de leur spécificité, doivent être amorties sur la durée de la fabrication [3].

Exemple : électroménager, automobiles...

1.7 Types de fabrication :

Le type de fabrication d'un produit permet de définir la relation client/entreprise. Il caractérise le type de disponibilité et de spécifications des produits fabriqués.

➤ Fabrication à la commande

Elle concerne les produits coûteux, spéciaux ou prototypes. Dans ce cas, le produit n'est pas disponible au moment de la commande et nécessite un délai de réalisation. De plus, le prix n'est pas standard et il se négocie, en même temps que les délais, à la commande.

Exemple : immeubles, navires, ouvrages d'art...

➤ Fabrication pour stockage

Elle concerne des produits peu coûteux ou d'usage général qui sont fabriqués en grande quantité. Le produit est disponible immédiatement à la vente à un prix standard fixé par catalogue. La production est souvent une production de masse ou une production par lot économique [3].

Exemple : électroménager, matériel hi-fi...

➤ Fabrication mixte

Cette fabrication est un dérivé de la fabrication à la commande. Afin de diminuer les délais de réalisation, les produits sont conçus de telle sorte qu'il est possible de fabriquer des sous-ensembles suivant une politique de fabrication sur stock et ne conserver la personnalisation du produit final par assemblage de ces sous-ensembles qu'au moment de la commande.

Toutes les entreprises qui souhaitent améliorer leurs performances vis-à-vis de leurs clients tendent à choisir, de plus en plus, ce type de fabrication [3].

Exemple : lotisseurs, navigation de plaisance...

1.8 La planification de production

1.8.1 Définition de planification

La planification en général peut être définie comme "une activité intégrative dans laquelle un effort est fait pour maximiser l'efficacité globale d'une entreprise en tant que système, en fonction des objectifs de l'entreprise".

La planification de la production peut être considérée comme une méthode de gestion des flux à laquelle sont associées des techniques opérationnelles. Il existe différents

types de planification qui permet à l'entreprise de fournir aux clients le produit dont ils ont besoin dans les délais prévus [6].

La planification des opérations consiste à définir, en fonction des délais et des priorités, les dates de début des opérations d'un ordre (OT = Ordre de travail ; OP = Ordre de fabrication, OM = Ordre de maintenance, AP = Ordre d'achat...), afin qu'elles soient réalisées dans les délais prévus. Lorsque plusieurs ordres, qui nécessitent les mêmes ressources, sont lancés en même temps, différentes règles de priorité peuvent être utilisées pour fixer les dates de début d'exécution. Dans la fonction de production, la planification se fait de manière séquentielle et selon une hiérarchie à trois niveaux. Globalement, elle suit l'approche suivante :

- Estimation des besoins de consommation par famille de produits.
- Décomposition des exigences de chaque famille de produits en références finales (produit fini).
- Calcul des besoins bruts sur la base de la nomenclature.
- Évaluation des stocks, calcul des besoins nets et planification des commandes
- Planification des charges (main-d'œuvre, machines, temps de fonctionnement) en fonction des plages de fonctionnement.
- Exécution du plan de production [6].

1.8.1.1 Les objectifs :

Parmi les objectifs principaux de la planification on a :

- ✓ Déterminer le niveau global de production à chaque période, de manière à rencontrer au mieux la demande prévue.
- ✓ Choisir parmi les différentes stratégies possibles pour la production celles auxquelles on aura recours.
- ✓ La nature des opérations à planifier, unité de mesure de la demande.
- ✓ Les ressources prises en compte (argent, moyens de production, personnels, etc.).
- ✓ Souvent, des mesures de performance [6].

1.8.1.2 Niveaux de planification :

Les prévisions d'activité d'une entreprise s'effectuent à différents niveaux d'agrégation et d'horizon.

1.8.1.2.1 La planification à long terme (PIC) :

Le PIC, Plan Industriel et Commercial, Conçu au niveau stratégique de l'entreprise, le PIC est une représentation future des activités de production et vente des produits fabriqués. Il permet de prévoir sur un horizon de deux à trois ans l'évolution du marché et donc de la demande. De ce fait, le PIC aide à prendre des décisions à long termes sur la gestion de l'ensemble des ressources (équipements de production, main d'œuvre, capacité de stockage, capacité de transport, activités sous traitées, fiabilité des sources d'approvisionnement...) et aide à trouver l'adéquation entre ces

ressources, les moyens financiers et les objectifs de vente. La grande particularité du PIC réside sur la nature des données qui le composent. Le plan industriel et commercial utilise des grandes masses d'information, il traite les produits par familles et non pas individuellement ou par références finales [4].

1.8.1.3 La planification à court terme (PDP) :

Le PDP ou (Programme Directeur de Production). Désagrège le plan à moyen terme afin d'établir :

- la planification sur un horizon plus court (souvent 3 à 6 mois)
- une découpe plus fine en sous-périodes (semaines).
- une désagrégation des familles en références finales.

Il peut donc être vu comme une version détaillée du plan agrégé de production dans laquelle est intégrée toute l'information actualisée relative au cours terme (prévisions de demande, état des stocks, disponibilité des machines, etc.).

Le rôle essentiel du PDP est de planifier et de déclencher la production des références finales.

Il fournit également l'information de base pour la gestion des matières et composants nécessaires à la production de ces références. Avant de procéder plus avant, précisons quelque peu le sens de ces définitions [4].

1.8.1.4 Planification des ressources de production (MRP) :

MRP est un sigle signifiant Materials Requirements Planning, en français planification des besoins en composantes.

Le MRP est toujours la partie centrale d'un système de gestion de production informatisé. Mélange de logiciel et de base de données, le MRP a pour rôle principal de permettre la planification de la production en fonction des ressources en personnel, en matières premières, en machines et en temps, par rapport à un besoin à date ou un besoin de stock.

On distingue le MRP, que l'on peut traduire par « planification des besoins en composants », né formellement aux États-Unis en 1964 et qui ne représente alors qu'une méthode de calcul des besoins en matières, de son évolution, le MRP2 ou MRP II (Manufacturing Resources Planning). Ce modèle plus large, qui intègre la gestion de toutes les ressources de l'entreprise (consommables, c'est-à-dire « matières et composants », et renouvelables, c'est-à-dire « capacité machines et main-d'œuvre »), constitue un système de pilotage des ressources qui repose sur la prévision des ventes et les nomenclatures de produits et qui opère comme le MRP en flux poussé (c'est-à-dire que l'on établit le plan de production sur la base de prévisions).

Pour chaque référence, la méthode MRP détermine successivement les quantités suivantes:

- a) Besoins bruts (explosion des nomenclatures) : Les besoins bruts pour chaque référence sont dérivés des 'lancements planifiés' de chacune des références dans la composition desquelles entre la référence courante.
- b) Besoins nets : Les besoins nets sont déterminés sur base des besoins bruts, des stocks nets et des approvisionnements attendus.
- c) Approvisionnements planifiés : Les approvisionnements planifiés sont déterminés par regroupement (éventuel) des besoins nets de plusieurs périodes successives.
- d) Absorption des délais. Les dates de lancement sont obtenues en retranchant les délais d'obtention des dates d'approvisionnement planifiées [4].

1.8.2 La planification de lot sizing

Le problème de lot-sizing est étudié depuis de nombreuses années et les extensions et méthodes développées sont variées. Le problème de lot-sizing consiste à déterminer le plan de production d'un ou plusieurs articles sur un horizon de temps fini et divisé en T périodes. Ce problème a été formellement décrit par Wagner et Whitin et depuis, il a été largement étudié et enrichi pour s'approcher des problématiques réelles. L'objectif est de présenter de façon non exhaustive les principales extensions et méthodes de résolution pour ce problème. L'organisation des sections permettra de proposer une vision globale du problème et de l'évolution des contributions scientifiques [8].

1.8.3 Les méthodes de planification de lot de sizing

La planification de lot sizing, également connue sous le nom de détermination de la taille des lots, est un processus de décision dans la planification de la production qui consiste à déterminer la quantité optimale à produire lors de chaque cycle de production. Il s'agit de déterminer la taille du lot de production qui minimise les coûts tout en satisfaisant les objectifs de service à la clientèle et les contraintes de capacité.

La planification de lot sizing est influencée par plusieurs facteurs, tels que les coûts de configuration, les coûts de stockage, la demande du marché, les contraintes de capacité et les délais de livraison. L'objectif principal est de trouver un équilibre entre les coûts de configuration, qui sont associés au démarrage et à l'arrêt de la production, et les coûts de stockage, qui sont associés à la détention de stocks.

La planification de lot sizing vise à minimiser les coûts globaux de production, y compris les coûts de configuration et de stockage, tout en maintenant un niveau de service à la clientèle satisfaisant. Elle contribue à une utilisation efficace des ressources de production, à la réduction des coûts de production et de stockage, à l'optimisation des niveaux de stock et à la satisfaction des clients en fournissant les produits dans les délais souhaités.

Il existe différentes méthodes de planification de lot sizing qui peuvent être utilisées pour déterminer la taille optimale des lots de production. Voici quelques-unes des méthodes couramment utilisées :

- Méthode de la quantité économique de commande (EOQ) : Cette méthode repose sur l'équilibre entre les coûts de configuration et les coûts de stockage. Elle vise à minimiser les coûts totaux en déterminant la quantité économique de commande qui minimise la somme des coûts de configuration et des coûts de stockage. L'EOQ considère généralement une demande constante, des coûts fixes de configuration et des coûts variables de stockage.
- Méthode de Wilson : La méthode de Wilson est une variante de l'EOQ qui prend en compte les délais de livraison. Elle cherche à déterminer la taille optimale des lots de commande en tenant compte des délais de réapprovisionnement et des coûts associés à la détention de stock pendant les délais de livraison. La méthode de Wilson est utile lorsque les délais de livraison ne sont pas négligeables.
- Méthode de la programmation linéaire : La programmation linéaire peut être utilisée pour résoudre des problèmes de lot sizing plus complexes. Cette méthode permet de prendre en compte plusieurs contraintes, telles que les contraintes de capacité, les contraintes de ressources et les objectifs multiples. En utilisant la programmation linéaire, il est possible d'optimiser simultanément la taille des lots de production, les capacités de production et d'autres facteurs pertinents.
- Méthode de la programmation dynamique : La programmation dynamique est une approche basée sur la décomposition du problème en sous-problèmes plus petits et plus gérables. Elle permet de prendre en compte l'effet cumulatif des décisions de lot sizing sur une période de planification donnée. La programmation dynamique permet de trouver la politique de lot sizing optimale en considérant les coûts cumulatifs sur plusieurs périodes.
- Méthode heuristique : Les méthodes heuristiques sont des approches basées sur des règles empiriques et des expériences antérieures. Elles peuvent être utilisées lorsque les modèles analytiques précis ne sont pas disponibles ou lorsque les problèmes de lot sizing sont complexes. Les heuristiques peuvent fournir des solutions satisfaisantes rapidement, mais elles ne garantissent pas l'optimalité [10].

1.8.4 La méthode de programmation linéaire

La méthode de la programmation linéaire est une approche mathématique utilisée dans la planification de lot sizing pour optimiser la taille des lots de production. Elle permet de modéliser le problème de planification de production sous forme d'un modèle mathématique linéaire afin de trouver la solution optimale.

La programmation linéaire repose sur le principe de maximisation ou de minimisation d'une fonction objectif linéaire, tout en respectant un ensemble de contraintes linéaires. Dans le cas de la planification de lot sizing, la fonction objectif peut être la minimisation des coûts totaux, tels que les coûts de configuration et de stockage, ou la maximisation de la satisfaction des clients.

Le modèle de programmation linéaire prend en compte diverses variables et paramètres, tels que les quantités de production, les capacités de production, les coûts, les contraintes de stockage, les contraintes de capacité et les délais de livraison. Ces

variables et paramètres sont exprimés sous forme de variables de décision et de contraintes linéaires dans le modèle.

Une fois que le modèle de programmation linéaire est formulé, il peut être résolu à l'aide de techniques d'optimisation, telles que la méthode du simplexe ou des algorithmes de programmation linéaire en nombres entiers. La résolution du modèle permet de déterminer la taille optimale des lots de production qui minimise les coûts ou maximise les performances, tout en respectant les contraintes spécifiées.

La programmation linéaire est largement utilisée dans la planification de lot sizing en raison de sa capacité à résoudre des problèmes complexes de manière efficace et à fournir des solutions optimales. Elle offre une approche rigoureuse et mathématique pour prendre des décisions de planification de production éclairées et optimisées [11].

1.9 Logiciel CPLEX

Le CPLEX est un logiciel d'optimisation mathématique très réputé utilisé pour résoudre des problèmes de programmation linéaire, mixte en nombres entiers, quadratique et convexe.

Le CPLEX fournit une interface conviviale et puissante pour modéliser et résoudre des problèmes d'optimisation complexes. Il permet de formuler des modèles mathématiques précis en utilisant un langage de modélisation, tel que le langage de modélisation mathématique (Mathematical Modeling Language, MPL) ou le langage de programmation par contraintes (Constraint Programming Language, CPL).

Lorsque vous utilisez le CPLEX, vous spécifiez les variables, les contraintes et la fonction objectif de votre problème d'optimisation, en tenant compte des paramètres et des contraintes spécifiques à votre cas. Une fois que le modèle est formulé, le CPLEX applique des techniques d'optimisation avancées pour trouver la meilleure solution possible.

Le CPLEX dispose d'algorithmes sophistiqués pour résoudre efficacement les problèmes d'optimisation, y compris des méthodes du simplexe améliorées, des méthodes de coupes, des techniques de branchement et de coupes pour les problèmes mixtes en nombres entiers, et bien plus encore. Il est capable de traiter des problèmes de grande taille avec des milliers de variables et de contraintes.

En utilisant le CPLEX, vous pouvez obtenir des solutions optimales ou proches de l'optimalité pour des problèmes de planification de lot sizing complexes. Il offre également des fonctionnalités avancées, telles que l'analyse de sensibilité, la génération de rapports détaillés, et la possibilité d'incorporer des contraintes et des objectifs supplémentaires.

Le CPLEX est un logiciel commercial et nécessite une licence pour être utilisé. Il est couramment utilisé dans les domaines de la recherche opérationnelle, de la gestion de la chaîne d'approvisionnement, de la logistique et d'autres domaines où l'optimisation joue un rôle clé dans la prise de décision [12].

1.9.1 Historique

Le logiciel CPLEX a été développé à l'origine par Robert E. Bixby et d'autres chercheurs de l'Université Rice dans les années 1980. Il a été utilisé pour résoudre des problèmes de programmation linéaire de grande taille et a rapidement gagné en popularité en raison de ses performances exceptionnelles.

En 1997, la société CPLEX Optimization Inc. a été créée pour commercialiser et développer le logiciel CPLEX. La société a continué à améliorer le logiciel et à développer de nouvelles fonctionnalités pour répondre aux besoins des utilisateurs.

En 2009, IBM a acquis CPLEX Optimization Inc. et a intégré le logiciel CPLEX à sa gamme de produits d'optimisation. Depuis lors, IBM continue de développer et de soutenir activement le logiciel CPLEX.

1.9.2 Concept de logiciel

Le logiciel CPLEX est conçu pour résoudre des problèmes d'optimisation mathématique de grande envergure. Il utilise des algorithmes avancés et des techniques d'optimisation pour trouver les meilleures solutions possibles.

Le logiciel est doté d'une interface utilisateur conviviale qui permet aux utilisateurs de formuler leurs problèmes d'optimisation à l'aide d'un langage de modélisation mathématique ou de langages de programmation par contraintes.

CPLEX utilise des techniques de résolution d'optimisation telles que la méthode du simplexe, des méthodes de coupes, des techniques de branchement et de coupes pour les problèmes mixtes en nombres entiers, et d'autres algorithmes sophistiqués pour trouver des solutions optimales ou proches de l'optimalité.

1.9.3 Langage de programmation linéaire CPLEX :

Le CPLEX est un langage de modélisation qui permet d'écrire des programmes d'optimisation linéaire facilement grâce à une syntaxe proche à la formulation mathématique, et qui permet aussi de les résoudre en donnant la solution la plus optimale des solutions réalisés.

Pour ce faire l'utilisateur doit créer d'abord un projet OPL dans le CPLEX qui doit contenir au minimum trois fichiers :

- Un fichier modèle (.mod) ; qui contient la modélisation mathématique du problème ; les paramètres, les variables de décisions , la fonction objectif à minimiser ou maximiser et les contraintes.
- Un fichier data (.data) ; qui contient les valeurs des paramètres.
- Un fichier ops (.ops) ; qui permet de paramétrer le solveur CPLEX.

1.9.4 Caractéristique et fonctionnalité de CPLEX

Le logiciel CPLEX peut résoudre une large gamme de problèmes d'optimisation, y compris la programmation linéaire, la programmation quadratique, la programmation convexe, la programmation mixte en nombres entiers, et d'autres problèmes d'optimisation complexe. Il prend en charge la modélisation de problèmes avec des

milliers de variables et de contraintes, permettant aux utilisateurs de résoudre des problèmes de grande taille.

CPLEX offre des fonctionnalités avancées telles que l'analyse de sensibilité, la génération de rapports détaillés, la possibilité d'incorporer des contraintes et des objectifs supplémentaires, et la capacité de gérer des problèmes multi-objectifs.

Le logiciel CPLEX peut être utilisé dans divers domaines tels que la recherche opérationnelle, la gestion de la chaîne d'approvisionnement, la logistique, la finance, la planification de la production, la planification des ressources, et d'autres domaines où l'optimisation joue un rôle clé [12].

1.10 Conclusion:

Dans ce chapitre on a vu une vue globale sur la logistique dans le contexte de la production et de la planification de la production ; tel qu'il est essentiel pour coordonner efficacement les flux de matériaux, d'informations et de ressources.

Et la modélisation linéaire, telle que le lot sizing utilisé avec des outils comme le logiciel CPLEX afin d'optimiser la gestion des stocks et des commandes pour minimiser les coûts tout en répondant à la demande.

La planification de production établit un plan détaillé en tenant compte des ressources, des délais et des priorités. En combinant la logistique, la planification de production et la modélisation linéaire, les entreprises améliorent leur efficacité, réduisent les coûts et garantissent la satisfaction client.

Et dans le chapitre suivant nous avons vu l'industrie de plastique ; leurs origines, l'utilisation de plastique et le mode de fabrication de quelque type de plastique ; et on a cité quelques entreprises algériennes qui fabriquent ce type de production.

Chapitre 02 : l'industrie de plastique

2.1 Introduction :

Le plastique a révolutionné notre monde de manière sans précédent. Il est devenu un pilier essentiel de notre vie moderne, utilisé dans une multitude de secteurs tels que l'emballage, l'industrie automobile, l'électronique et la construction. Cependant, la production massive de plastique soulève des questions sur son impact environnemental, sa durabilité et ses conséquences à long terme.

La production de plastique repose principalement sur l'utilisation de matières premières fossiles, telles que le pétrole brut et le gaz naturel. Ces ressources non renouvelables sont transformées en polymères, qui sont les éléments de base du plastique, par des processus chimiques complexes. Une fois les polymères formés, ils peuvent être façonnés en une variété de produits, des emballages jetables aux pièces d'automobiles en passant par les textiles.

La production de plastique a connu une croissance exponentielle au cours des dernières décennies, alimentée par sa polyvalence, sa facilité de fabrication et son faible coût. Cependant, cette expansion a entraîné des préoccupations environnementales majeures. Les déchets plastiques, en particulier les plastiques à usage unique, ont créé une crise mondiale de la pollution, avec des effets néfastes sur les écosystèmes terrestres et marins.

Les déchets plastiques sont extrêmement persistants dans l'environnement, mettant des centaines d'années à se décomposer. Ils peuvent s'accumuler dans les océans, les rivières, les sols et les décharges, entraînant des problèmes écologiques, tels que l'asphyxie de la faune marine et les problèmes de santé pour les animaux terrestres. De plus, la production et la combustion de plastique contribuent aux émissions de gaz à effet de serre, amplifiant ainsi les préoccupations liées au changement climatique.

En réponse à ces défis, de nombreuses initiatives ont été lancées pour réduire la dépendance au plastique et promouvoir une production plus durable. Le recyclage et la réutilisation des plastiques sont encouragés, ainsi que l'adoption de pratiques de conception et de fabrication éco-responsables. De plus, des recherches sont en cours pour développer des matériaux alternatifs, tels que les bioplastiques dérivés de sources végétales, qui offrent des avantages potentiels en termes de biodégradabilité et d'empreinte carbone réduite.

Dans ce chapitre on verra l'origine de plastique, l'utilisation de plastique, le processus de production, et quelque entreprise Algérien qui fabrique des produits en plastique.

2.2 Origine de plastique

Le naphthalène, ingrédient de base du plastique est un liquide obtenu par le raffinage du pétrole qui se condense entre 40 et 180 °C. Le naphtha doit passer par une opération de craquage avant d'être utilisé par les plasturgistes. Le craquage c'est un refroidissement brutal de 800 à 400 °C. Les grosses molécules d'hydrocarbures qui constituent le naphtha se décomposent en molécules plus facilement exploitables. Les monomères résultant après craquage contiennent entre 2 et 7 atomes de carbone chacun. Grâce à

des réactions d'addition ou de condensation ils se lient entre eux pour former des polymères.

Après le raffinage, les polymères peuvent être sous différentes formes (granulés, liquides ou de poudres). L'obtention des différents matériaux plastiques que nous connaissons sont obtenus en ajoutant d'adjuvants et d'additifs. Ils sont mis en forme à la fin par moulage, extrusion, injection ou encore par thermoformage [2].

2.3 Le recyclage des déchets plastique

Le recyclage des déchets plastiques est devenu un enjeu majeur pour l'industrie du plastique et la société dans son ensemble. Il fait partie intégrante des efforts mondiaux visant à réduire la quantité de déchets plastiques qui se retrouvent dans les décharges, les océans et les écosystèmes naturels. Le recyclage du plastique offre de nombreux avantages, notamment la réduction de la consommation de ressources naturelles, la diminution de l'empreinte carbone et la préservation de l'environnement.

Le processus de recyclage des déchets plastiques comprend plusieurs étapes. Tout d'abord, les plastiques collectés sont triés en fonction de leur type, car différents types de plastiques nécessitent des processus de recyclage spécifiques. Ensuite, les plastiques triés sont nettoyés pour éliminer les contaminants tels que la saleté, les résidus alimentaires ou les étiquettes.

Une fois propres, les plastiques sont broyés en petits morceaux appelés "paillettes" ou "granules". Ces morceaux de plastique sont ensuite fondus et transformés en granulés qui peuvent être utilisés comme matière première pour fabriquer de nouveaux produits en plastique. Les granulés recyclés peuvent être utilisés dans une variété d'applications, allant des emballages aux textiles, en passant par les meubles et les pièces automobiles.

Cependant, le recyclage des plastiques présente encore plusieurs défis. Tout d'abord, tous les types de plastiques ne sont pas recyclables de manière équivalente. Certains plastiques, tels que le polyéthylène téréphtalate (PET) et le polyéthylène haute densité (PEHD), sont largement recyclés, tandis que d'autres, comme le polystyrène expansé (EPS) et certains plastiques mélangés, sont plus difficiles à recycler.

De plus, la contamination des plastiques par d'autres matériaux non recyclables constitue un défi majeur. Les déchets plastiques doivent être correctement triés et séparés des autres déchets, tels que le papier, le verre ou le métal, pour éviter la contamination et garantir un recyclage efficace.

La sensibilisation et la participation du public sont également essentielles pour le succès du recyclage des déchets plastiques. Il est important d'éduquer les individus sur les avantages du recyclage, de promouvoir le tri sélectif à domicile et de faciliter l'accès aux infrastructures de collecte et de recyclage.

Pour encourager le recyclage des plastiques, de nombreux gouvernements, entreprises et organisations travaillent ensemble pour mettre en place des politiques et des initiatives de durabilité. Cela peut inclure des incitations financières, des

réglementations sur l'utilisation de plastiques recyclés, des programmes de collecte sélective et des investissements dans les technologies de recyclage innovantes [2].

2.4 Production de plastique en Algérie

L'Algérie est le deuxième importateur de technologies de la plasturgie sur le continent africain, après l'Afrique du Sud. Les importations de matières premières plastiques ont augmenté de 13% par an entre 2007 et 2015. En valeur, les importations algériennes de matière plastique sous forme primaire ont augmenté de 1,17 milliard de dollars en 2012 à 1,90 milliard de dollars en 2016, soit une hausse de près de 3%. La consommation per capita du plastique en Algérie a augmenté d'environ 9% par an au cours des dix dernières années, passant de 10,0 kg en 2007 à 23,1 kg en 2017, et est estimée à 25,8 kg en 2020. Environ 59,1% de la consommation est représentée par l'emballage, 20% par la construction et le reste par diverses industries. Dans la transformation des matières plastiques, l'extrusion est en tête avec 41,1%, suivie du PET soufflage et du moulage par injection avec 20,7% et 19,0% chacun. L'Algérie est, également, le plus grand importateur de technologies de l'emballage sur le continent africain, dont les importations ont évolué de 149 millions d'euros en 2012, à 229 millions d'euros en 2016.

L'Algérie perd 23 milliards Da/an par manque de recyclage car 'il n'existe encore aucune stratégie sérieuse de collecte et de recyclage. Pourtant, la récupération des déchets en Algérie est une importante opportunité à saisir, car elle est nouvelle, utile pour la communauté, et surtout génératrice d'emplois et d'argent il n'existe que 247 micro-entreprises qui opèrent dans la récupération des déchets et qui valorisent à peine que 5 ou 6 % de ce potentiel dont une partie est exportée.

La production de plastique en Algérie a connu une croissance significative et joue un rôle important dans l'économie du pays. Cependant, il est essentiel de prendre en compte les défis environnementaux et de promouvoir des pratiques durables dans l'industrie du plastique afin de minimiser son impact sur l'environnement et de contribuer à un avenir plus durable [1].

2.5 L'utilisation de plastique

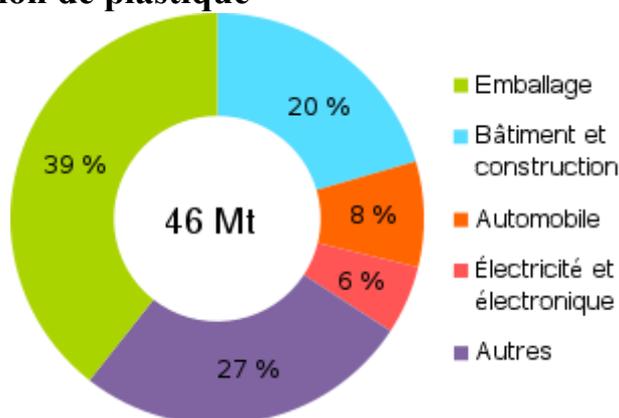


Figure 2: l'industrie de plastique [9].

Les produits de plastiques sont des matériaux extrêmement polyvalents, offrant la possibilité d'être développés avec une grande variété de combinaisons de propriétés

afin de répondre à une multitude d'applications. Certains plastiques sont transparents, ce qui les rend adaptés à une utilisation dans des applications optiques. De plus, leur capacité à être facilement moulés dans des formes complexes permet d'intégrer d'autres matériaux, ce qui les rend adaptés à de nombreuses fonctions différentes [2].

La flexibilité des propriétés physiques des plastiques permet d'ajuster ces dernières afin de répondre aux exigences spécifiques d'une application donnée. Il est possible de modifier l'équilibre des propriétés en ajoutant des renforts, des colorants, des agents moussants, des agents ignifuges, des plastifiants, etc. Cela permet de répondre aux demandes particulières et d'adapter les plastiques à des utilisations spécifiques.

Grâce à ces caractéristiques attrayantes, les plastiques sont de plus en plus utilisés dans divers domaines, tels que :

Emballages : Le plastique est largement utilisé dans l'industrie de l'emballage, que ce soit pour les emballages alimentaires, les bouteilles en plastique, les films étirables, les sachets, les sacs de transport, les plateaux de conditionnement, etc.

Secteur médical : Les dispositifs médicaux, tels que les seringues, les tubes, les cathéters, les emballages stériles et les équipements de protection, sont souvent fabriqués en plastique en raison de sa légèreté, de sa flexibilité et de ses propriétés stériles.

Automobile : De nombreux composants automobiles, tels que les tableaux de bord, les pare-chocs, les phares, les revêtements intérieurs, les pièces d'isolation et les réservoirs de carburant, sont fabriqués en plastique pour leurs avantages en termes de poids, de résistance et de facilité de fabrication.

Électronique : Les appareils électroniques, tels que les téléphones portables, les ordinateurs, les téléviseurs, les appareils ménagers, les câbles et les connecteurs, utilisent souvent des pièces en plastique en raison de leur isolation électrique, de leur résistance et de leur facilité de moulage.

Construction : Le plastique est utilisé dans l'industrie de la construction pour les tuyaux, les fenêtres, les revêtements de sol, les isolants, les panneaux de construction, les membranes d'étanchéité et autres applications en raison de sa durabilité, de sa résistance aux intempéries et de sa facilité de manipulation.

Textile : Les fibres synthétiques à base de plastique, comme le polyester, sont utilisées dans l'industrie textile pour fabriquer des vêtements, des tissus d'ameublement, des rideaux, des couvertures et bien d'autres articles.

Jouets et biens de consommation : De nombreux jouets, articles de sport, ustensiles de cuisine, meubles en plastique, articles de jardinage et autres biens de consommation sont fabriqués en plastique en raison de sa polyvalence, de sa légèreté et de sa facilité de production [2].

Ces exemples ne représentent qu'une fraction des utilisations du plastique. En raison de sa polyvalence, de ses propriétés personnalisables et de son coût abordable, le plastique est devenu un matériau omniprésent dans de nombreux aspects de notre vie

quotidienne. Cependant, il est également important de noter l'importance de la gestion responsable des déchets plastiques pour minimiser leur impact sur l'environnement.

2.6 Processus de fabrication des tubes de plastique :

2.6.1 Moulage par injection :

2.6.1.1 Définition :

Le moulage par injection est une méthode adaptée aux productions de grande ou très grande séries. Elle permet la duplication de nombreux objets identiques et de grande qualité, grâce à la réutilisation du moule. En produisant des produits finis nécessitent peu ou pas d'usinage ultérieur. Cette méthode est un peu coûteuse car elle nécessite la conception d'un moule en acier, qui permettra la duplication de nombreuses pièces de série. Donc elle n'est pas conseillée pour les conceptions de petites séries [1].

➤ Les grandes étapes du moulage par injection :

Le moule est composé de deux parties, une partie fixe et une partie mobile. La conception du moule doit permettre une éjection facile des pièces.

Installer le moule sur une machine spécifique : la presse à injection. Les deux parties du moules sont pressées fortement l'une contre l'autre. Le matériau (sous forme de granulés) est versé dans une vis de plastification (ou vis sans fin) qui est chauffée.

La rotation de la vis alliée à la température va ramollir les granulés, qui se transforment en matière plastique fondue. La matière fondue et déformable est stockée à l'avant de la vis, avant l'injection.

Injecter sous haute pression les matières plastiques ramollies sous l'effet de la chaleur dans le moule. Dans cette phase, il faut s'assurer que le moule soit complètement rempli avant que le matériau ne se solidifie. Voilà pourquoi on continue à envoyer de la matière sous pression, afin de pallier au retrait qui s'exerce lorsque la matière refroidit.

Refroidir le tout, par le biais de circuits de refroidissement à l'intérieur du moule.

Suite à cette opération l'objet est éjecté du moule.

Ejecter la pièce.

Recommencer avec la prochaine pièce.

➤ Les machines d'injection plastique :

Il existe différents types de machines d'injection plastique

- Machines motorisées actionnées par servomoteurs
- Machines actionnées par moteurs hydrauliques
- Machines hybrides actionnées par la combinaison d'un servomoteur et d'un moteur hydraulique

Une machine d'injection plastique se compose principalement d'une unité d'injection qui transfère le matériau fondu au moule et d'une unité de fermeture, qui actionne le moule.

Ces dernières années, les machines d'injection plastique se sont dotées de la commande numérique par ordinateur qui assure une injection haute vitesse sous commande programmée.

➤ **Structure de base d'une machine d'injection plastique :**

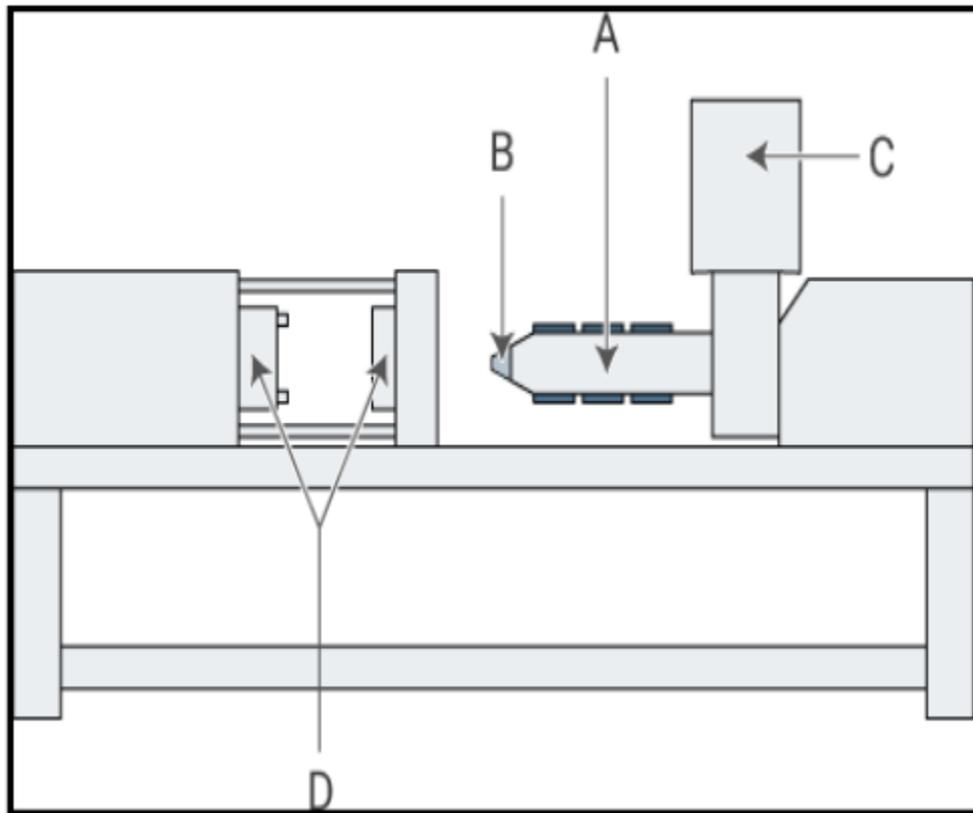


Figure 3: Structure de base d'une machine d'injection plastique

A Cylindre (chauffe le matériau)

B Buse (injecte le matériau fondu)

C Trémie (alimente en matériau)

D Moule (le matériau est versé dans la cavité du moule entre deux plaques)



Figure 4: La machine d'injection plastique

2.6.2 Moulage par soufflage :

Le moulage par soufflage est un procédé qui utilise la pression d'air pour étendre la matière plastique dans la cavité du moule. Le soufflage nous permet d'avoir des pièces creuses en matière plastique à parois minces, tels que bouteilles et récipient [7].

Le procédé est réalisé en deux étapes :

D'abord la fabrication du préforme qui est un tube est fabriqué à partir du plastique fondu, ensuite l'injection de l'air sous pression dans le tube pour obtenir la forme souhaitée.

➤ Différent type de soufflage :

Extrusion-soufflage

Extrusion de la paraison

➤ Les étapes de moulage par soufflage :

- la fabrication du préforme

La matière plastique est introduite sous forme de granulés dans une trémie. Pour être chauffés et ensuite ramollis dans une vis d'extrusion.

La matière est poussé par le vérin d'extrusion jusqu'à la tête contenant la filière d'extrusion.

Ce qui nous forme la paraison : c'est la matière extrudée après avoir la forme d'un tube d'une longueur définie, autour duquel est positionné le moule ouvert.

- Fermeture du moule

On referme les deux parties du moule autour de cette paraison. La fermeture doit être hermétique, la matière est collée à chacun des 2 bouts.

Enfin le corps creux formé est prêt à accueillir l'aiguille de soufflage.

- Soufflage de la paraison

Insuffler de l'air pour plaquer la matière contre les parois du moule. Ce moule est ensuite refroidi afin de figer la matière, tout en la maintenant sous pression.

- Dégonflage et ouverture

Après le refroidissement de la pièce, on relâche la pression au niveau de l'aiguille, Le moule s'ouvre pour libérer la pièce.

- Finition

À l'aide d'un outil coupant on retire le reste de la paraison, Ces déchets de démoulage sont récupérés et réintroduits dans le cycle de production.

La pièce peut également subir d'autres opérations de finition :

- ✓ Découpe
- ✓ Ébavurage
- ✓ Perçage
- ✓ Assemblages de plusieurs parties

2.7 Département de plastique :

L'entreprise est responsable sur la production de deux types de produits :

PVC : Utiliser dans les réseaux d'assainissements

PEHD : Utiliser dans les réseaux de :

- L'eau
- Télécommunication
- Gaz

Donc elle contient deux ateliers de production ; dont chaque atelier à son process, ses lignes de production, sa façon de gestion de production ;

Aussi chaque un des deux ateliers a trois équipes de travail ; Une équipe de 6h jusqu'à 14h, la deuxième de 14h jusqu'à 22h et la dernière du 22h jusqu'à 6h.

Ils font la production 7j/7 et 24h/24.

Les missions principales de ce département de production est de faire :

- ✓ la bonne gestion de la production des deux ateliers (PVC et PEHD) ; dont on vérifie quotidiennement les quantités en court de fabrication, les demandes

clients à produire, les quantités des produits finis stocker, et aussi vérifier les quantités hors normes et la quantité de déchet à recycler.

- ✓ Un rapport d'activité.
- ✓ Une cartographie des risques et un plan d'action face aux risques.
- ✓ Un tableau de maîtrise des risques et opportunités.
- ✓ Un tableau de bord mensuel, trimestriel et annuel.

2.7.1 Atelier PVC :

Les tubes PVC sont des tubes utilisés dans les réseaux d'assainissement.

La fabrication de ces tubes nécessite trois types de matière première (craie + stabilisant + poudre PVC) avec un pourcentage qui dépend de poids du tube.

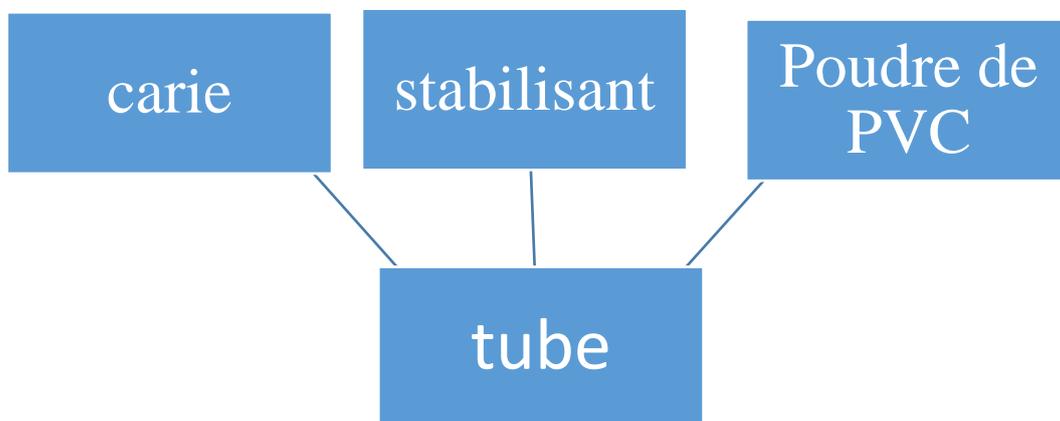


Figure 5:Composition d'un tube PVC

2.7.1.1 Le processus de fabrication :

La production des tubes PVC nécessite la combinaison des trois matières premières (poudre PVC + craie + stabilisant) qui seront mélangé dans un mélangeur à température ambiante.

Ensuite le mélange passe dans une extrudeuse qui sera transmis par la suite dans la tête ou le moule de différents diamètres sont placés et un calibreur pour régler le diamètre qui passe par la suite par des bacs de refroidissements.

Après le tube passe par une imprimante à laser pour faire le marquage (date et heure de fabrication, numéro de lot, le diamètre et le nom de l'entreprise). Et enfin un scie pour découper le tube selon la longueur désirer ; pour les tubes PVC la longueur est de six mètres.

Dans cet atelier de production, on a quatre lignes de production ; cela dépend de diamètre de tube,

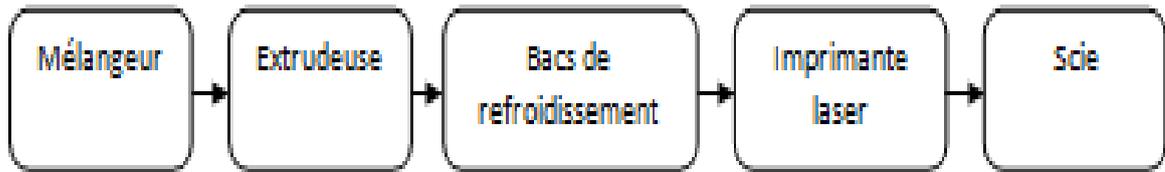


Figure 6:Processus de production des tubes PVC

Dans cet atelier de production des tubes PVC, on a quatre lignes de production ; cela dépend du diamètre des tubes :

Ligne	Diamètre (en mm)
LPV1	315, 400, 500, 630
LPV2	400, 315
LPV3	250, 200, 160, 125, 110
LPV4	100, 110, 90, 80, 63, 50, 40, 32, 20, 16, 75

Tableau 1:Diamètre des tubes PVC

Chaque ligne a un débit (quantité produite dans une heure) et un temps de changements :

Ligne	Débit (kg/h)	Temps de changement (par heure)
LPV1	400	0.5
LPV2	300	0.5
LPV3	250-300	0.33
LPV4	100-150	0.33

Tableau 2:Débit et temps de changement des lignes de production des tubes PVC.

On a trois types d'assemblage des tubes PVC :

- A coller.
- A joint.
- A bague (BEI).

Les tubes PVC peuvent être transformés en tube forage pour le filtrage et crépinage.

2.7.2 Atelier PEHD

Les tubes PEHD sont utilisés dans réseaux de :

- L'eau.
- Télécommunication.
- Gaz.

2.7.2.1 Le processus de fabrication

La fabrication de ces tubes nécessite une seule matière première (polyéthylène) ; qui passe dans l'extrudeuse et puis une co-extrudeuse qui donne la bande colorée qui sera par la suite transmis dans la tête où le moule de différents diamètres sont placer et un calibreur pour régler le diamètre selon le diamètre de produit voulu.

Ensuite les tubes passent par un bac de refroidissement, et après par une imprimante à laser pour faire le marquage (référence de matière première, numéro de lot, date et heure de fabrication, nom de l'entreprise).

Et enfin un scie pour découper le tube selon la longueur désirée ; pour les tubes PEHD la longueur est de 12 mètres.

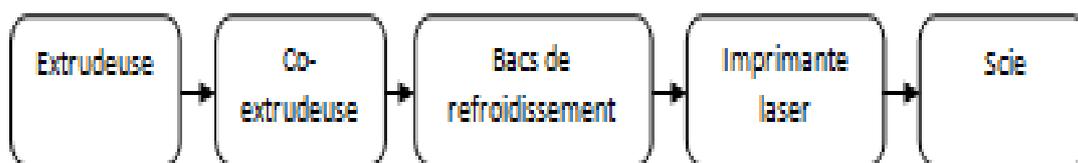


Figure 7:Processus de production des tubes PEHD

Dans l'atelier de production des tubes PEHD ; on a quatre lignes de production ; cela dépend du diamètre de tube :

Ligne	Diamètre (en mm)
LPE1	20, 25, 32
LPE2	25, 32, 40, 75
LPE3	40, 50, 63, 110
LPE4	75, 110, 125

Tableau 3:Diamètre des tubes PEHD

Chaque ligne de production a un débit (quantité produite dans une heure) et un temps de changements :

Ligne	Débit (kg/h)	Temps de changement (par heure)
LPE1	400-600	0.5
LPE2	300	0.5
LPE3	350	0.33
LPE4	100-200	0.33

Tableau 4:Débit et temps de changement des lignes de production des tubes PEHD

Pour la coloration des tubes on a : Bleu pour les tubes de l'eau. Vert pour les tubes de télécommunication. Jaunes pour les tubes de gaz. Et parfois la couleur de la bande est exigée par les clients selon leur besoin. Il existe aussi des accessoires qui consistent à relier plusieurs tubes afin d'avoir en forme de T, I ou Y.

2.8 Les entreprises qui fabriquent les produits de plastique en Algérie

En Algérie, il existe plusieurs entreprises qui se consacrent à la fabrication de produits en plastique. Voici quelques exemples d'entreprises algériennes dans ce domaine :

ENPC (Entreprise Nationale des Produits en Plastique) : ENPC est une entreprise publique spécialisée dans la production de divers produits en plastique, tels que les tuyaux en PVC, les profilés, les films plastiques, les emballages et les articles ménagers. Elle est l'un des principaux acteurs de l'industrie plastique en Algérie.

Plastisac : Plastisac est une entreprise algérienne spécialisée dans la production d'emballages en plastique, notamment les sacs plastiques, les films étirables, les sachets et les emballages flexibles. Elle propose une large gamme de solutions d'emballage adaptées aux besoins des industries alimentaires, pharmaceutiques et autres.

Plastica Algérie : Plastica Algérie est une entreprise spécialisée dans la fabrication de tuyaux en plastique et de produits connexes, tels que les raccords, les vannes et les systèmes d'irrigation. Elle propose des solutions pour les secteurs de l'eau, de l'assainissement, de l'agriculture et de la construction.

Algoplast : Algoplast est une entreprise algérienne qui produit des articles en plastique pour divers secteurs, tels que l'emballage alimentaire, l'industrie chimique, l'automobile, l'électronique et l'électroménager. Elle fabrique des pièces plastiques moulées par injection et des produits extrudés.

Plastifar : Plastifar est une entreprise spécialisée dans la production de films plastiques, notamment les films agricoles utilisés pour la protection des cultures et l'enrubannage du fourrage. Elle propose également des films pour l'emballage et d'autres applications industrielles.

Ces entreprises sont quelques exemples parmi d'autres acteurs de l'industrie plastique en Algérie. Il convient de noter que le pays dispose d'une base industrielle en plein essor dans le secteur plastique, avec des entreprises de différentes tailles et spécialisations, contribuant ainsi à l'économie nationale et répondant aux besoins du marché intérieur [5].

2.9 Conclusion

Dans ce chapitre on a vu l'origine du plastique qui est diversifiée et joue un rôle essentiel dans de nombreux secteurs. Tel que le plastique est un matériau synthétique dérivé de produits pétroliers ou de ressources renouvelables, telles que le maïs ou la canne à sucre. Sa production implique des processus de transformation chimique.

Et pour mon travail j'ai saisi une entreprise qui produise deux type de tuyaux le PVC et le PEHD tel que ces deux type est une industrie clé dans le domaine des plastiques. Le PVC, fabriqué à partir de chlorure de vinyle monomère et d'éthylène, est polyvalent et utilisé dans de nombreuses applications telles que les tuyaux, les revêtements de sol et les emballages. Le PEHD, produit à partir d'éthylène, est résistant et largement utilisé dans l'emballage, l'agriculture et la construction. Ces

matériaux sont mettent l'accent sur l'innovation, la qualité et la durabilité. La production de PVC et de PEHD répond aux besoins de diverses industries grâce à leur polyvalence et à leurs caractéristiques spécifiques.

Et on a vu quelque entreprise algérienne qui est spécialisées dans la fabrication de tuyaux en plastique. Ces entreprises utilisent des technologies modernes pour produire des tuyaux en plastique de haute qualité, destinés à des applications diverses, telles que l'approvisionnement en eau, l'irrigation agricole. Grâce à leur expertise et à leur capacité à répondre aux besoins du marché local, ces entreprises algériennes contribuent à soutenir l'infrastructure et le développement économique du pays.

Chapitre 03 : cas pratique

3.1 Introduction

L'entreprise cherche à améliorer son efficacité et sa rentabilité, la modélisation de ce problème d'optimisation de production devient un outil essentiel. La production efficace est cruciale pour maximiser les bénéfices, minimiser les coûts et satisfaire la demande des clients. La modélisation de ce type de problème permet de trouver la meilleure configuration des ressources disponibles pour atteindre les objectifs fixés.

La modélisation d'un problème d'optimisation de production consiste à représenter mathématiquement les différentes contraintes et les objectifs à atteindre. Cela permet de définir un modèle formel qui représente fidèlement le système de production de l'entreprise. Ce modèle peut ensuite être utilisé pour trouver la meilleure allocation des ressources, telle que les machines, les matières premières, la main-d'œuvre, et les ordres de production, afin d'optimiser les performances de production.

La modélisation de ce type de problème peut prendre différentes formes, telles que la programmation linéaire, la programmation par objectifs multiples, la programmation en nombres entiers, ou encore la simulation. Chaque approche a ses avantages et ses limitations, et le choix dépendra de la complexité du problème et des objectifs spécifiques de l'entreprise.

L'optimisation de la production peut avoir un impact significatif sur les résultats d'une entreprise. En trouvant la meilleure façon d'utiliser les ressources disponibles, on peut réduire les temps d'attente, minimiser les coûts de production, augmenter la productivité, améliorer la qualité des produits et répondre plus efficacement à la demande des clients. Cela permet d'améliorer la compétitivité de l'entreprise sur le marché.

3.2 Définition de la problématique

L'entreprise responsable sur la production des tubes PVC et PEHD utilisés dans les réseaux d'assainissement, l'eau, gaz et de télécommunication.. ; Elle contient donc deux ateliers de production ; un atelier de production des tubes PVC et un atelier de production des tubes PEHD ; dont chaque atelier à un nombre de lignes de production (4 lignes en PVC et 4 lignes en PEHD).

La matière première utilisée et les produits finis a un chacun a un espace de stockage propres a lui tel que la capacité de matière premier est de 2750000 m³

Et la capacité de produit fini est : cap= [150 200 250 300 300 350 400 450 450 500].

Et chaque ligne de production a une capacité de stockage indiqué dans la matrice suivant :

$$\left[\begin{array}{cccccccc} 0 & 24 & 24 & 24 & 24 & 24 & 24 & 24 \\ 0 & 24 & 24 & 24 & 24 & 24 & 24 & 24 \\ 0 & 24 & 24 & 24 & 24 & 24 & 24 & 24 \\ 0 & 24 & 24 & 24 & 24 & 24 & 24 & 24 \end{array} \right]$$

On va établir un modèle qui nous permet d'optimiser la planification de la production de cette entreprise pour l'atelier de production des tubes PEHD ; dont il nous donne une quantité de produit vendue et produite, ainsi que la matière première utilisé ,

stocké et acheté pour chaque type de produits finis afin de satisfaire les demandes clients.

3.3 Le modèle mathématique du problème :

Dans cette partie ; on va établir un modèle qui nous permet optimiser la planification de la production de cette entreprise ; dont il nous donne une quantité de produit vendue et produite, ainsi que la matière première utilisé, acheté et stocké pour chaque type de produits finis.

Indices:

l : indice d'une ligne tel que $l \in L$.

p : indice de produit tel que $p \in P$.

m : indice de matière première tel que $m \in M$.

t : indice d'une période tel que $t \in T$.

Paramètres:

TC_{lp} : temps de changement dans la ligne l pour un produit p .

CL_{pl} : coût de lancement d'un produit p dans la ligne l .

D_{pt} : la demande de produit p dans la période t .

$Capmax_{lt}$: capacité max de la ligne l en unité de temps par jour t en heure.

Pr_{mp} : pourcentage de la matière première utilisée pour produire un produit p en Kg par tube.

$CAMP_m$: cout d'achat d'un sac de la matière première m .

CS_m : cout de stockage d'un sac de la matière première m .

VP_p : volume d'un tube de produit p .

VMP_m : volume d'un sac de la matière première m .

$CAPSMP_m$: capacité espace de stockage de la matière première.

CPR_{pl} : cout de production de produit p au niveau de la ligne l .

CS_p : cout de stockage de produit p .

$CAPSP_p$: capacité de stockage de produit p .

CV_p : cout de vente de produit p .

$Poids_p$: le poids d'un produit p .

Variables de décisions :

$QMPU_m$: quantité de matière première utilisée en Kg.

QP_{plt} : quantité produite d'un produit p au niveau de la ligne l pendant une période t en Kg (sortante de l'extrudeuse avant le passage par la scie).

QPS_{pt} : quantité stocké de produit p pendant une période t.

QPV_{pt} : quantité de produit p vendue pendant une période t.

$QMPA_{mt}$: quantité de matière première achetée pendant une période t.

$QMPS_{mt}$: quantité de matière première stockée pendant une période t.

X_{plt} : variable de décision binaire justifiant la préparation de la ligne l pour produire le produit p dans la période t ou non.

Fonction objectif :

La fonction objectif vise à maximiser le profit total généré par la production de différents produits. On a exprimée mathématiquement comme suit :

$$\text{Max } \sum_p^P \sum_t^T QPV_{pt} * CV_P - \sum_p^P \sum_l^L \sum_t^T QP_{plt} * CPR_{pl} - \sum_p^P \sum_t^T QPS_{pt} * CSP_p - \sum_m^M \sum_t^T QMPA_{mt} * CAMP_m - \sum_m^M \sum_t^T QMPS_{mt} * CSM_m - \sum_l^L \sum_p^P \sum_t^T X_{plt} * CL_{lp}$$

Les contraintes :

- Contrainte sur la capacité de stockage de produit fini tel que : la somme des quantités produit plus le stock dans le temps t-1 doit être égale à la quantité vendue et la quantité en stock dans le temps t :

$$QP_{pl}(t) + QS_{p(t-1)} = QPV_{p(t)} + QPS_{p(t)} ; \forall t, \forall p \text{ tel que } t > 1$$

- La satisfaction de la demande tel que : la quantité des produits vendues doit être inférieure ou égale à la demande clients :

$$QPV_{pt} \leq D_p ; \forall t, \forall p$$

- Contrainte sur la capacité de stockage de la matière première tel que : la quantité de matière première achetée et la quantité en stock dans un temps t-1 doit être égale à la somme des quantités de matière première utilisé plus la matière stocké dans le temps t :

$$QMPA_{m(t)} + QMPS_{m(t-1)} = QMPU_{mplt} + QMPS_{m(t)} ; \forall t, \forall m ; \text{ tel que } t > 1$$

- Pour une production d'un produit de type p on a un pourcentage de matière première utilisé pour la production ;

$$QP_{plt} * (Pr_{mp} * \text{poids}_p) = QMPU_{mplt} ; \forall t, \forall p, \forall m, \forall l.$$

- La quantité d'un produit stocké par rapport le volume de produit doit être inférieure ou égale à la capacité de stockage d'un produit p :

$$QPS_{pt} * VP \leq CAPSP_p ; \forall p, \forall t$$

- La quantité de matière première stockée par rapport le volume doit être inférieur ou égale à la capacité de stockage d'une matière première m :

$$QMPS_{mt} * VMP_m \leq CAPSMP_m ; \forall m.$$

- On lance une production d'un produit de type p dans une ligne de production si on a une quantité importante de production :

$$QP_{plt} \leq 10000 * X_{plt} ; \forall t, \forall p, \forall l.$$

- La variable X c'est une variable binaire prend la valeur de 1 si le produit p est fabriqué dans la ligne l dans un temps t tel que :

$$X_{plt} = 1 ; \forall t, \forall p \forall t ; \text{Sinon } X_{plt} = 0.$$

3.4 Programme CPLEX :

On a deux fichiers principaux :

➤ **Le fichier (.mod) :**

Ce fichier comprend tous les paramètres tel que : les indices, les variables de décisions, la fonction objectif et les contraintes :

```

int L=...;
range ligne=1..L;

int P =...;
range produit= 1..P;

int M=...;
range matiere=1..M;

int T=...;
range periode=1..T;

float TC [ligne][produit]=...;
int CL[ligne][produit]=...;
int D[periode] [produit]=...;
int Capmax[ligne][periode]=...;
float Pr[matiere][produit]=...;
int CAMP[matiere]=...;
int CSM[matiere]=...;
float VP[produit]=...;
int VMP[matiere]=...;
int CAPSMP[matiere]=...;
int CPR[ligne][produit]=...;
int CSP[produit]=...;
int CAPSP[produit]=...;
int CV[produit]=...;
float poids[produit]=...;
float TT[ligne][produit]=...;

```

Figure 8: les indices et les paramètres

```

dvar float+ QMPU[matiere][produit][ligne][periode];
dvar int+ QP[produit][ligne][periode];
dvar int+ QPS[produit][periode];
dvar int+ QPV[produit][periode];
dvar float+ QMPA[matiere][periode];
dvar float+ QMPS[matiere][periode];
dvar boolean X[produit][ligne][periode];

```

Figure 9: les variables de décision

```

maximize sum (p in produit, t in periode) QPV[p][t]*CV[p]
- sum (p in produit , l in ligne, t in periode) QP[p][l][t]*CPR[l][p]
- sum (p in produit, t in periode ) QPS[p][t]*CSP[p]
- sum (m in matiere, t in periode) QMPA[m][t]*CAMP[m]
- sum (m in matiere, t in periode) QMPS[m][t]*CSM[m]
- sum (l in ligne ,p in produit , t in periode) X[p][l][t]*CL[l][p];

```

Figure 10: la fonction objectif

```

subject to {
forall (p in produit, t in periode : t>1)
  sum (l in ligne) QP[p][l][t] + QPS[p][t-1] == QPV[p][t] + QPS[p][t];
forall (p in produit , t in periode)
  QPV[p][t]<= D[t][p];
forall (t in periode : t>1, m in matiere)
  QMPA[m][t] + QMPS[m][t-1] == sum (p in produit , l in ligne) QMPU[m][p][l][t] + QMPS[m][t];
forall (t in periode, p in produit, l in ligne, m in matiere)
  poids[p]*QP[p][l][t]* (Pr[m][p]) == QMPU[m][p][l][t];
forall (p in produit, t in periode)
  QPS[p][t]* VP[p] <= CAPSP[p];
forall (m in matiere, t in periode)
  QMPS[m][t]* VMP[m] <= CAPSMP[m];
forall (t in periode, p in produit, l in ligne)
  QP[p][l][t] <= 1000000* X[p][l][t];
forall (t in periode, l in ligne)
  sum (p in produit) TC[l][p]* X[p][l][t] + sum(p in produit) QP[p][l][t] * TT[l][p]* poids[p] <= Capmax[l][t];
forall (p in produit)
  QPS[p][1]== 0;
forall (m in matiere)
  QMPS[m][1]== 0;
}

```

Figure 11: les contraintes

➤ Le fichier (.data) :

A spécifier les valeurs des variables du modèle, les contraintes, les coûts, etc. Il permet de fournir les données spécifiques de problème qu'on souhaite résoudre :

```

P=10;
L=4;
M=1;
T=7;

TC = [
  [ 0.5 0.5 0.5 50 50 50 50 50 50 ]
  [ 50 0.5 0.5 0.5 50 50 0.5 50 50 ]
  [ 50 50 50 0.33 0.33 0.33 50 50 0.33 50 ]
  [ 50 50 50 50 50 50 0.33 0.33 0.33 0.33 ]
];

CL= [
  [50 50 50 0 0 0 0 0 0 0]
  [0 40 40 40 0 0 40 0 0 0]
  [0 0 0 20 20 20 0 0 20 0]
  [0 0 0 0 0 0 15 15 15 15]
];

D= [
  [0 0 0 0 0 0 0 0 0]
  [10 20 50 75 80 100 75 75 125 0]
  [10 15 50 75 80 100 75 125 0 75]
  [15 20 50 75 100 75 125 50 0 200]
  [10 15 20 75 75 70 50 0 200 100]
  [10 15 20 75 75 100 125 50 0 0]
  [10 15 20 75 75 80 100 0 20 0]
];

poids = [10.74 15.57 25.95 40.07 62.29 98.96 8.3 12.01 17.89 23.18];

Capmax = [
  [0 24 24 24 24 24 24 24 ]
  [0 24 24 24 24 24 24 ]
  [0 24 24 24 24 24 24 ]
  [0 24 24 24 24 24 24 ]
];

Pr = [
  [1 1 1 1 1 1 1 1 1 ]
];

CAMP=[20];

```

```

CSM=[1];
VP=[0.031 0.049 0.08 0.126 0.196 0.318 0.027 0.038 0.057 0.074];
VMP=[26];
CAPSMP=[2750000];
CPR=[
    [250 250 0 0 0 0 0 0 0 0]
    [0 200 200 0 0 0 0 0 0 0]
    [0 0 150 150 150 150 150 0 0 0]
    [0 0 0 0 100 100 100 100 100 100]
];
CSP=[1 1 1 1 1 1 1 1 1 1];
CAPSP=[150 200 250 300 300 350 400 450 450 500];
CV=[4561 6741 10418 1657 25127 39222 4583 4751 7060 9134];
TT= [
    [0.002 0.002 0.002 100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000]
    [100000 0.003 0.003 0.003 100000 100000 0.003 100000 100000 100000]
    [100000 100000 100000 0.003 0.003 0.003 100000 100000 0.003 100000]
    [100000 100000 100000 100000 100000 100000 0.007 0.007 0.007 0.007]
];

```

Figure 12: les données

3.5 Interprétation des résultats :

J'ai résolu le problème d'optimisation de planification de production avec Cplex. J'ai défini l'objectif de maximiser les profits de l'entreprise et les variables de décision représentant les quantités produites, stockées, vendus de différents produits. Et les quantités de matières premières acheter, utilisé et stocké. Voici l'interprétation de nos résultats :

La valeur de la fonction objectif est de 28882280.4DA, représente une mesure numérique utilisée pour évaluer l'efficacité ou la performance d'un modèle, d'un processus ou d'une solution. Dans ce contexte spécifique, cette valeur représente le résultat ou l'objectif recherché d'une optimisation et d'une maximisation des profits de l'entreprise, où le système ou le modèle est évalué en termes de cette valeur

with objective 28882280.4

Figure 13: la valeur de la fonction objectif

Partie produits finis :

➤ Les quantités des produits fabriqués :

Les tableaux suivants représentent les quantités produits de chaque produit p dans la ligne L et dans la période t par exemple : la production de type1 est dans la ligne 1 et la période 2 avec une quantité de 20 produits et dans la période 4 avec une quantité de 45 produits.

Et c'est le même pour tous les produits dans tous les 7 périodes et de chaque ligne propre au produit.

↓ produit (taille 10)	↓ ligne (taille 4)	↓ periode (taille 7)	↓ Valeur
1	1	1	0
1	1	2	20
1	1	3	0
1	1	4	45
1	1	5	0
1	1	6	0
1	1	7	0
2	2	1	0
2	2	2	35
2	2	3	0
2	2	4	35
2	2	5	0
2	2	6	30
2	2	7	0
3	1	1	0
3	1	2	50
3	1	3	50
3	1	4	70
3	1	5	0
3	1	6	40
3	1	7	0
4	2	1	0
4	2	2	75
4	2	3	75
4	2	4	75
4	2	5	75
4	2	6	75
4	2	7	75
5	3	1	0
5	3	2	101
5	3	3	126
5	3	4	126
5	3	5	0
5	3	6	126
5	3	7	0
6	3	1	0
6	3	2	15
6	3	3	0
6	3	4	0
6	3	5	79
6	3	6	0
6	3	7	79

7	2	1	0
7	2	2	75
7	2	3	75
7	2	4	125
7	2	5	50
7	2	6	125
7	2	7	100
8	4	1	0
8	4	2	0
8	4	3	0
8	4	4	0
8	4	5	0
8	4	6	50
8	4	7	0
9	4	1	0
9	4	2	189
9	4	3	0
9	4	4	0
9	4	5	84
9	4	6	0
9	4	7	20
10	4	1	0
10	4	2	0
10	4	3	145
10	4	4	145
10	4	5	79
10	4	6	0
10	4	7	0

Figure 14: les quantités produites

D'après ces résultats on observe que :

- ✓ la ligne 1 produise : le produit 1 (tube de 20 mm) et le produit 3 (tube de 32 mm)
 - ✓ la ligne 2 produise : le produit 2 (tube de 25 mm) et le produit 4 (tube de 40 mm) et le produit 7 (tube de 75 mm)
 - ✓ la ligne 3 produise : le produit 5 (tube de 50 mm) et le produit 6 (tube de 63 mm)
 - ✓ la ligne 4 produise : le produit 8 (tube de 90 mm) et le produit 9 (tube de 110 mm) et le produit 10 (tube de 125 mm)
- **Les quantités des produits vendus :**

produit (taille 10)	periode (taille 7)						
	1	2	3	4	5	6	7
1	0	10	10	15	10	10	10
2	0	20	15	20	15	15	15
3	0	50	50	50	20	20	20
4	0	75	75	75	75	75	75
5	0	80	80	100	75	75	69
6	0	15	0	0	70	9	79
7	0	75	75	125	50	125	100
8	0	0	0	0	0	50	0
9	0	125	0	0	148	0	20
10	0	0	75	200	94	0	0

Figure 15: les quantités vendues par période de chaque produit

➤ **Les quantités des produits stockées :**

produit (taille 10)	periode (taille 7)						
	1	2	3	4	5	6	7
1	0	10	0	30	20	10	0
2	0	15	0	15	0	15	0
3	0	0	0	20	0	20	0
4	0	0	0	0	0	0	0
5	0	21	67	93	18	69	0
6	0	0	0	0	9	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0
9	0	64	64	64	0	0	0
10	0	0	70	15	0	0	0

Figure 16: les quantités stockées par période de chaque produit

Si on prend le produit 1 dans la période 2 : on observé que la ligne de production 1 produise 20 produits ; les 10 produits sont vendu pour satisfait la demande et les 10 autres produits sont stockés.

Partie matière première:

➤ **Les quantités de matière première achetée :**

matiere (taille 1)	periode (taille 7)						
	1	2	3	4	5	6	7
1	0	16841.9	16134.89	18097.14	14572.07	13996.89	12010.89

Figure 17: la quantité de matière première achetée par période

D'après ce tableau on remarquer que l'entreprise acheté toujours la matière première.

➤ **Les quantités de matière première utilisée :**

↓ matiere (taille 1)	↓ produit (taille 10)	↓ ligne (taille 4)	↓ periode (taille 7)	↓ Valeur
1	1	1	1	0
1	1	1	2	214.8
1	1	1	3	0
1	1	1	4	483.3
1	1	1	5	0
1	1	1	6	0
1	1	1	7	0

1	2	2	1	0
1	2	2	2	544.95
1	2	2	3	0
1	2	2	4	544.95
1	2	2	5	0
1	2	2	6	467.1
1	2	2	7	0
1	3	1	1	0
1	3	1	2	1297.5
1	3	1	3	1297.5
1	3	1	4	1816.5
1	3	1	5	0
1	3	1	6	1038
1	3	1	7	0
1	4	2	1	0
1	4	2	2	3005.25
1	4	2	3	3005.25
1	4	2	4	3005.25
1	4	2	5	3005.25
1	4	2	6	3005.25
1	4	2	7	3005.25
1	5	3	1	0
1	5	3	2	6291.29
1	5	3	3	7848.54
1	5	3	4	7848.54
1	5	3	5	0
1	5	3	6	7848.54
1	5	3	7	0
1	6	3	1	0
1	6	3	2	1484.4
1	6	3	3	0
1	6	3	4	0
1	6	3	5	7817.84
1	6	3	6	0
1	6	3	7	7817.84
1	7	2	1	0
1	7	2	2	622.500000000004
1	7	2	3	622.499999999996
1	7	2	4	1037.5
1	7	2	5	415
1	7	2	6	1037.5
1	7	2	7	830
1	8	4	1	0
1	8	4	2	0
1	8	4	3	0
1	8	4	4	0
1	8	4	5	0
1	8	4	6	600.5
1	8	4	7	0
1	9	4	1	0
1	9	4	2	3381.21
1	9	4	3	0
1	9	4	4	0
1	9	4	5	1502.76
1	9	4	6	0
1	9	4	7	357.8

1	10	4	1	0
1	10	4	2	0
1	10	4	3	3361.1
1	10	4	4	3361.1
1	10	4	5	1831.22
1	10	4	6	0
1	10	4	7	0

Figure 18:la quantité de matière première utilisée

➤ **Les quantités de matière première stockée :**

matiere (taille 1)	periode (taille 7)						
	1	2	3	4	5	6	7
1	0	0	0	0	0	0	0

Figure 19:la quantité de matière première stockée

D'après ces trois derniers tableaux on observe que la matière première n'est pas stockée ; c'est-à-dire toute la quantité achetée dans n'importe quelle période sera utilisée dans la même période pour la fabrication d'un produit demandé.

Discussion :

J'ai calculé le pourcentage de satisfaction de la demande à l'aide d'Excel et les résultats sont dans le tableau suivant :

produit/période	1	2	3	4	5	6	7	ligne de production
1	0	100	100	100	100	100	100	1
2	0	100	100	100	100	100	100	2
3	0	100	100	100	100	100	100	1
4	0	100	100	100	100	100	100	2
5	0	100	100	100	100	100	92	3
6	0	15	0	0	100	11,25	98,75	3
7	0	100	100	100	100	100	100	2
8	0	0	0	0	0	100	0	4
9	0	100	0	0	74	0	100	4
10	0	0	100	100	94	0	0	4

Tableau 5: représentation des pourcentages de satisfaction de chaque produit

La majorité des demandes sont satisfaites par la capacité de chaque ligne de production ; sauf que la ligne 3 et la ligne 4 ne sont pas satisfaites la demande à cause de leurs incapacités.

Pour cela je propose d'augmenter la capacité de ces lignes pour avoir la satisfaction de demande de marché ou bien acheter s'autre ligne de production qui peut fabriquer les types de produits 6 et 8 et même les produits 9 et 5. La décision finale de ce

problème reste à l'entreprise c'est-à-dire à les capacités de ligne de production ou bien pour l'achat des lignes reste à l'espace de l'entreprise et leur capitale bien sûr pour acheter.

3.6 Conclusion :

En conclusion, la modélisation CPLEX s'est avérée être une approche efficace pour résoudre le problème posé. Grâce à ses capacités de programmation linéaire et d'optimisation, CPLEX a permis de formuler le problème de manière mathématique et de trouver des solutions optimales. Les résultats obtenus ont fourni des informations précieuses sur les capacités de chaque ligne de production, mettant en évidence les insuffisances des lignes 3 et 4 dans la satisfaction de la demande. Les recommandations proposées, à savoir augmenter la capacité de ces lignes ou acquérir de nouvelles lignes de production, offrent des options pour résoudre ce problème et répondre aux besoins du marché. En utilisant CPLEX, l'entreprise dispose d'un outil puissant pour prendre des décisions éclairées, en prenant en compte à la fois les contraintes de capacité et les ressources financières disponibles. Dans l'ensemble, la modélisation CPLEX a démontré sa valeur en tant qu'outil d'optimisation pour améliorer les performances de la chaîne de production et répondre aux exigences du marché de manière efficiente.

Conclusion générale

Ce travail a été une expérience enrichissante qui m'a permis d'acquérir des connaissances essentielles sur la planification et l'optimisation.

Nous nous sommes intéressés dans ce projet à la gestion de la production des tubes PVC et PEHD utilisés dans les réseaux d'assainissement, l'eau, gaz et les télécommunications; l'entreprise considérée contient donc deux ateliers de production ; un atelier de production des tubes PVC et un atelier de production des tubes PEHD ; avec 4 lignes de production pour chaque atelier.

Pour cela, un modèle mathématique a été proposé afin d'obtenir les quantités produites, stockées et vendues tout en satisfaisant les demandes clients ainsi que les quantités des matières premières utilisées pour chaque type de produit, stockées et achetées.

Ce problème a été résolu avec le solveur CPLEX; en utilisant des valeurs de demandes clients inspirées de la réalité dans des périodes prédéfinies par le gestionnaire de la production et le responsable commerciale.

CPLEX effectue une recherche approfondie dans l'espace des solutions possibles et utilise des techniques efficaces pour trouver la meilleure solution possible. Il permet de modéliser et de gérer les contraintes, telles que les contraintes de capacité ainsi que les contraintes de disponibilité des ressources.

La modélisation par CPLEX offre une résolution rapide et précise des problèmes d'optimisation, des solutions de haute qualité, une gestion efficace des contraintes, la prise en charge de multiples objectifs, une intégration avec d'autres outils et une convivialité. Ces avantages en font un choix populaire pour la modélisation et la résolution de problèmes d'optimisation complexes dans divers domaines.

En conclusion, ce travail a été une véritable opportunité d'apprentissage, tant sur le plan professionnel que personnel.

Bibliographie

Bibliographie :

[1] BENHASSEN, W. (2021). Planification de la production au sein de l'entreprise Salah Plast MINISTRY (Doctoral dissertation, Directeur: Mr. Fouad MALIKI/Co-directeur: Mr. Farouk MARINE SASSI).

[2] BENHASSEN, W. (2021). Analyse des performances du système de production de l'entreprise Salah Plast par les principes du factory physics (Doctoral dissertation, Directeur: Mr. Fouad MALIKI/Co-directeur: Mr. Farouk MARINE SASSI).

[3] Javel, G., & Le Bert, J. (1993). L'Organisation et la Gestion de Production (Vol. 138). Masson.

[4] Francois, J. (2007). Planification des chaînes logistiques: Modélisation du système décisionnel et performance (Doctoral dissertation, Université Sciences et Technologies-Bordeaux I).

[5] ChatGPT

[6] BESSAOUD, D., & ALLAL, L. G. (2022). Planification de la ligne de production de l'entreprise SOPHAL pour les produits à large consommation (Doctoral dissertation, Directeur: Mr. Fouad MALIKI/Co-directeur: Mr. BEKADDOUR Akkacha).

[7] LAZZOUNI, L. (2022). Optimisation de la planification de l'atelier de production du PVC de l'entreprise CANAL PLAST (Doctoral dissertation, Directeur: Mr. Mohammed BENNEKROUF).

[8] BOUCHRIHA, H., & BOUZEMBRAK, Y. Problème de planification des tailles des lots de production sur des presses d'injection plastique.

[10] Ramya, R., Rajendran, C., Ziegler, H., Mohapatra, S., & Ganesh, K. (2019). Capacitated Lot Sizing Problems in Process Industries. Cham, Switzerland: Springer.

[11] Bertsimas, D., & Tsitsiklis, J. N. (1997). Introduction to linear optimization (Vol. 6, pp. 479-530). Belmont, MA: Athena scientific.

[13] Christopher, M. (2016). Logistics & supply chain management. Pearson Uk.

Webographie :

[9]https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/8/8f/European_plastics_demand_in_2012.svg/310px-European_plastics_demand_in_2012.svg.png

[12] <https://www.ibm.com/products/ilog-cplex-optimization-studio>