

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministre de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane Mira-Bejaia



Faculté des Sciences Exactes
Département de Recherche Opérationnelle

MÉMOIRE DE MASTER EN MODÉLISATION, OPTIMISATION ET AIDE À LA DÉCISION

présenté par :

Sarah Ibrahim & Fairouz Lagab

THÈME

*Résolution de Problème de Découpe par
l'approche du PLNE : Cas de l'entreprise
GENERAL EMBALLAGE*



devant le jury composé de :

Ouiza Lekadir	Prof	président
Nouredine Khimoum	MCA	Encadreur
Karima Bouibed	MCB	Examinatrice
Kahina Krimat	MCB	Examinatrice

Année universitaire : 2023-2024

Remerciement

On tiens tout d'abord à remercier Dieu de nous avoir donné l'opportunité d'accéder au savoir et de réaliser ce modeste travail.

On souhaite également exprimer notre profonde gratitude envers M. Khimoum N. notre directeur de mémoire, pour son encadrement, sa disponibilité, ses précieux conseils et le soutien qu'il nous a apporté tout au long de la préparation de ce mémoire.

Nous adressons également nos remerciements aux responsables de l'entreprise Générale Emballage, qui nous ont accueillis en stage et ont permis de mener à bien nos recherches, tout particulièrement M. A. Rouabah, pour son accueil, sa disponibilité et son aide précieuse.

nos vifs remerciements s'adressent également aux membres du jury qui ont aimablement accepté de lire et d'évaluer ce mémoire. on espère qu'ils seront satisfaits de notre travail.

on tiens à témoigner notre reconnaissance envers l'ensemble des enseignants qui nous ont accompagné tout au long de notre parcours universitaire.

Enfin, on remercie tous ceux qui nous ont encouragé et soutenu dans notre formation, de près ou de loin.

Dédicaces

Je tiens avec grand plaisir à dédier ce modeste travail aux personnes chères à mon coeur :
À ma très chère mère et à mon très cher père, vous avez été mon pilier, m'entourant de votre amour inconditionnel et de votre soutien tout au long de ce parcours.

À mes soeurs Dyhia, Lynda, et à mon unique frère Tayeb, Mes plus fidèles compagnons de route, vous avez été et vous resterez mes plus fidèles compagnons de route.

À mes grands-parents.

À mon ami Bouridah.B, qui a égayé cette aventure de son soutien et sa bienveillance. À mes amis et ma binôme Firouz.

Sarah

Dédicaces

Je dédie ce travail :

Mes chers parents, Je tiens à vous dédier ces quelques lignes en guise de remerciement pour tout ce que vous avez fait pour moi depuis ma tendre enfance. Votre amour inconditionnel, votre soutien indéfectible et vos encouragements constants ont été le socle qui m'a permis de grandir et de m'épanouir. Mes parents, je vous suis infiniment reconnaissant pour tout ce que vous avez fait et continuez de faire pour moi. Vous êtes des piliers inestimables dans ma vie, et je vous aime de tout mon cœur.

À mon mari Salim Pour son soutien moral et leurs conseils précieux tout au long de mes études.

À mes très chers frères Khiredine et Yaqoub.

À mes sœurs Nassima, Ounissa, Razika, Hanene, Kenza, Aya .

À tous les membres de ma famille .

À tous mes amis et surtout mon collègue Sarah.

Firouz

Table des matières

Introduction Générale	2
1 Présentation de l'entreprise	5
1.1 Introduction	5
1.2 Présentation de l'entreprise	5
1.3 Situation géographique	6
1.4 Mission	6
1.5 Organigramme de l'entreprise	7
1.6 Matières premières	8
1.7 Description du système	9
1.7.1 Carton ondulé	9
1.7.2 Caractéristiques des cannelures	11
1.7.3 Processus de fabrication du carton ondulé	12
1.8 Problématique	15
1.9 Conclusion	15
2 Problèmes de découpes	16
2.1 Introduction	16
2.2 Problème de découpe	16
2.2.1 Version basique d'un problème de découpe	17
2.3 Variantes de problèmes de découpes	18
2.3.1 Découpes de volumes ou de poids	19
2.3.2 Découpes d'espaces	19
2.3.3 Découpes de temps	19

2.4	Classification des problèmes de découpes	20
2.4.1	Découpe à une dimension	20
2.4.2	Découpe à deux dimensions	20
2.4.3	Découpe à trois dimensions	20
2.5	Principaux modèles de découpes	20
2.5.1	Modèle de découpe uniforme	21
2.5.2	Modèle de découpe homogène	21
2.5.3	Modèle de découpe général	22
2.6	Différents types de découpes	22
2.6.1	Découpe guillotine	22
2.6.2	Découpe non guillotine	23
2.7	Quelques Problèmes concrets de Découpe	23
2.7.1	Problème de découpe avec différentes qualités	23
2.7.2	Problème de découpe en deux étapes	24
2.7.3	Découpe et de dimensionnement de lots	24
2.7.4	Découpe avec des objectifs mixtes	25
2.8	Méthodes de résolution	25
2.8.1	Méthodes exactes	25
2.8.2	Méthodes approchées	28
2.9	Conclusion	29
3	Modélisation et Résolution du problème	30
3.1	Introduction	30
3.2	Modélisation Mathématique	30
3.3	Outils et méthode de résolution	31
3.3.1	Présentation de l'Application	32
3.3.2	Validation et discussion des résultats	33
3.4	Conclusion	37
	Conclusion Générale	39
	Bibliographie	42

Introduction Générale

La Recherche Opérationnelle (RO) est un domaine pluridisciplinaire qui se concentre sur la résolution de problèmes complexes liés à la prise de décision et à l'optimisation des processus dans divers secteurs. Elle s'appuie sur l'utilisation de modèles mathématiques, de techniques analytiques et de méthodes algorithmiques afin de trouver les solutions les plus efficaces aux problèmes opérationnels[23]. Le problème de découpe de stock (CSP) est l'un des problèmes les plus étudiés dans ce domaine. Il vise à optimiser la découpe d'un matériau en pièces plus petites, en minimisant les pertes de matériau. Ce problème trouve des applications dans des industries telles que l'acier, le bois, le verre, le papier, ainsi que dans des domaines logistiques tels que le chargement de conteneurs. L'importance des problèmes de découpe ne se limite pas seulement à l'efficacité opérationnelle et aux économies réalisées par les entreprises. Ils ont également des implications environnementales, car une utilisation plus efficace des matériaux réduit les déchets et préserve les ressources naturelles. Par conséquent, la résolution efficace des problèmes de découpe revêt une importance tant pour les acteurs industriels que pour la société dans son ensemble.

L'entreprise GE (Général Emballage) est le leader de l'industrie du carton ondulé en Algérie. Comme de nombreuses autres entreprises, Général Emballage fait face à des problèmes de découpe que nous allons traiter dans ce mémoire. Le principal problème auquel l'entreprise est confrontée est celui de la minimisation des chutes de matière lors de la découpe des plaques de carton ondulé, notamment au niveau de la métrailleuse dans l'onduleuse. Notre étude consiste à mettre en oeuvre un modèle mathématique afin de minimiser la chute engendrée par le processus de

découpe, tout en satisfaisant la demande.

CHAPITRE

1

Présentation de l'entreprise

1.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous allons présenter un bref aperçu de l'entreprise Général Emballage, qui occupe une place prépondérante dans l'industrie de la fabrication et de la transformation du carton ondulé destiné à l'emballage en Algérie. Nous présenterons des informations sur l'entreprise, son activité, son historique ainsi que sa situation géographique.

1.2 PRÉSENTATION DE L'ENTREPRISE

Général Emballage est leader en Algérie de l'industrie du carton ondulé. Spécialisée dans la fabrication et la transformation du carton ondulé. Entré en exploitation en 2002 par Ramdane BATOUCHE , Général Emballage est une Société de capitaux avec un capital social de 2.000.000.000 DZD opérant sur 3 sites industriels (Akbou, Oran et Sétif) avec plus de 1300 employés et un Chiffre d'affaire de 19 milliards DZD. GE (Général Emballage) est l'entreprise leader du marché

algérien du carton ondulé,

1.3

SITUATION GÉOGRAPHIQUE

La Spa Général Emballage est implantée au niveau de la Zone d'Activité de Taharacht, située a 2.5 km au Nord-est du chef-lieu de la commune d'Akbou. D'une superficie de 24HA, elle est un véritable carrefour économique vu le nombre d'unités industrielles qui exercent dans différents domaines.

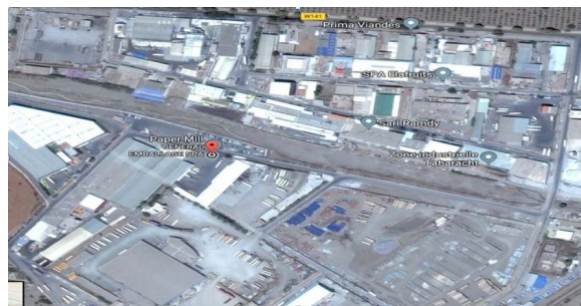


Figure 1.1 – Situation géographique

1.4

MISSION

La mission de Général Emballage est de satisfaire sa clientèle de plus en plus exigeante en matière d'Emballage et de plaques en carton ondulé. Parmi ces produits fabriqués on trouve :

PLAQUES ET INTERCALAIRES		PAV ET PLV	
CAISSE AMÉRICAINES		BUREAU ET ARCHIVAGE	
Box		ALIMENTS À EMPORTER	
BARQUETTES ET DÉCOUPES		PLATEAUX FRUITS ET LÉGUMES	

Figure 1.2 – Mission

1. **Direction Générale :** Cette direction est responsable de l'élaboration de la politique générale de l'entreprise. Elle coordonne et contrôle les principales structures de l'entreprise, ainsi que le suivi des budgets et des plans de développement.

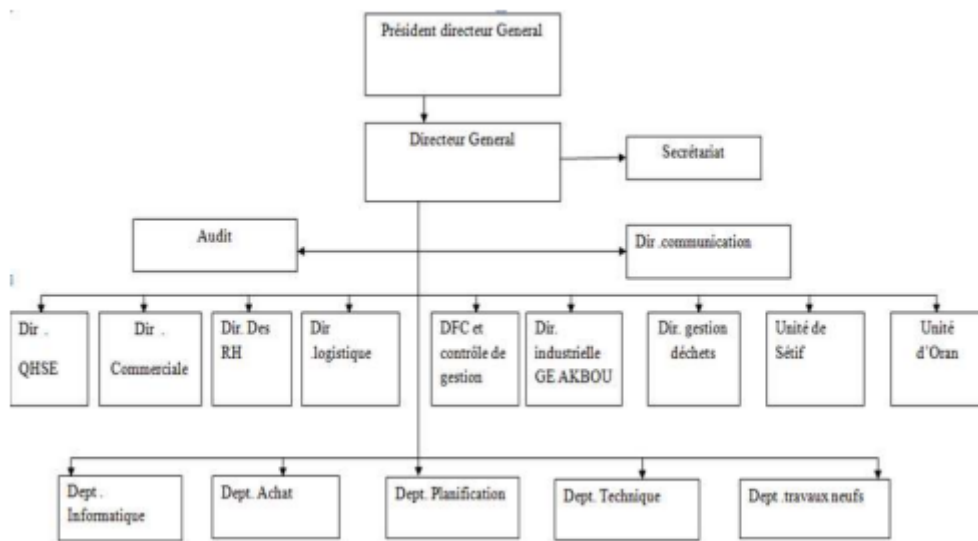


Figure 1.3 – Organigramme de l'entreprise

2. **Direction Commerciale :** La direction commerciale assure le suivi des commandes des clients et exprime les besoins de formation de chaque agent de la fonction vente. Elle étudie et suit l'évolution et les tendances du marché, recherche de nouveaux segments de marché et définit les conditions pour les satisfaire. Elle est également chargée de fidéliser les nouveaux clients et de procéder aux recouvrements des créances.
3. **Direction Finance et Comptabilité :** Cette direction aide à définir les principaux objectifs financiers de l'entreprise et veille à l'exécution de la politique financière.
4. **Direction Qualité et Développement RH :** La gestion des ressources humaines est assurée par cette direction. Elle s'occupe du recrutement, de la gestion, du perfectionnement et de la motivation du personnel. Elle fournit également un soutien et des systèmes fonctionnels et spécialisés pour favori-

ser la participation des employés. De plus, elle met en place des systèmes de gestion pour assurer le respect des normes réglementaires liées à l'emploi et aux droits de la personne.

5. **Département Approvisionnements** : Ce département est responsable de l'achat des matières premières nécessaires à l'entreprise. Il gère également les stocks de matières premières.
6. **Département Maintenance** : Le département maintenance est chargé de l'entretien des machines et organise, coordonne et contrôle toutes les actions liées à l'exploitation des machines.
7. **Département Technique** : Ce département supervise la structure technique dans tous ses aspects, y compris la technique, la production et la maintenance. Il est responsable de l'activité de maintenance.
8. **département production** : met en oeuvre des méthodes et des techniques pour transformer les matières premières en produits finis. Il combine les ressources matérielles (machines), les ressources humaines (personnel qualifié) et les matières premières (matières premières et consommables) dans un planning afin d'assurer la fabrication du produit selon des normes de qualité et de quantité précises.
9. **service de programmation** : est responsable de la planification de la production, à la fois pour l'atelier d'ondulation et pour la transformation. Il établit des programmes optimisés en tenant compte des délais de livraison, des charges machines et de la disponibilité des matières premières. Il est également chargé de produire des rapports de production et de les transmettre à la direction.

1.6

MATIÈRES PREMIÈRES

La fabrication du carton ondulé requiert peu de matières premières, il ne faut en effet que des bobines de papier et de la colle. Encre à base d'eau pour imprimer le carton ondulé selon le procédé flexographique.



Figure 1.4 – Matières premières

1.7

DESCRIPTION DU SYSTÈME

L'onduleuse peut être considérée comme une ligne de production, elle utilise le papier et la colle comme matière première pour créer du carton ondulé. Le procédé technique utilisé par l'onduleuse pour fabriquer le carton est pratiquement le même depuis les 100 dernières années. Général emballage possède 4 onduleuses au totale, 2 onduleuses au niveau d'akbou. Une onduleuse est composé de sept sections principales :

1. Poste simple face 1
2. Poste simple face 2
3. Poste double face
4. Tables chauffantes
5. Mitrailleuse
6. Coupeuse transversale
7. Tables montantes et descendantes

1.7.1

CARTON ONDULÉ

Le carton ondulé est formé de une ou plusieurs feuilles de papier ondulées ainsi que de une ou plusieurs feuilles de papier horizontales. Ces deux composantes sont annexées ensemble en utilisant de la colle. Ce sont le nombre de feuilles ondulées et le nombre de feuilles couvertures qui définissent le type de carton ondulé.

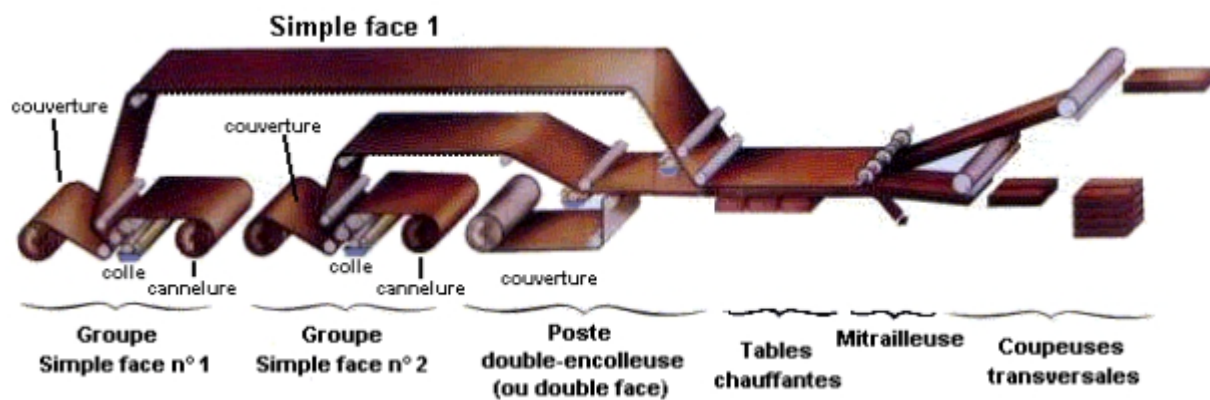


Figure 1.5 – onduleuses

Carton simple face

qui consiste en une feuille de papier canulée collée avec une feuille de papier couverture.

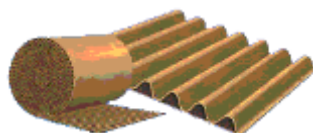


Figure 1.6 – Carton simple face

Carton double face

qui consiste en une feuille ondulée au milieu collée avec deux feuilles couvertures.

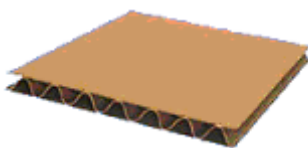


Figure 1.7 – Carton double face

Carton double double face

qui consiste en deux feuilles de papiers canulées collées avec trois feuilles de couvertures.



Figure 1.8 – Carton double double face

1.7.2 CARACTÉRISTIQUES DES CANNELURES

Le type de carton produit dépend non seulement du nombre de feuilles de papier ondulées et de feuilles de papier horizontales utilisées, mais il résulte également du type de cannelures. En effet, l'épaisseur du carton ondulé dépend principalement des caractéristiques des cannelures utilisées. Les différents types de cannelures sont définis par les paramètres suivants : La hauteur qui représente la distance entre un sommet et un creux ; le nombre d'ondulations par mètre de carton et le pas qui est la distance entre deux creux consécutifs. Les types de cannelures de

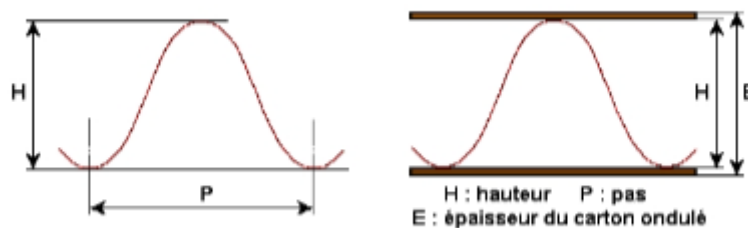


Figure 1.9 – Caractéristiques des cannelures

général emballage sont :

Types de cannelures	Epaisseur en mm
Grande Cannelure	4 mm
Petite Cannelure	1.7 mm
Moyennes Cannelure	3 mm
Mini-micro Cannelure	1 mm

Poste simple face 1

La fabrication du carton ondulé simple face nécessite deux bobines de papier, une première bobine pour le papier de face dite couverture et une seconde pour le papier de cannelure. La première bobine est donc préchauffée à une température d'environ 185°, ce procédé facilite la manipulation des fibres de papier. En effet, un papier chauffé permet une pénétration de la colle plus efficace et donne également une meilleure horizontalité du carton. La seconde bobine est également préchauffée puis circule à travers une presse cannelée qui lui donnera la forme ondulée désirée. La tâche du poste simple face 1 se termine par l'application de la colle sur le sommet des cannelures, le papier de face sera alors annexé aux cannelures à l'aide de la presse lisse. Le produit sortant de ce poste est donc un carton simple face.



Figure 1.10 – Poste simple face 1

Poste simple face 2

Les bobines de papier entrant dans le poste simple face 2 subissent les mêmes transformations que celles du poste simple face 1. L'assemblage des 2 types de carton simple face sortant des postes 1 et 2 avec une bobine de couverture (issue du poste double face) forme du carton double double face.



Figure 1.11 – Poste simple face 2

Poste double face

Le poste double face est aussi utilisé pour la fabrication du carton double face. De fait, cette étape sert à joindre une feuille de papier couverture sur la face cannelée du carton simple.

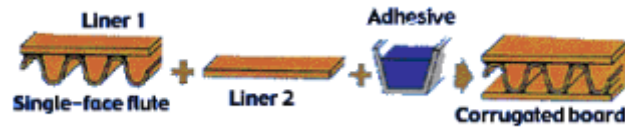


Figure 1.12 – Poste double face

Tables chauffantes

Elles reçoivent les cartons issus des postes simple face 1 et 2 qui passent à ce niveau sous des rouleaux presseurs afin d'assurer le maintien de l'encollage. Un risque d'écrasement est ici bien présent. Nous le détaillerons plus loin.



Figure 1.13 – Tables chauffantes

Mitrailleuses

Une fois la production du carton terminée, il est coupé à l'aide du poste mitrailleuse pour obtenir la largeur désirée. Une attention particulière est prêtée à l'affilage des couteaux, car ils doivent couper le carton le mieux possible.

Coupeuse transversale

Ce poste est utilisé pour couper le carton ondulé dans sa longueur, c'est en effet la coupeuse transversale qui complète le procédé technique pour rendre le carton dans le format désiré par le client. Par la suite, les feuilles de carton ondulé sont



Figure 1.14 – Mitrailleuses

envoyées sur un tapis roulant qui les amène vers le dernier poste de l'onduleuse, les tables montantes et descendantes.

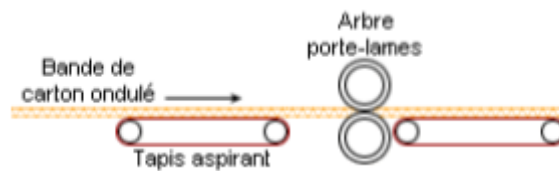


Figure 1.15 – Coupeuse transversale

Tables montantes et descendantes

L'arrivée des feuilles de carton sur les tables montantes et descendantes n'est pas aussi simple qu'il pourrait y paraître, car la vitesse du convoyeur de ce dernier poste est environ cinq fois inférieure à la vitesse de l'onduleuse. Les cartons pré empilés sont compactés sur la table montante descendante par lots de 175 feuilles maximums. Le carton est ensuite évacué sur un convoyeur à rouleau vers la section expédition de la cartonnerie.



Figure 1.16 – Tables montantes et descendantes

Le processus de fabrication du carton ondulé chez Général Emballage génère des coûts de production importants, en particulier du fait des déchets (rogne) produits. Ces déchets représentent un indicateur clé à surveiller et à minimiser pour optimiser la performance opérationnelle et financière de l'entreprise.

Le processus de fabrication du carton ondulé débute par l'arrivée des bobines de papier qu'on suppose avoir toutes $2,1\text{ m}$ de largeur. Le papier de face et le papier cannelé sont ensuite assemblés dans l'onduleuse pour former un carton ondulé. Le carton simple face passe ensuite sur des tables chauffantes avec des rouleaux presseurs pour assurer le collage. Arrivé à la mitrailleuse, le carton ondulé est coupé à la largeur désirée par le client. C'est dans cette étape qu'on observe la rogne.

L'enjeu est de regrouper les commandes clients selon un modèle de découpe qui recouvre tout l'espace qu'on a et de même optimiser l'utilisation des matières premières afin d'améliorer l'efficacité globale du processus de production.

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes structures de l'entreprise Général Emballage, et la problématique à laquelle l'entreprise Général Emballage fait face à l'instar de toutes les entreprises industrielles.

CHAPITRE

2

Problèmes de découpes

2.1

INTRODUCTION

Ce chapitre vise à fournir une vue d'ensemble des problèmes de découpe. Nous commencerons par en proposer une définition formelle et une classification selon les principales dimensions de variation, et quelques méthodes de résolution.

2.2

PROBLÈME DE DÉCOUPE

Définition 1 (Rogne (chute)). *La rogne, également appelée chute, fait référence aux déchets générés lors de la découpe des plaques de carton ondulé.*

L'un des premiers problèmes de découpe, également connu sous le nom de « cutting stock problem » a été identifié par Kantorovich dans son article intitulé « Méthodes mathématiques d'organisation et de planification de la production », qui est apparu pour la première fois en 1939 en russe, et publié ultérieurement dans *Management Science* en 1960 [15]. Le problème découpe est un problème d'optimisation combinatoire NP-difficile bien connu [11], qui consiste à déterminer

la meilleure façon de découper un ensemble d'objets de grande taille en articles plus petits avec une perte de découpe minimale.

2.2.1 VERSION BASIQUE D'UN PROBLÈME DE DÉCOUPE

Nous introduisons ci-après quelques notations nécessaires pour décrire le modèle de base d'un problème de découpe :

n : Nombre de types d'articles à découper.

m : Nombre de longueurs de stock différentes disponibles.

H_j : Longueur de la bobine j en stock.

h_j : Largeur de la bobine j en stock.

d_i : Demande pour le type d'article i .

l_i : Largeur du type d'article i

L_i : Longueur du type d'article i

y_j : Nombre de fois que le type de bobine en stock j est utilisé.

x_{ij} : Nombre de fois que le type d'article i est découpé à partir du type de bobine j .

Notons $h = \sum_{j=1}^m h_j$. Le problème de découpe peut être ainsi formulé comme un problème de programmation linéaire en nombres entiers suivant :

$$\min \quad h - \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n l_i x_{ij} \quad (2.1)$$

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} \geq d_i \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (2.2)$$

$$\sum_{i=1}^n l_i x_{ij} \leq h_j y_j \quad \forall j = 1, \dots, m \quad (2.3)$$

$$y_j, x_{ij} \geq 0, \text{Entier} \quad \forall i, j \quad (2.4)$$

La fonction (2.1) représente l'objectif qui consiste à maximiser la surface utilisée, ce qui revient à minimiser la chute totale des bobines utilisées. La contrainte (2.2) assure que la demande pour chaque type d'article est satisfaite. La contrainte (2.3) garantit que la longueur totale des articles découpés à partir d'une bobine en stock ne dépasse pas la longueur de cette bobine. Les variables dans la la contrainte

(2.4) doivent être des entiers non négatifs.

Exemple 1. *Considérons deux bobines de papier de dimensions respectives 7×17 et 8×15 cm. Deux clients passent leurs commandes :*

- *Commande 1 : le client 1 commande 3 plaques de dimensions 4×5 cm.*
- *Commande 2 : le client 2 commande 2 plaques de dimensions 3×9 cm.*

L'objectif est de découper la bobine de manière à minimiser les chutes tout en satisfaisant les deux commandes. En considérant les notations précédentes, ce problème peut être formulé comme suit :

$$\min 7 - (4x_{11} + 3x_{21}) + 8 - (4x_{12} + 3x_{22}) \quad (2.5)$$

$$4x_{11} + 3x_{21} \leq 7 \quad (2.6)$$

$$4x_{12} + 3x_{22} \leq 8 \quad (2.7)$$

$$x_{11} + x_{12} \geq 3 \quad (2.8)$$

$$x_{21} + x_{22} \geq 2 \quad (2.9)$$

$$x_{11}, x_{12}, x_{21}, x_{22} \geq 0, \text{ entiers.} \quad (2.10)$$

Remarque 1. *La fonction objectif peut aussi s'exprimer de manière équivalente comme étant la surface maximale utilisée :*

$$\max 68x_{11} + 51x_{21} + 60x_{12} + 45x_{22}$$

Remarque 2. *Comme nous pouvons le constater, les problèmes de découpe sont des problèmes linéaires en nombres entiers, donc de complexité NP-complet, et par conséquent difficile à résoudre.*

2.3

VARIANTES DE PROBLÈMES DE DÉCOUPES

Les problèmes de découpe sont variés et complexes, car ils impliquent différentes configurations, contraintes et objectifs. Nous présentons dans ce qui suit quelques-unes des variantes les plus courantes des problèmes de découpe :

2.3.1 DÉCOUPES DE VOLUMES OU DE POIDS

Il s'agit dans cette variante, d'emballer des articles de poids ou volumes donnés dans des boîtes de capacités connues.

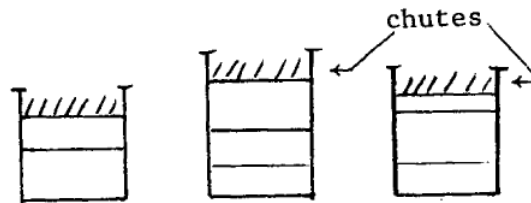


Figure 2.1 – Découpes de volumes ou de poids

2.3.2 DÉCOUPES D'ESPACES

Dans ce type de découpe, le procédé consiste à ranger des objets de largeurs données sur des rayons d'entrepôt (c'est le problème du bibliothécaire), ou répartir des programmes d'ordinateur entre différentes zones de mémoire qui sont disponibles dans la machine (gestion de mémoire par zones).

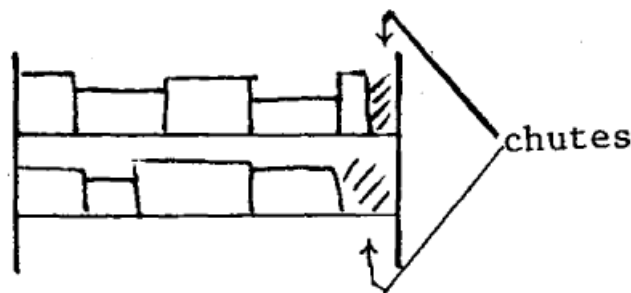


Figure 2.2 – Découpes d'espaces

2.3.3 DÉCOUPES DE TEMPS

Cette variante consiste à affecter des tâches, qui ne peuvent être morcelées et dont on connaît le temps d'accomplissement, à divers processeurs disponibles durant un temps donné.

Nous nous concentrerons sur les problèmes de découpe d'espace qui peuvent être classé selon le nombre de dimensions :

2.4.1 DÉCOUPE À UNE DIMENSION

Le problème de découpe à une dimension, également connu sous le nom de problème de découpe unidimensionnelle, se rencontre lors du processus de découpage de produits à partir de rouleaux de largeur fixe et de longueur considérée comme illimitée, ou de barres de longueurs standards. L'objectif est de découper ces matériaux en pièces de longueurs différentes de manière à minimiser les chutes générées pendant le processus de découpe.

2.4.2 DÉCOUPE À DEUX DIMENSIONS

Le problème de découpe à deux dimensions est un problème d'optimisation combinatoire qui consiste à découper un nombre de petites pièces rectangulaires de taille et de quantité données à partir d'un support bidimensionnel, comme une plaque ou une feuille. L'objectif est de minimiser la surface totale du support utilisé, ce qui revient à minimiser les chutes générées lors du processus de découpe.

2.4.3 DÉCOUPE À TROIS DIMENSIONS

Le problème de découpe à trois dimensions prend en compte la longueur, la largeur et la hauteur des pièces à découper. L'objectif est alors de placer de manière optimale ces éléments parallélépipédiques dans l'espace tridimensionnel disponible, en minimisant les espaces vides.

2.5.1 MODÈLE DE DÉCOUPE UNIFORME

Dans ce modèle, une découpe réalisable est constituée uniquement de bandes uniformes.

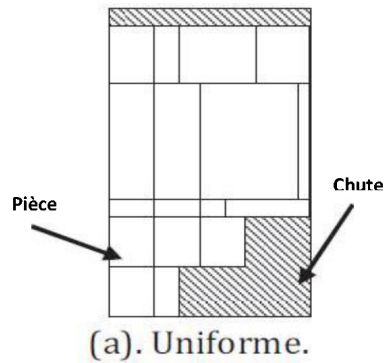


Figure 2.3 – Découpe Uniforme

2.5.2 MODÈLE DE DÉCOUPE HOMOGÈNE

Ce modèle de dissection uniforme, une découpe est caractérisée par la répétition d'un seul type de pièces.

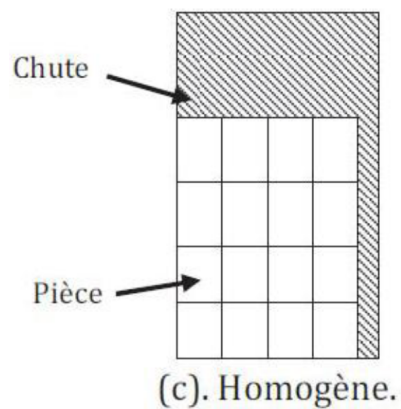


Figure 2.4 – Découpe Homogène

2.5.3 MODÈLE DE DÉCOUPE GÉNÉRAL

Pour ce type de modèle, une découpe réalisable est constitué par la combinaison de bandes générales horizontales ou verticales.

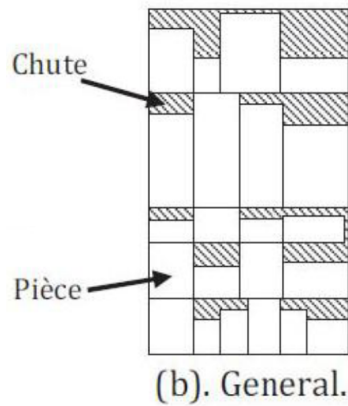


Figure 2.5 – Découpe Générale

2.6 DIFFÉRENTS TYPES DE DÉCOUPES

2.6.1 DÉCOUPE GUILLOTINE

La découpe guillotine se caractérise par le fait que les lignes de découpe doivent former un motif en grille, avec des intersections à angles droits. Cela signifie que les coupes horizontales et verticales doivent se couper perpendiculairement, d'un bord du rectangle l'autre. L'avantage de la découpe guillotine est qu'elle est plus simple à mettre en oeuvre d'un point de vue pratique.

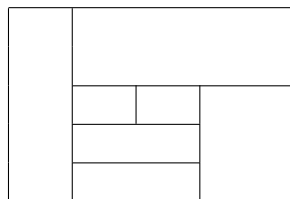


Figure 2.6 – Découpe guillotine

2.6.2 DÉCOUPE NON GUILLOTINE

Dans le cas de la découpe non guillotine, les lignes de découpe ne sont pas limitées aux coupes perpendiculaires d'un bord à l'autre. Cela permet d'avoir plus de flexibilité dans les motifs de découpe possibles. En général, cette approche permet d'obtenir de meilleures solutions de découpe, c'est-à-dire un meilleur taux d'utilisation de la surface de la plaque. La contrepartie est que la mise en oeuvre pratique de la découpe non guillotine est plus complexe, car les lignes de découpe peuvent s'arrêter avant d'atteindre le bord opposé.

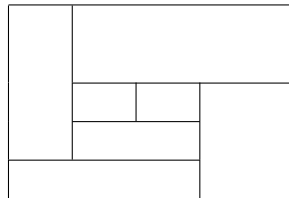


Figure 2.7 – Découpe non guillotine

2.7 QUELQUES PROBLÈMES CONCRETS DE DÉCOUPE

La diversité et la complexité des problèmes de découpe, nécessitent des approches spécifiques pour optimiser l'utilisation des matériaux et répondre aux contraintes spécifiques de chaque situation.

2.7.1 PROBLÈME DE DÉCOUPE AVEC DIFFÉRENTES QUALITÉS

Lors d'un projet de recherche opérationnelle, mené par une entreprise suédoise qui fournit des systèmes d'aide à la décision pour l'industrie des produits en bois, le problème est d'utiliser efficacement les planches de bois non transformées provenant de la scie. Les planches sont disponibles en différentes longueurs, et les cadres et appuis de fenêtres ont des exigences différentes en matière de taille standard en termes de longueur et de largeur, ainsi que des exigences variables en matière de qualité du bois. L'étude menée par les responsables du projet [19], consiste à dé-

terminer quels produits finaux (cadres/seuils) doivent être découpés dans chaque planche individuelle pour optimiser l'utilisation.

2.7.2 PROBLÈME DE DÉCOUPE EN DEUX ÉTAPES

IL s'agit d'un problème de découpe qui se pose dans une entreprise sidérurgique [7]. Dans ce type de problème il existe deux opérations de découpe différentes, avec une étape de traitement intermédiaire entre elles. Cela introduit une complexité supplémentaire par rapport au problème de coupe unidimensionnel classique. Dans ce problème les principaux objectifs sont de minimiser les pertes de garnitures, réduire le nombre de réglages, minimiser le nombre de rouleaux intermédiaires pour réduire le travail de traitement. Ces objectifs peuvent être contradictoires, alors il faut trouver un équilibre. Les sous-problèmes impliqués sont des problèmes de sac à dos relativement importants, qui doivent être résolus efficacement.

2.7.3 DÉCOUPE ET DE DIMENSIONNEMENT DE LOTS

les auteurs de cette étude ont étudié la minimisation des coûts totaux dans un processus de production qui combine à la fois le problème de découpe de stock (découper des grandes plaques d'acier en plus petits formats) et le problème de dimensionnement de lots (déterminer les quantités optimales à produire) [18].

Les principales caractéristiques du problème sont d'une part, le coût de mise en place conjoint car il existe un coût fixe lié à la préparation du processus de découpe et de production, indépendamment des quantités produites. Ce coût doit être pris en compte. D'autre part, les conditions statiques et déterministes, où la demande et les autres paramètres du problème sont considérés comme connus et constants dans le temps, et les plaques d'acier de dimensions standards. Le problème ne prend pas en compte les limites de capacité de production ou de découpe. La formulation mathématique du problème conduit à un problème d'optimisation non linéaire avec une fonction objectif concave et des contraintes linéaires. Des procédures de résolution spécialisées, comme des heuristiques, sont proposées et

évaluées numériquement.

2.7.4 DÉCOUPE AVEC DES OBJECTIFS MIXTES

Traditionnellement, les objectifs dans ce problème sont de minimiser le gaspillage de matériau et de réduire les coûts de production. Cependant, dans de nombreux cas industriels, d'autres objectifs entrent en jeu, tels que le respect des délais de livraison ou la limitation du nombre de changements de configuration des machines. Dans l'article [2], les auteurs proposent d'aborder le problème de découpe de stock avec des objectifs multiples, en tenant compte à la fois de la qualité de la solution (minimisation du gaspillage) et des contraintes opérationnelles (réduction du temps de calcul). L'objectif est de fournir aux entreprises des méthodes efficaces pour résoudre le problème de découpe de stock en tenant compte à la fois de la qualité de la solution et des contraintes opérationnelles.

2.8 MÉTHODES DE RÉOLUTION

Il existe trois grandes catégories de méthodes de résolution de problèmes de découpe : Les méthodes exactes qui permettent d'obtenir la solution optimale à chaque fois, mais le temps de calcul peut être long si le problème est compliqué à résoudre. Les méthodes approchées, encore appelées heuristiques, qui permettent d'obtenir rapidement une solution approchée, donc pas nécessairement optimale, et enfin les méthodes hybrides qui combinent plusieurs techniques pour exploiter les avantages de chacune et obtenir des solutions plus efficaces. Nous présentons dans ce qui suit, une liste qui est loin d'être exhaustive de ces méthodes qui résolvent les problèmes de découpe. (voir [22] et [5] pour un exposé plus détaillé).

2.8.1 MÉTHODES EXACTES

Les méthodes exactes cherchent à trouver la solution optimale d'un problème en explorant toutes les possibilités, souvent en utilisant des techniques de program-

mation mathématique. Le principe fondamental des méthodes exactes consiste à énumérer de manière implicite l'ensemble des solutions de l'espace de recherche. Pour améliorer l'énumération, ces méthodes disposent de techniques pour détecter le plus tôt possible les échecs et orienter les différents choix.

Programmation linéaire en nombres entiers

La programmation linéaire en nombres entiers (PLNE) est un outil de modélisation très utilisé pour les problèmes de découpe [11], et ce pour plusieurs raisons :

- Les problèmes de découpe impliquent souvent des décisions discrètes, comme le choix des pièces à découper, leur orientation, leur positionnement, etc.
- La PLNE permet de modéliser ces aspects combinatoires à l'aide de variables binaires et entières.
- Les problèmes de découpe sont caractérisés par des contraintes géométriques complexes, comme le non-chevauchement des pièces, le respect de formes irrégulières, etc.
- La PLNE offre un cadre flexible pour exprimer ces contraintes à l'aide d'inégalités linéaires. (voir l'exemple 1).

Remarque 3. *L'inconvénient de cette méthode réside dans la difficulté à résoudre des problèmes pour de grandes instances.*

Dans les travaux [11, 12], les auteurs ont constaté que l'expression directe du problème de chute sous forme de programme en nombres entiers devenait irréalisable sur le plan computationnel en raison du grand nombre de variables nécessaires. Les auteurs ont réussi à surmonter cette difficulté en imposant une restriction de guillotine sur la formulation de programmation linéaire [13], ce qui leur a permis de résoudre le problème en introduisant des fonctions auxiliaires de sac à dos généralisées.

Les auteurs dans [6], ont également utilisé un algorithme de recherche arborescente avec la restriction de guillotine, générant des motifs de découpe faisables sans duplication et calculant des bornes à l'aide d'une routine de transport et de programmation dynamique.

Dans [3], l'auteur a introduit une relaxation lagrangienne d'une formulation de programmation en nombres entiers à variables bivalentes, et a utilisé la borne ainsi obtenue dans une procédure de recherche arborescente. L'optimisation du sous-gradient a été utilisée pour optimiser la borne lagrangienne, ce qui a permis de résoudre des problèmes de taille modérée.

Programmation dynamique

La programmation dynamique (PD) est une méthode de résolution de problèmes d'optimisation combinatoire qui divise le problème complexe en sous-problèmes plus simples et résout chaque sous-problème une seule fois, stockant leurs solutions pour éviter les calculs redondants [3]. Cette technique est particulièrement utile pour les problèmes de découpe [2].

génération de colonnes

La méthode de génération de colonnes a été utilisée pour la première fois dans [11], pour résoudre un problème de découpe. Depuis, la génération de colonnes a permis de résoudre un grand nombre de programmes linéaires comportant un très grand nombre de variables. L'extension de cette technique à la résolution des programmes linéaires en nombres entiers avait été initiée par [8]. Le but de la génération de colonnes est de réussir à trouver la solution optimale du problème initial sans avoir à générer l'ensemble de toutes variables, il suffit en fait de générer au moins les variables formant une solution optimale. Pour trouver ces variables on résout le problème à l'optimal et on utilise la dualité pour générer une variable améliorante (ou même plusieurs). Ces nouvelles variables sont ajoutées au problème, sa solution optimale est mise à jour (en même temps que les valeurs duales) et on recommence la recherche de variables améliorantes. On réitère ainsi jusqu'à prouver qu'il n'y a plus de variable améliorante [10].

Génération de bandes

Les algorithmes de génération de bandes procèdent en deux étapes distinctes :

- Génération d'un Ensemble de Bandes : Une bande $(\alpha; \beta)$ avec $0 < \alpha \leq L$ et $0 < \beta \leq W$, est obtenue en appliquant une découpe guillotine sur le rectangle

initial $(L; W)$. La première découpe peut être horizontale ou verticale, et en fonction de cette première découpe, une bande horizontale $(L; \beta)$ ou une bande verticale (α, W) est générée.

- Recherche d'une Combinaison Optimale de Bandes : Dans la deuxième étape, les algorithmes cherchent à trouver une combinaison optimale de ces bandes générées. En explorant les différentes possibilités de combinaison des bandes horizontales et verticales obtenues, l'objectif est d'optimiser l'agencement des bandes pour répondre aux contraintes du problème de découpe.

2.8.2 MÉTHODES APPROCHÉES

Les méthodes approchées, notamment les heuristiques et les méta-heuristiques constituent une alternative très intéressante pour traiter les problèmes d'optimisation de grande taille lorsqu'on peut se contenter d'une solution approximative. Les méthodes gloutonnes et les méthodes itératives constituent les plus anciennes méthodes approchées [17], puis apparait une nouvelle génération de méthodes approchées plus puissantes et générales appelées méthaheuristiques [14].

Basées sur la programmation dynamique ou en nombres entiers, la plupart des problèmes de découpe utilisent des algorithmes heuristiques qui diffèrent dans la façon dont elles sélectionnent et utilisent les objets stockés et commandés. Les deux méthodes proposées dans [2], visent à réduire la charge de calcul en ne conservant que les états les plus prometteurs à chaque étape du processus de programmation dynamique.

Recuit simulé

Le recuit simulé est une méthode heuristique efficace pour résoudre les problèmes de découpe et de placement. Le recuit simulé applique itérativement l'algorithme de Metropolis [16], pour engendrer une séquence de configurations qui tendent vers l'équilibre thermodynamique. L'algorithme se présente comme suit :

1. On se donne un réel arbitraire $T > 0$, appelé température. On définit également le voisinage $V(s)$ de la solution.

2. On tire au sort une transformation $\{s'\}$ dans $V(s)$.
3. On calcule la variation de coût $f = f(s') - f(s)$.
4. Si $f = 0$, la transformation est acceptée et s devient $\{s'\}$. Si $f > 0$, la transformation est acceptée avec une probabilité $e^{(-f/T)}$.
5. Les étapes 2 à 4 sont répétées jusqu'à ce que la température atteigne un seuil bas.

Dans l'article [4], les auteurs présentent une nouvelle solution basée sur ce procédé pour les problèmes linéaires en nombres entiers. Un nouveau modèle du problème de découpe a été développé et utilisé pour illustrer ses performances, et une comparaison informatique directe et une analyse statistique de la méthode de recuit simulé montrent qu'elle peut fournir des solutions en un temps raisonnable.

2.9

CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons dressé un panorama des problèmes de découpe, en donnant les définitions et concepts de base. Fort de ces éléments théoriques, le chapitre suivant sera focalisé sur la modélisation mathématique et la résolution d'un problème de découpe spécifique à l'entreprise Général Emballage.

CHAPITRE

3

Modélisation et Résolution du problème

3.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous proposons une formulation mathématique du problème de découpe que nous avons introduit dans le premier chapitre, en nous appuyant sur les données spécifiques de l'entreprise. Le problème est ainsi modélisé sous forme d'un programme linéaire en nombres entiers (PLNE), que nous avons implémenté en Matlab, afin de minimiser la chute du produit fini (plaque du carton ondulé).

3.2 MODÉLISATION MATHÉMATIQUE

On considère pour la suite de ce chapitre les notations suivantes :

- n : le nombre total de clients.
- m : le nombre total de modèles de découpe.
- l : la largeur des bobines de papier .
- L : la longueur des bobines de papier.
- d_j : la quantité de plaques commandées selon le modèle j .

- l_j : la largeur de la plaque commandée selon le modèle j .
- L_j : la longueur de la plaque commandée selon le modèle j .

Notons :

- x_j : le nombre de plaques découpées selon le modèle j , ($j = 1, \dots, m$).

Le problème qui consiste à minimiser la chute peut s'écrire alors sous la forme :

$$\min l - \sum_{j=1}^m l_j x_j \quad (3.1)$$

$$x_j L_j \geq d_j, \forall j \quad (3.2)$$

$$\sum_{j=1}^m l_j * x_j \leq l, \quad (3.3)$$

$$\sum_{j=1}^m x_j * L_j \leq L, \quad (3.4)$$

$$x_j \in \mathbb{N}, \forall i, j, \quad (3.5)$$

où la relation (3.1) représente la fonction objectif, qui consiste à minimiser la chute totale du produit fini. La contrainte (3.2) signifie que la quantité de plaques du client i découpées selon tous le modèle j doit être supérieure ou égale à la quantité demandée. Les sommes des largeurs (respectivement longueurs) des plaques découpées selon chaque modèle ne doivent pas dépasser la largeur (respectivement longueur) de la bobine sont formulées par les contraintes (3.3) et (3.4) respectivement. La contrainte (3.5) stipule que le nombre de plaques du client i découpées selon le modèle j doit être un entier.

3.3

OUTILS ET MÉTHODE DE RÉOLUTION

Le modèle obtenu est un Problème de Programmation Linéaire en nombres entiers (PLNE). Pour résoudre le problème posé, nous avons développé une application sous MATLAB (Matrix LABORatory), qui est un logiciel de programmation interactif destiné au calcul scientifique, et qui dispose de nombreuses fonctions pré-définies et des capacités graphiques très avancées. MATLAB est apprécié pour sa facilité d'utilisation, sa flexibilité et ses performances.

Remarque 4. L'entreprise General Emballage utilise pour la gestion des découpes le Logiciel PC-TOPP, qui est un logiciel payant, spécialisé dans la planification et de contrôle de la production du carton ondulé.

3.3.1 PRÉSENTATION DE L'APPLICATION

Nous avons écrit un script MATLAB qui encode le modèle mathématique (3.1)-(3.5). Nous avons comme résultat cette application qui par sa fenêtre principale représentant le menu général, prend en entrée les données suivantes :

Données : (Dimensions (largeur et longueur) des plaques demandées, Nombre de plaques demandées, Largeur de la bobine, Longueur de la bobine).

Programme de découpe bi-dimensionnel				
	Largeur	Longueur	Nombre	Bobine
Commande 1	560	1090	1500	878000 Longueur
Commande 2	390	1370	1000	2100 Largeur

Résultats				
	Coupes	Plaques	Mètres	Chute
Commande 1				
Commande 2				

Figure 3.1 – Fenêtre principale

Résultats

Une fois les données introduites, le bouton EXÉCUTER permet de lancer l'exécution du programme et fournir les résultats suivants :

- Les nombres de poses pour chaque type.
- La chute respectivement en (vert ou rouge), indiquant que la solution est (admise ou non admise) selon les normes de l'entreprise.
- Le nombre de plaques de chaque type à découper.
- La Longueur de la bobine nécessaire pour produire toutes les plaques.
- Le nombre de coupes nécessaires pour obtenir les plaques

Programme de découpe bi-dimensionnel				
	Largeur	Longueur	Nombre	Bobine
Commande 1	560	1090	1500	878000 Longueur
Commande 2	390	1370	1000	2100 Largeur

Résultats				
	Coupes	Plaques	Mètres	Chute
Commande 1	750	1500	817.5	2
Commande 2	596.715	1193.43		2

Figure 3.2 – Résultats d'une exécution

Remarque 5. Lorsque la chute affichée est en rouge, cela signifie que la solution optimale trouvée par l'application est trop élevée par rapport aux normes de l'entreprise ($chute > 100$). L'utilisateur sera alors invité à revoir les paramètres d'entrée, tels que le nombre des plaques demandées. Contrairement à une chute affichée en vert.

3.3.2 VALIDATION ET DISCUSSION DES RÉSULTATS

Dans le but de valider l'application que nous avons programmée, nous avons introduit les données réelles de l'entreprise et comparé nos résultats avec les ré-

sultats du Logiciel PC-TOPS qui permet bien souvent d'aboutir à des résultats satisfaisants et performants.

Parmi plusieurs commandes reçues par General Emballage, nous avons testé notre application sur les commandes de la table 3.3.

PC-Topp		14/01/24 16:29		2100 mm		LISTE DE COUPE		878 m		Programme 7141	
4167B		TB125/DS120/DS120		14/01 18:30 - 18:30		O N F		1844 m ²		Page 1 1.74 %	
Couverture externe TB135	231 kg	Heure Début		Temps		A r r e t s		Cause		Equipe	
Cannelure										M / A / N	
Couverture		Heure Fin								Conducteur	
Cannelure C FL125	341 kg										
Couverture interne TE125	231 kg										
Cannelure											
Couverture											
Cannelure											
Couverture											
Commande	Commandé	Combinaison M Coupes		Plaqu.Mètres		Refouleurs		Rogne Délai Trans.			
1 24011313 01 BL EMBALLAGE A 1	1500:1	3 x	560x1090 U	534	1602	583	130-300-130	C03273RF1	30	14/01	PLQ
24011186 01 GUENDOUB AYOUB B 1	1000:1	1 x	390x1370 L	425	425		120-150-120	C02900DZ1		14/01	PLQ
2 24011186 01 GUENDOUB AYOUB A-2	1000:1	3 x	390x1370 U	215	645	295	120-150-120	C02900DZ1	50	14/01	PLQ
24011187 01 GUENDOUB AYOUB B-2	2500:1	2 x	440x1250 L	236	472		120-150-120	C02900ES1		14/01	PLQ

Figure 3.3 – Exemple d'exécution sur PC-TOP

Comme nous pouvons le constater, la table 3.3 contient les deux commandes suivantes :

Commande 1

cette commande est composée de deux demandes de clients différents :

- Le Client 1 (voir 3.3), a passé une demande de 1500 plaques de dimensions (560× 1090) mm.
- Le Client 2 (voir 3.3), a passé une demande de 1000 plaques de dimensions (390× 1370) mm

Commande 2

cette commande est composée de deux demandes du même client :

- Le Client 2 (voir 3.3), a passé une demande de 1000 plaques de dimensions (390× 1370) mm.
- Le Client 2 (voir 3.3), a passé une demande de 2500 plaques de dimensions (440× 1250) mm

Nous avons introduit les données précédentes dans notre application, et nous avons eu les résultats suivants :

Résultats de l'exécution sur la Commande 1

La Figure 3.4, résume les résultats de l'exécution de l'application sur les données de la commande 1. Comme nous pouvons le constater, le résultat n'est pas

Programme de découpe bi-dimensionnel				
	Largeur	Longueur	Nombre	Bobine
Commande 1	560	1090	1500	878000 Longueur
Commande 2	390	1370	1000	2100 Largeur

Résultats				
	Coupes	Plaques	Mètres	Chute
Commande 1	750	1500	817.5	2
Commande 2	596.715	1193.43		2

S. Ibrahim & F. Lagab


Figure 3.4 – Exécution sur les données de la Commande 1

meilleur que celui donné par PC-TOPS, dont la valeur de la chute est 30 mm, nettement inférieure à celle trouvée par notre application. Cependant, en ajustant le paramètre qui définit le « nombre de plaques » demandées par le client 2, jusqu'à satisfaire demande du client 1, on obtient des résultats meilleurs (voir la Figure 3.5), où nous pouvons constater que les chutes sont similaires, tout en évitant l'excédant de production de plaques pour le client 1, qui est de $1602-1500=102$ plaques en plus, et en réduisant la longueur de la bobine utilisée, à savoir : 545 m au lieu de 583 m .

Données

Programme de découpe bi-dimensionnel

	Largeur	Longueur	Nombre	Bobine
Commande 1	560	1090	1500 ◀ ▶	878000 Longueur
Commande 2	390	1370	397 ◀ ▶	2100 Largeur


Exécuter

Résultats

	Coupes	Plaques	Mètres	
Commande 1	500	1500	545	3
Commande 2	397.81	397.81		1

Chute
30

S. Ibrahim & F. Lagab

Figure 3.5 – Ajustement des données de la Commande 1

Résultats de la Commande 2


Après avoir satisfait la demande du client 1, qui est de 1500 plaques de dimensions (560×1090) *mm* et produit 397 plaques de la demande du client 2, il en reste 603 plaques de dimension (390×1370) *mm* à produire pour le client 2, où nous pourrions utiliser les $878-545=333$ *m* de bobine disponible. En lançant ainsi la commande 2, on obtient un message d'erreur stipulant que l'ensemble des solutions réalisables est vide. On procède donc à l'ajustement de la demande du client 1, jusqu'à satisfaire la demande du client 2, qui est de 603 plaques. La Figure 3.6, résume les résultats de l'exécution de l'application sur les données de la commande 2 avec la nouvelle demande du client 1, qui est de 2500 plaques de dimension (440×1250) *mm*.

Nous pouvons remarquer que la valeur de la chute générée par notre application et similaire à celle générée par PC-TOPS, ce qui confirme que notre approche permet de minimiser les pertes de manière équivalente au PC-TOPS. Cependant, la principale différence réside dans le nombre de plaques découpées et la longueur

Données

Programme de découpe bi-dimensionnel

	Largeur	Longueur	Nombre	Bobine
Commande 1	390	1370	603	333000 Longueur
Commande 2	440	1250	440	2100 Largeur


Exécuter

Résultats

	Coupes	Plaques	Mètres	
Commande 1	201	603	275.37	3
Commande 2	220.296	440.592		2

Chute
50

S. Ibrahim & F. Lagab

Figure 3.6 – Réutilisation du reste de la bobine

de la bobine utilisée. En effet, le nombre de plaques généré par le logiciel PC-TOPS pour le client 1, est de 645, c'est-à-dire un excédant de 75 plaques par rapport à la demande du client 1.

3.4 CONCLUSION

Dans ce chapitre, après avoir modélisé et formulé mathématiquement le problème, nous avons développé une application informatique visant à trouver des solutions optimales. L'objectif principal de notre application était de maximiser le rendement de la découpe tout en minimisant les déchets générés en prenant en compte différents paramètres. Une étude comparative nous a permis d'évaluer l'efficacité de notre solution qui permet de découper un nombre de plaques plus adapté aux besoins de production, ce qui offre la possibilité d'éviter le gaspillage lié à une production excédentaire qui ne serait pas entièrement valorisée. Cela est du principalement à la flexibilité offerte par notre application qui nous a permis d'itérer sur ces différents éléments pour trouver la meilleure configuration, là où le logiciel

PC-TOPS semble plus rigide.

Conclusion Générale

Au terme de ce mémoire, nous pouvons dresser un bilan global de notre travail d'étude et de recherche.

Nous nous étions fixé pour objectif principal de développer une solution innovante pour optimiser la découpe de carton ondulé et réduire les chutes de matériau. Cet enjeu revêt une importance économique et environnementale majeure pour l'industrie du packaging.

Tout au long de notre démarche, nous avons suivi une approche structurée comprenant plusieurs étapes clés :

- La modélisation mathématique du problème d'optimisation, en tenant compte des différentes contraintes et objectifs à optimiser.
- La conception et le développement d'une application informatique .
- La réalisation d'une étude comparative pour évaluer les performances de notre solution par rapport aux méthodes existantes.

Les résultats de notre travail sont très encourageants. Nos analyses ont démontré que notre application d'optimisation permettait d'obtenir des gains significatifs en termes de réduction des chutes, de productivité et de coûts de production.

Au-delà de l'aspect technique, ce projet nous a également permis de développer des compétences transversales essentielles, telles que la modélisation de problèmes complexes, la programmation avancée, l'analyse de données et la conduite d'études comparatives.

En conclusion, ce travail de mémoire constitue une contribution significative à la résolution d'un défi industriel majeur. Nous espérons que les résultats et les enseignements tirés de cette expérience pourront bénéficier à d'autres problématiques d'optimisation dans des contextes similaires.

Bibliographie

- [1] Julien Antonio. *Les problèmes de placements : Etude et résolution de quelques problèmes réels*. PhD thesis, Université de metz, 1997.
- [2] Julien Antonio, Fabrice Chauvet, Chengbin Chu, and Jean-Marie Proth. The cutting stock problem with mixed objectives : Two heuristics based on dynamic programming. *European Journal of Operational Research*, 14, pp. 395-402, 1999.
- [3] J. E. Beasley. An exact two-dimensional non-guillotine cutting tree search procedure, 33(1), pp. 49-64. *Operations Research*, 1985.
- [4] Chuen Lung S. Chen, Stephen M. Hart, and Wai Mui Tham. A simulated annealing heuristic for the one-dimensional cutting stock problem. *European Journal of Operational Research*, 93, 522-535, 1996.
- [5] C.H. Cheng, B.R. Feiring, and T.C.E. Cheng. The cutting stock problem - a survey. *Int. J. Production Economics*, 36, 291-305, 1994.
- [6] N. Christofides and C. Whitlock. An algorithm for two-dimensional cutting problems, 25, pp. 30-34. *Operations Research*, 1977.
- [7] J.M. Valério de Carvalho and A.J. Guimaraes Rodrigues. An lp-based approach to a two-stage cutting stock problem. *European Journal of Operational Research*, pp. 580-589, 1995.
- [8] Guy Desaulniers, Jacques Desrosiers, and Marius M. Solomon. *Column generation*. Springer, 2005.
- [9] L. Euler. Solutio problematis ad geometriam situs pertinentis. *Commentarii academiae scientiarum Petropolitanae*, 8, 1741.

- [10] Souhaïla El Filali. *Méthode de génération de colonnes pour les problèmes de conception de réseaux avec coûts d'ajout de capacité*. PhD thesis, Université de Montréal, 2014.
- [11] P. C. Gilmore and R. E. Gomory. A linear programming approach to the cutting-stock problem. *Operations Research*, 9(6), pp. 849-859, 1961.
- [12] P. C. Gilmore and R. E. Gomory. A linear programming approach to the cutting stock problem-part ii. *Operations Research*, 11(6), pp. 863-888, 1963.
- [13] P. C. Gilmore and R. E. Gomory. Multistage cutting stock problems of two and more dimensions. *Operations Research*, 13(1), pp. 94-120, 1965.
- [14] F. Glover, M. Laguna, and R. Marti. *Handbook of metaheuristics*. International Series in Operations Research and Management Science, 57, 2003.
- [15] L. V. Kantorovich. Mathematical methods of organizing and planning production, 6(4), 366-422. *Management Science*, 1960.
- [16] S. Kirkpatrick, Jr. C.D. Gelatt, and M.P. Vecchi. Optimization by simulated annealing. *Science*, 220, 671-680, 1983.
- [17] A. Nijenhuis and H. S. P. Jilf. *Combinatorial Algorithms*. Academic Press, New York, 1975.
- [18] Sigrid Lise Nonas and Anders Thorstenson. A combined cutting-stock and lot-sizing problem. *European Journal of Operational Research*, pp. 327-342, 2000.
- [19] Mikael Rönnqvist. A method for the cutting stock problem with different qualities. *European Journal of Operational Research*, pp. 57-68, 1995.
- [20] M. Sakarovitch. *Optimisation combinatoire : Méthodes mathématiques et algorithmiques*. Hermann, Paris, 1984.
- [21] A. Schrijver. *Theory of linear and integer programmings*. John Wiley and Sons, Inc., New York, USA, 1998.
- [22] P.E. Sweeney and E.R. Paternoster. Cutting and packing problems : An updated literature review. *Working Paper No. 654, University of Michigan, School of Business*, 1991.

- [23] Mahmoud Zennaki. *Recherche Opérationnelle et Combinatoire*. PhD thesis, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran ũ Mohamed Boudiaf, 2020.