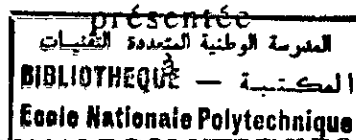


THESE DE MAGISTER

en

GENIE INDUSTRIEL



l'ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE D'ALGER

par

M. AMAR OUKIL

*Approche intégrée
pour
la planification de la production
en
industrie de la construction métallique*

APPLICATION A L'U.C.C. DE OUED SMAR

Soutenue devant le Jury composé de :

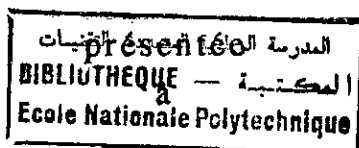
M. Z. HADDAD	Maitre de conférence	E.N.P.	Président
M. A. OUABDESSELEM	Professeur	E.N.P.	Examineur
Mlle. N. ABOUN	Chargé de cours	E.N.P.	Examineur
Mme. O. BELMOKHTAR	Maitre de conférence	E.N.P.	Rapporteur
M. B. LAABAS	Maitre de conférence	I.S.E.	Rapporteur
M. M. SARI	Chargé de cours	E.N.P.	Invité
M. A. LARIBI	Représentant de l'E.N.C.C.		Invité

Juin 1995

THESE DE MAGISTER

en

GENIE INDUSTRIEL



L'ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE D'ALGER

par

M. AMAR OUKIL

*Approche intégrée
pour
la planification de la production
en
industrie de la construction métallique
APPLICATION A L'U.C.C. DE OUED SMAR*

Soutenue devant le Jury composé de :

M. Z. HADDAD	Maitre de conférence	E.N.P.	Président
M. A. OUABDESSELEM	Professeur	E.N.P.	Examineur
Mlle. N. ABOUN	Chargé de cours	E.N.P.	Examineur
Mme. O. BELMOKHTAR	Maitre de conférence	E.N.P.	Rapporteur
M. B. LAABAS	Maitre de conférence	I.S.E.	Rapporteur
M. M. SARI	Chargé de cours	E.N.P.	Invité
M. A. LARIBI	Représentant de l'E.N.C.C.		Invité

Juin 1995

Remerciements



Si cette page paraît quelque peu banale parce que coutumière à toute thèse, je crois savoir aujourd'hui qu'elle correspond à un véritable besoin.

Et si *Merci*, comme *Bonjour*, me semblent bien souvent être des mots qui ne relèvent plus que de la bienséance, je voudrais que l'écriture ici son acceptation la plus profonde.

Ainsi, en la personne de *Mademoiselle Nacéra ABOUN*, je remercie tous mes enseignants du département Génie-Industriel, au sein duquel j'ai passé les moments les plus agréables de ma carrière universitaire.

Que dire à *Madame Oumhani BELMOKHTAR* ainsi qu'à *Monsieur Belkacem LAABAS* qui ont bien voulu diriger ce travail? *MERCI*. Les orientations et les conseils qu'ils n'ont cessé de me prodiguer, leur constante disponibilité et leur patience sont autant de facteurs qui, j'avouerai, ont merveilleusement propulsé la concrétisation de cette étude? *MERCI*.

Toute ma gratitude à *Messieurs Zahir HADDAD, Mohamed SARI et Abdelaziz OUABDSLEM* pour l'intérêt qu'il ont accordé à mon travail et pour avoir accepté de faire partie du Jury de soutenance.

Je tiens à remercier chaleureusement *Monsieur Mohamed SALAH*, membre de l'"Operational Research Society" dont l'aide et les conseils m'ont été très précieux.

Je tiens à remercier chaleureusement tout le personnel des bibliothèques et centres informatiques de l'Ecole Nationale Polytechnique ainsi que de l'Institut National de la Planification et de la Statistique.

Je ne saurais trop remercier les ouvriers de l'Unité de la Charpente et de la chaudronnerie de Qued-S'mar qui sont restés constamment à l'écoute et dont l'aide fut très précieuse.

Que *Monsieur Samir BELKESSA* sache toute ma reconnaissance pour son aide et son soutien continu face aux problèmes divers qui entravaient la progression de mon travail.

Enfin, que ceux qui, comme *Fadila, Meriem, Djamel, Reda, Djanet, ...* et la liste est longue, par leur présence et leur amitié, m'ont encouragé, en soient ici remerciés.

INTRODUCTION GENERAL.....1

Partie A: Problématique de la gestion de la production
en industrie de la construction métallique

CHAPITRE PREMIER: Cadre conceptuel de la gestion de production..4

Introduction.....4

I.Le système de production.....4

II.Le système de gestion de production.....6

III.Positionnement du problème.....8

Conclusion.....9

CHAPITRE DEUXIEME: Cadre concrèt de la gestion de production
l'Unité Charpente et Chaudronnerie de Oued-S'mar.10

Introduction.....10

I.Spécification du système de production.....10

II.Description du système de production opérationnel.....15

III.Problématique.....18

Conclusion.....19

Partie B: Planification de la production en industrie
de la construction métallique

CHAPITRE PREMIER: Problématique de la planification de la
production en industrie de la construction
métallique.....20

Introduction.....20

I.Planification des stocks via le "Cutting Stock Problem".21

II.Problèmes de découpe en gestion de production.....23

Conclusion.....24

CHAPITRE DEUXIEME: Planification des stocks de barres-Approche
via le problème de découpe unidimensionnelle.....25

Introduction.....25

I.Formulations du problème.....25

II.Approches de résolution du problème.....28

Conclusion.....43

CHAPITRE TROISIEME: Planification des stocks de tôles-Approche

via le problème de découpe bidimensionnelle.....44
 Introduction.....44
 I.Formulation mathématique du problème 2/V/O/R guillotine.44
 II.Approches de résolution du problème 2/V/O/R.....52
 III.Extension aux modèles 2/V/I/R et 2/V/V/R guillotine...73
 Conclusion.....74

CHAPITRE QUATRIEME: Validation des algorithmes heuristiques....75

Introduction.....75
 I.Génération des commandes aléatoires.....76
 II.Algorithmes de planification des stocks de barres.....77
 III.Algorithmes de planification des stocks de tôles.....87
 Conclusion.....94

Partie C: Ordonnement de la production en industrie
 de la construction métallique

CHAPITRE PREMIER: Problématique de l'ordonnement de la
 production en industrie de la construction
 métallique.....95

Introduction.....95
 I.Positionnement typologique.....95
 II.Intérêt de l'homogénéité des stocks d'en-cours.....97
 III.Maitrise des opérations de manutention.....98
 Conclusion.....100

CHAPITRE DEUXIEME: Ordonnement de la production-Approche
 via le "Pattern Allocation problem".....101

Introduction.....101
 I.Approche de résolution du problème.....102
 II.Application.....106
 Conclusion.....109

CHAPITRE TROISIEME: Ordonnement de la production-Approche
 via une procédure intégrée.....110

Introduction.....110
 I.Formulation du problème.....110
 II.Approche de résolution du problème.....112
 Conclusion.....119

CHAPITRE QUATRIEME: Algorithme des "scores" en ordonnancement de la production.....	120
Introduction.....	120
I.Génération des gammes d'assemblage.....	121
II.Application de l'algorithme des "scores".....	121
III.Raffinement des ordonnancements.....	134
IV.Projection de la procédure sur la séquence de MADSEN..	136
Conclusion.....	139
 CONCLUSION GENERALE.....	 140
 BIBLIOGRAPHIE.....	 144
 ANNEXES.....	 150
A.Description du logiciel STORM 2.0	
B.Méthode de la transformation inverse	
C.The Combined Random Numbers Generator	
D.Caractéristiques des commandes générées	
E.Résultats des problèmes tests:	
Planification des stocks de barres	
F.Test U de Mann-Whitney	
G.Test de Wilcoxon	
H.Résultats de l'algorithme de Gilmore et Gomory "adapté"	
I.Le problème du voyageur de commerce	
J.Ordonnancement de la production par	
la minimisation des en-cours	
K.Ordonnancement de la production par	
la minimisation des taux d'en-cours	
L.Ordonnancement de la production par	
la minimisation des ruptures de stock	
Z.Résultats des problèmes tests:	
Planification des stocks de tôles	

INTRODUCTION GENERALE

"Du commencement, on peut arguer la fin"

QUINTILIEU, De l'institutionne oratoria

Les entreprises doivent faire face à deux problèmes majeurs:

.Un environnement fortement concurrentiel,

.Une durée de vie des équipements et des produits de plus en plus courte.

En l'occurrence, ces réalités économiques appellent des impératifs de gestion aussi indispensables que:

.La diminution du "temps de réponse" de l'entreprise,

.L'augmentation de la "réactivité" [DIN-92] du système de production, c'est à dire, sa capacité à réagir rapidement à l'évolution des marchés et des technologies.

Cette réactivité nécessite une modification des processus, une réorganisation des moyens de production (diminution des temps de changement de fabrication, automatisation, ...) et une rénovation des méthodes de gestion (intégration des différentes activités de production, décentralisation des décisions, ...).

Pratiquement, toutes ces transformations se manifesteraient par la gestion de deux flux:

.Le flux de production pour lequel les objectifs sont une diminution des stocks, des en-cours et des temps de transit dans l'atelier,

.Le flux d'informations, à travers le suivi temps réel de la production, le contrôle, ...

La gestion des flux est devenue prépondérante pour obtenir une productivité suffisante.

Or, actuellement, les systèmes de gestion de production n'offrent pas, ou peu, de possibilités pour résoudre correctement et complètement ces problèmes.

L'analyse des outils logiciels de gestion de production met en évidence [TAH-92]:

.Un manque d'adaptativité en fonction de la diversité et des spécificités des entreprises et des utilisateurs; Les "personnalisations" restent "limitées".

.Un faible niveau d'intégration; Peu de systèmes sont structurés autour de bases de données facilitant l'intégration de diverses fonctions de la gestion de production.

Afin de mesurer la portée réelle de toutes ces insuffisances, nous avons centré la présente étude sur un secteur de production particulier: *l'industrie de la construction métallique*.

A cet effet, nous avons structuré ce mémoire en trois parties:

PARTIE A:

Cette partie est consacrée à la problématique.

Après un premier chapitre où nous définirons quelques concepts de la gestion de production, le chapitre suivant passera en revue les principales structures dont sont dotées les entreprises de la construction métallique en Algérie, l'Unité de la Charpente et de la Chaudronnerie (UCC) de Oued S'mar choisie comme prototype.

PARTIE B:

Cette partie portera sur la Planification de la production.

Eu égard aux spécificités de la production dans l'industrie de la construction métallique, le premier chapitre constituera un relai entre la planification des stocks telle que présentée en théorie et le "Cutting stock problem", "boite à outils" disponible en recherche opérationnelle pour planifier les approvisionnements dans des secteurs de production particuliers.

Nous enchaînerons par les chapitres deuxième et troisième où nous tenterons de tirer profit des travaux de recherche consacrés à la résolution des problèmes de découpes unidimensionnelles et bidimensionnelles.

Chacun de ces chapitres portera sur la mise en oeuvre de procédures nouvelles, à même de répondre à des objectifs de gestion fixés au préalable.

Des algorithmes seront développés et validés à travers des problèmes test.

PARTIE C:

Pour intégrer autant de paramètres de gestion que possible, nous nous intéresserons ici à la dynamique du système de production.

Aussitôt que nous aurons positionné le système de production par rapport à la typologie des problèmes d'ordonnancement, une application du "Pattern Allocation Problem" se retrouvera au chapitre deuxième.

Dès lors que le "Pattern Allocation Problem" concerne un paramètre de gestion plutôt "statique" (minimisation de l'effort d'identification des pièces constituant les en-cours), une procédure heuristique sera développée au chapitre troisième comme approche d'intégration de nouveaux objectifs, traduisant plus finement la "dynamique" du système, à savoir:

La minimisation des niveaux des stocks d'en-cours.

La minimisation des niveaux des ruptures des stocks.

Le chapitre quatrième sera une occasion pour tester le comportement de cette procédure sur des produits différents.

Pour clore ce chapitre, des ensembles de solutions seront suggérés, offrant aux décideurs la possibilité de faire des choix appropriés à des conditions de production diverses.

Partie 4

PROBLEMATIQUE

DE

LA GESTION DE LA PRODUCTION

EN

INDUSTRIE DE LA CONSTRUCTION METALLIQUE

*des moyens de transport et de livraison;

*du personnel, caractérisé par divers degrés de compétence, recouvrant différents niveaux organisationnels et hiérarchiques;

*des moyens permettant la saisie et la communication d'informations;

*etc...

Certains auteurs classent ces ressources en trois types:

*Les ressources renouvelables sont des ressources réutilisables telles que les machines, les ouvriers spécialisés, etc...

*Les ressources consommables sont des ressources qui disparaissent au fur et à mesure de leur utilisation (vis, boulons, composants, tôles, profilés, etc...). La consommation cumulée de ces ressources sur un intervalle de temps compris entre deux approvisionnements ne doit pas dépasser la quantité initialement disponible.

*Les ressources doublement limitées sont des ressources qui doivent vérifier simultanément les deux contraintes précédentes: limitation instantanée et limitation de la consommation cumulée (matières énergétiques, pétrole, charbon, électricité, etc...).

Les interactions entre ressources demeurent à l'origine de la grande complexité des processus de fabrication et, par la même, de la diversité des systèmes de production.

Un paramètre déterminant quant à cette diversité est la fonction *ordonnancement des ateliers*. A cet effet, une discussion lui est consacrée dans la phase "ordonnancement de la production".

II. LE SYSTEME DE GESTION DE PRODUCTION:

Le système de gestion de production est destiné à *commander* le système de production. En effet, c'est au système de gestion qu'incombe la détermination des activités devant être effectuées par les ressources du système de production, en se fixant comme objectif l'optimisation d'un ou plusieurs critères.

II.1. Caractéristiques d'un système de gestion:

Conformément à la schématisation de la figure I.1, un système de gestion peut être constitué par:

*Le sous-système d'information qui permet de saisir les informations relatives au système de production (données internes) et à son environnement (données externes).

*Le sous-système de décision qui permet, à partir des informations transmises, de prendre des décisions qui assurent un fonctionnement cohérent du système de production.

Habituellement, les interactions entre le système de gestion, le système de production et son environnement extérieur peuvent être schématisés comme sur la figure.I.

Ainsi, le système de gestion reçoit les demandes-clients et, en fonction de celles-ci, quantifie la production en tenant compte des contraintes des fournisseurs. De leur côté, les fournisseurs alimentent le système de production suivant les décisions du système de gestion. Les matières circulent ensuite dans l'atelier de production entre les ressources et les stocks disponibles. Enfin, les produits finis sont stockés jusqu'à la livraison des clients. Le système de gestion inclut parfois les décisions ayant trait au transport en amont et en aval de la production [DAU-92]. Vue la dynamique du processus de production, les commandes sortant du système de gestion se présentent sous forme d'une suite de "commandes", appelées aussi "contrôles".

Le comportement du système de production est tributaire des commandes sortant du système de gestion de production. Par conséquent, il apparaît clairement que la relation entre le système de gestion et le système de production est une boucle fermée (figure.I), communément appelée-en utilisant le langage des automaticiens- *système asservi* ou *asservissement* [MEI-89].

II.2. Performances d'un système de gestion:

Les décisions assurant la commande et la régulation du système de production doivent permettre d'augmenter la productivité tout en restant cohérentes avec les contraintes techniques, financières et commerciales [LAS-84].

De ce fait, un bon système de gestion se manifeste par sa capacité à réduire le niveau des stocks, à améliorer le service à la

clientèle et à répondre aux différents types d'aléas (pannes, absentéismes, variation de l'activité commerciale, etc...) par un retour d'informations ce, de la manière la plus économique [FAU-86].

Un système de gestion doit concilier des objectifs aussi contradictoires que:

*La réduction des en-cours (ensemble des produits en cours de fabrication et non terminés) et l'utilisation rationnelle des moyens de production;

*Le maintien des stocks de production à un niveau minimum et l'amélioration de la qualité des services auprès des clients;

*etc...

III. Positionnement du problème:

Il est bien connu qu'à l'heure actuelle, le niveau des en-cours dans les ateliers de fabrication est très élevé et pénalise lourdement les entreprises. Aussi sophistiquée soit-elle, toute méthode d'ordonnancement de la fabrication n'aura qu'un impact limité pour résorber significativement ce niveau d'en-cours qui résulte essentiellement de décisions de gestion prises à un niveau tactique (Planification) [LAS-93].

En effet, une des raisons majeures qui expliquent ce niveau d'en-cours est la faiblesse ou manque de cohérence des méthodes de planification qui raisonnent quasiment indépendamment de l'ordonnancement; La plupart des méthodes de planification utilisent des modèles très simplifiés à capacité infinie car, la capacité d'un atelier de fabrication est précisément très difficile à déterminer à ce niveau agrégé.

Il n'est pas étonnant que les plans de fabrication ainsi déterminés soient souvent infaisables et conduisent à des en-cours importants et à des retards de fabrication.

Au départ, l'objectif fût quelque peu ambitieux: Il était question de l'élaboration d'un modèle de planification de la production intégré plutôt *général*, améliorant l'approche initiée par DAUZERE-PERES [DAU-92].

Néanmoins, après une revue de littérature suffisante, nous avons opté pour une appréhension de la problématique sus-citée dans un

secteur de production bien spécifié, à savoir: l'industrie de la construction métallique.

Cette option fût motivée par deux facteurs principaux:

*Un manque d'adaptativité des modèles de gestion de production existants, dans la mesure où les "personnalisations" en fonction des spécifications des entreprises restent limitées [TAH-92].

*Pratiquement, la plupart des recherches menées dans le domaine se bornent aux ateliers de fabrication manufacturière; engager un travail de recherche dans l'industrie de la construction métallique peut être considéré en soit comme pas positif.

Finalement, nous tenons à préciser que, vu de cet angle, notre travail n'est qu'une ébauche qui ouvrirait certainement de nouvelles perspectives pour des travaux futurs.

CONCLUSION:

Engager un travail de recherche en gestion de production est une entreprise dont l'aboutissement reste tributaire du degré de la prospection effectuée en matière conceptuelle. Puisque cette dernière étape est incontournable, nous nous y sommes attardés tout au long du CHAPITRE PREMIER où nous pensons avoir atteint un double objectif:

*Nous sommes parvenus à diluer les quelques amalgames auxquels peuvent être exposés certains concepts et, par la même, à éviter les pièges des confusions sémantiques très fréquents en gestion de la production.

*Nous avons cerné la problématique uniquement par rapport au cadre conceptuel, sans expliciter les spécifications du problème concrèt objet de la présente étude.

A ce stade, et pour mesurer la portée pratique du problème, le *CHAPITRE DEUXIEME* sera réservé exclusivement à la description de l'environnement productif (système de production et système de gestion) propre à l'industrie de la construction métallique, dont l'Unité Charpente et Chaudronnerie (U.C.C.) de Qued-S'mar n'est qu'une illustration.

Chapitre Deuxième

CADRE CONCRET DE LA GESTION DE PRODUCTION

Unité de la Charpente et de la Chaudronnerie de Oued-S'mar

INTRODUCTION:

L'Unité Charpente et Chaudronnerie (U.C.C) de Oued S'mar a été créée en 1947 sous le nom de Société Métallurgique d'El Alia (SOMEL).

Le 17 janvier 1968, la SOMEL fût rattachée à la Société Nationale de Construction Métallique (S.N.Métal). En vertu des décrets 83-49 et 83-53 du 11 janvier 1983, la S.N.Métal fût restructurée, donnant création à l'E.N.C.C.

Optant pour l'U.C.C de Oued-S'mar comme prototype, nous allons prendre connaissance, à travers ce chapitre, des spécificités du processus de production dans l'industrie de la construction métallique. Dans ce sillage, nous commencerons par une description détaillée de la structure du système productif.

De là, nous enchaînerons par une lecture critique du système de gestion de production opérationnel dont un accent sera mis essentiellement sur les aspects gestion contrôlables.

A l'occasion, nous isolerons les quelques aspects que nous pensons prépondérants, lesquels constitueraient le support pratique de notre contribution.

En clôture de ce chapitre, nous envisageons d'effectuer une projection de la problématique présentée au CHAPITRE PREMIER sur le système productif.

I. SPECIFICATION DU SYSTEME DE PRODUCTION:

Généralement, une caractéristique propre au secteur d'activité de la construction métallique est la diversité des actes de travail dans la réalisation du produit [MEB-86].

I.1. Positionnement typologique:

Actuellement, la gamme des produits de l'U.C.C est plutôt variée, constituée principalement de :

-La charpente métallique, dont les ossatures des bâtiments

industriels et administratifs, les hangars de différents types, les tours, les pylônes, etc...

-La chaudronnerie, englobant essentiellement les bacs de stockage de 25 à 50000 m³, les cuves de 10 à 30 m³, les trémis de stockage, les sécheurs à pulpes, les fours à chaux, les transporteurs à vis, etc...

-La serrurerie, orientée surtout vers les escaliers, les sauterelles de 6 à 12 m, ainsi que la menuiserie métallique diverse;

-Les équipements, activité récemment abordée, ayant pour objectif la réalisation des grands projets industriels, comme les briqueteries, les cimenteries, les centrales électriques, etc...

Les produits sont définis sur la base de commandes-clients préalablement spécifiées.

Relativement à la première typologie des systèmes de production [GIA-88], ceci est le cas d'une production à la commande.

D'un autre côté, comme les produits fabriqués sont de très grande taille, la production ne peut en inclure qu'un nombre restreint. Par conséquent, toute l'activité est concentrée sur l'élaboration d'un plan d'ordonnement réalisable des moyens matériels et humains requis pour la réalisation du projet.

Ceci est typique à la production unitaire ce, d'après la deuxième typologie des systèmes de production.

Par la présente dissection, l'appréhension globale du système de production actuel n'est possible qu'à travers les techniques d'ordonnement de projets. Néanmoins, une pareille approche est démunie de tout sens en l'absence d'un système de gestion de production garantissant la faisabilité des plans d'ordonnement locaux.

I.2. Description du processus de production:

Le processus de production se déroule en deux phases:

Première phase: DEBIT

Deuxième phase: ASSEMBLAGE et SOUDURE

I.2.1.Phase "DEBIT":

Le débit consiste en la réalisation des opérations de sciage, perçage et poinçonnage des différents profilés, poutres et cornières, outre le découpage, le pliage ou le cintrage de tôles de dimensions diverses.

Ce sont une chaîne "Boulton" et plusieurs machines spécialisées (environ 21 machines) qui assurent le débitage; Tandis que la chaîne permet la transformation des profilés et des poutres de grandes dimensions, les machines spécialisées intègrent comme objet de travail les petites cornières, platines, goussets,etc...


L'atelier "Débit-usinage" est structuré comme ci-après:

Atelier "Débit tôles fines":

Dans l'atelier "Débit-tôles fines", les cisailles-guillottes, au nombre de cinq (05) constituent les principales machines de découpage.

Bien que présentant des caractéristiques de construction différentes en termes de "largeur" et "épaisseur" de découpe "admissibles", chaque machine est équipée d'une "butée" pour l'equerrage de la pièce brute (tôle ou chute récupérable) et d'une "pédale" permettant d'actionner la "guillotine", organe principal de la machine (partie tranchante).

En plus des machines, la tôle est une ressource indispensable dans le processus de production.

Une tôle est un produit sidérurgique plat, de forme rectangulaire, à surface lisse ou présentant des saillies .

Conformément aux normes universelles, une tôle fine est d'une épaisseur variant de 1 à 20 mm par opposition aux tôles fortes dont les épaisseurs se situent entre 20 et 30 mm.

Les produits réalisées dans l'atelier "Débit-tôles fines" sont des pièces rectangulaires dont les dimensions (longueur, largeur et épaisseur) sont définies par la nomenclature du produit final.

Ces pièces sont obtenues par un découpage type-guillotine. La particularité de ce découpage est qu'il s'opère parallèlement à l'axe de la tôle, ce qui signifie que toute coupe ne peut être réalisée que d'une extrémité à l'autre du rectangle.

Dans le système de gestion actuel, l'opération de découpe dépend entièrement de la seule initiative de l'opérateur; Généralement, ce dernier procède au découpage par séries de pièces de même type en s'efforçant d'utiliser au mieux la matière première accordée par le "Département Gestion des stocks".

Malgré la persévérance de l'opérateur, des bacs remplis de chutes demeurent partie prenante du paysage de l'atelier, à tel point qu'ils ont tendance à être assimilés à des moyens de production indispensables.

Nous reviendrons sur ce détail, de manière plus explicite, dans les paragraphes suivants.

Atelier "Débit tôles fortes":

L'atelier "Débit-tôles fortes" contient 2 oxycoupeurs. L'oxycoupage s'effectue avec des chalumeaux, au nombre de cinq, incorporés dans la machine et disposés perpendiculairement à la tôle à découper. Par conséquent, l'oxycoupeur peut produire, en une seule passe, jusqu'à cinq pièces de même forme géométrique (cercles ou autres figures plus complexes, selon les exigences de la commande).

L'intervention de l'opérateur consiste à déposer, sur la table de lecture de l'oxycoupeur, le dessin reconstituant la forme voulue de la pièce puis régler la machine.

Quoi que l'opération de découpe des pièces soit relativement rapide, elle ne manque pas d'être source d'une masse importante de chutes, cumulées aux environs de l'oxycoupeur.

Toutefois, la récupération de ces chutes reste possible localement ou bien, par l'atelier "Débit tôles fines", sous condition que l'épaisseur de la chute soit compatible avec la machine.

Chaîne "Boulton":

Dans cet atelier, la transformation de la matière première est réalisée par la mise en mouvement des différents postes de la chaîne. La conduite des opérations s'effectue à partir d'un pupitre de commande qui permet à l'opérateur d'engager la procédure de travail. Cette procédure est dominée par la transmission, grâce au pupitre de commande, des informations enregistrées sur le "bon de travail"; Ces informations concernent les opérations de sciage, de perçage ou de poinçonnage des profilés, de longueur standard le plus souvent.

Là aussi, d'importantes quantités de chutes sont engendrées par l'opération de découpe. Ces chutes peuvent être utilisées pour des commandes subséquentes ou rejetées. Le recours à cette dernière alternative est, hélas, le plus fréquent en raison de l'absence d'un système de gestion qui intégrerait ce critère.

Pour qu'une chute quelconque puisse être récupérée sur la chaîne "Boulton", il faut que sa longueur dépasse l'écart séparant deux rouleaux consécutifs du tapis roulant de cette chaîne; Autrement, il serait indispensable de procéder à l'opération de découpe en utilisant l'une des scies circulaires.

Le principe de finition dans l'espace de travail "Débit" consiste à inscrire sur les produits, en peinture blanche ou à la craie, le numéro de la commande, le numéro du plan et le nombre de pièces transformées.

Les produits sont ensuite stockés soit dans des aires de stockage réservées à l'intérieur même de l'atelier (cas des goussets par exemple) soit à proximité des machines.

Apparemment, en l'attente de la phase suivante du processus de production, en l'occurrence l'"assemblage et la soudure", il y a lieu d'entreprendre une réflexion quant à l'opportunité d'élaborer une politique optimale de gestion des stocks "intermédiaires" (produits semi-finis et matières premières), une optimisation qui intégrerait, entre autres, des contraintes propres à la gamme de fabrication du produit fini.

Pour mieux cerner cette réalité du système de gestion sur lequel nous aurons à nous pencher, un traitement adéquat lui sera réservé dans la suite de notre travail.

II.2.2.Phase "ASSEMBLAGE et SOUDURE":

A ce stade, les produits transformés sont des sous-ensembles d'un bâtiment industriel tels que les fermes, les traverses, les poteaux,etc...

Le plan de réalisation du produit est conçu au niveau du "Département Méthodes".

L'ouvrier (assembleur) commence par tracer un gabarit; Le gabarit représente le prototype lui permettant de réaliser le produit de la commande. Ensuite, il devra chercher, lui même, la matière première nécessaire dans l'espace de travail débit où elle se trouve stockée. Pour ceci, il fait appel au pont roulant lorsque les produits à déplacer sont des profilés ou des poutres et aux chariots pour les goussets ou les petites cornières.

Le montage est réalisé par boulonnage ou des points de soudure, selon les indications du plan.

Remarque:

Dans notre étude, le système de production est considéré indépendant de l'acquisition et de la distribution; Les problèmes de la livraison des matières premières et de la demande en produits finis sont supposés résolus par ailleurs.

II. DESCRIPTION DU SYSTEME DE GESTION OPERATIONNEL:

Conformément à la description du système de production présentée plus haut, nous pouvons relever deux aspects de gestion dont l'influence sur l'évolution du système productif est, sans doute, considérable.

Comment s'effectue la planification des besoins matières à l'heure actuelle?

Sur quelles bases sont planifiés les délais de réalisation des divers produits?

Questions qui nous renvoient vers la problématique de l'existence d'outils de gestion personnalisés.

Avant d'y répondre, nous devons définir quelques concepts que nous auront à utiliser plus bas.

II.1. Définitions des critères de classification:

a) Critère dominant:

Un critère de classification d'un ensemble d'objets sera dit dominant s'il correspond à un aspect morphologique dû à la première transformation ayant permis l'obtention de l'objet.

Un critère "dominant" peut être mesurable.

b) Critère auxilliaire:

Un critère de classification sera dit auxilliaire dès qu'il a trait à un état de l'objet atteint ultérieurement à la première transformation. Pour un même critère "dominant", on peut avoir un ou plusieurs critères "auxilliaires".

Un critère "auxilliaire" doit être nécessairement mesurable.

c) Application au cas des produits métalliques:

Pour les produits métalliques, les critères dominants sont les formes obtenues lors du laminage, à savoir:

-Les sections, pour les produits longs (poutres, profilés, etc...), qui sont en forme de U, T, L, H, circulaire, carrée, cylindrique, etc...

-Les épaisseurs, pour les produits plats (tôles).

Par contre, les critères auxiliaires sont les *dimensions standard* des produits laminés: la longueur et la largeur pour les tôles, la longueur uniquement pour les barres d'acier.

II.2. Planification des besoins matières:

La nomenclature du produit mise au point, les techniciens du "Département Méthodes" commencent par rassembler toutes les pièces présentant le même critère dominant.

Cette agrégation permet de *calculer la valeur totale* du critère dominant. Chaque critère est spécifique à un seul type de matière première dont les dimensions sont standards. Une *estimation du nombre d'unités de la matière première* est obtenue "grossièrement" par une simple opération arithmétique:

$$\text{Nombre d'unités} = \left[\frac{\text{Valeur totale du critère auxiliaire}}{\text{Valeur standard du critère auxiliaire}} \right]$$

[x] désigne la partie entière de x.

Dans le cas de l'U.C.C, les concepts de valeur, figurant au numérateur et au dénominateur, dénotent respectivement:

a) Pour les tôles:

-La surface totale des pièces rectangulaires de même épaisseur qui figurent dans la commande.

-La surface de la tôle standard correspondant à cette même épaisseur.

b) Pour les barres:

-La longueur totale des produits longs de même section qu'il faut découper.

-La longueur du profilé standard ayant cette même section.

En fin de la procédure, un "Bon de travail" sera rédigé, mentionnant la quantité de matières premières de chaque type nécessaire à la réalisation de la "commande".

II.3. Estimation des délais de livraison des produits:

Dès le moment où les entreprises de construction métallique produisent à la commande, l'estimation des délais de livraison devient un facteur indispensable pour la négociation des contrats dans un marché concurrentiel.

A l'U.C.C, la stabilité de la gamme des produits fabriqués, ajoutée à une expérience acquise à travers des décennies d'activité, ont fini par banaliser l'opération d'estimation des délais. Aussi, pour estimer la date au plus tard de l'achèvement d'un produit quelconque, habituellement, on procède selon le schéma suivant:

PAS 1: On commence par rechercher, si le même produit a déjà fait l'objet d'une commande antérieure.

.Si ce cas de figure se présente alors, il faut aller au PAS 2.

.Sinon, en cas d'originalité du produit à fabriquer, on doit adopter la démarche du Pas 3.

Pas 2: Il suffit d'affecter au "nouveau" produit les mêmes caractéristiques déjà établies pour l'"ancien" produit, entre autres, la date au plus tard.

Pas 3: On procède à une analyse des similitudes du "nouveau" produit par rapport aux "anciens" produits.

.Si l'analogie entre produits est établie, on revient au Pas 2.

.Sinon, on estime de manière empirique la date au plus tard.

Néanmoins, il n'est pas exclu qu'on recourt à des majorations qui sont d'ailleurs tellement excessives qu'elles deviennent source de

nouvelles anomalies organisationnelles.

En effet, ce genre de pratiques font que des produits finis sont stockés, avant réceptionnement par le client, pour un temps excédant parfois la durée de leur réalisation. Une telle situation tend, souvent, à engendrer des coûts supplémentaires à supporter par l'entreprise en matière de stockage, en plus de ses retombées ergonomiques négatives; l'environnement de travail sera occupé par de grands édifices, limitant la fluidité des flux humains et matériels (surtout les moyens de manutention), d'où une augmentation inévitable des délais des productions en cours.

III.Problématique:

La cohérence entre l'état réel du processus de production et l'état prévisionnel dépend principalement du modèle que l'on utilise au niveau du système de gestion de production.

On comprend que l'état réel sera d'autant plus cohérent avec l'état prévisionnel que le modèle adopté est détaillé et réaliste. En outre, comme le modèle doit permettre de décrire le comportement futur du système et les informations sur le futur sont incertaines, on comprend également que l'incohérence augmente lorsque l'horizon de planification devient important.

Selon toute vraisemblance, le système de gestion de production, actuellement en vigueur, présente des défaillances au niveau de la gestion des stocks, tant des matières premières que des produits semi-finis. Ces défaillances se manifestent, à juste titre, à travers:

*Un volume très important de chutes dont des quantités appréciables pourraient être récupérées. Un tel état du système est une conséquence évidente du mode de "planification des besoins-matières", lequel exclut une contrainte du système de production à ne jamais négliger à savoir, le type-guillotine du découpage (cas des tôles fines), accentué par l'absence d'une politique de gestion des chutes en termes de dimensionnement, codification, classification et stockage;

*Des délais de réalisation des produits finis, dépassant de loin toute prévision, auquel vient se griffer des niveaux d'en-cours difficilement gérables, situation en totale contradiction avec la logique même du fonctionnement de tout système de production.

Cette situation est justifiable par les mêmes facteurs qui sont à l'origine du volume trop important des chutes. A celà, s'ajoute un autre paramètre, inhérent au flux matières: l'ordonnement de la production entre les phases "débit" et "assemblage-soudure" auquel nous avons fait allusion plus haut.

A cet effet, notre réflexion sera axée principalement sur les *outils de gestion* à mettre en oeuvre pour planifier les besoins matières d'une part, et trouver un compromis entre la minimisation des en-cours et la minimisation des délais de livraison des produits finis d'autre part, en recherchant le plus de cohérence entre les états réels et prévisionnels.

CONCLUSION:

Le *CHAPITRE DEUXIEME* a été orienté vers l'élaboration d'une jonction logique entre la problématique issue d'un *cadre conceptuel* développé au *CHAPITRE PREMIER* et un problème dicté par une *situation concrète*. Autrement, la conception méthodologique de notre travail veut que la phase d'*abstraction* soit dépassée par sa projection sur un cas concret.

Les objectifs fixés et les limites du problèmes établies, la problématique semble définitivement cernée.

Ainsi, nous estimons qu'à ce niveau, nous avons conduit notre vision du problème à un tel point de maturation qu'il nous est permis de réfléchir à la démarche à suivre pour répondre aux interrogations révélées par la problématique.

Nous espérons que les chapitres suivants apporteront sinon toute la réponse mais, sans doute, un début.

Partie B

PLANIFICATION DE LA PRODUCTION

EN

INDUSTRIE DE LA CONSTRUCTION METALLIQUE

Chapitre Premier

PROBLEMATIQUE DE LA PLANIFICATION DE LA PRODUCTION DANS

L'INDUSTRIE DE LA CONSTRUCTION METALLIQUE

Une analyse propre à l'U.C.C. de Oued-S'mar

INTRODUCTION:

Les modèles de décision sont une approximation symbolique et sélective de la réalité. Ainsi, ils ne peuvent garantir la production de la meilleure décision, mais ils fourniront des données qui, après analyse, vont aider à la prise de décision.

La construction de ces modèles est basée sur trois étapes:

- 1- L'étude de l'environnement.
- 2- L'identification des variables de décision et de l'objectif.
- 3- La formulation mathématique du modèle.

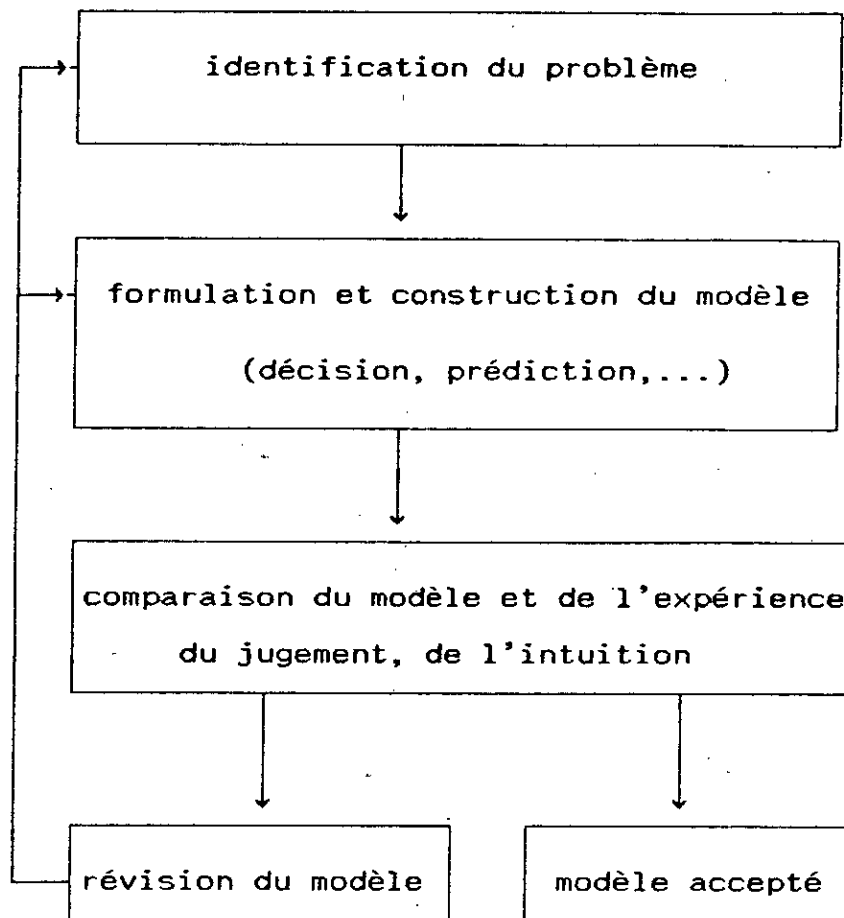
Nous illustrerons ces étapes par le diagramme ci-dessous.

Dans différentes situations, les décisions possibles sont soumises à des restrictions qui, dans le langage de la modélisation, sont appelées contraintes [KHE-94].

Cette approche scientifique, pour la prise de décision, est appelée "Recherche Opérationnelle".

Afin d'appréhender au mieux les possibilités offertes par cet outil dans le contexte de la gestion de production, les sections suivantes porteront exclusivement sur les aspects liés au système de production décrit antérieurement, dont la planification des besoins matières et l'ordonnancement de la production entre les phases "Débit-usinage" et "Assemblage-soudure".

Avant de recourir à des méthodes particulières à même de répondre aux objectifs posés par ces deux aspects, il faudrait définir les problématiques de la recherche opérationnelle correspondant à chaque cas et, de là, les méthodologies d'approche appropriées sont déduites sans trop de difficultés.



I. PLANIFICATION DES STOCKS via le "CUTTING STOCK PROBLEM":

Tout niveau des stocks inapproprié, qu'il soit trop élevé ou trop faible, entraîne une baisse de la rentabilité.

La *planification des stocks* vise, justement, à déterminer la quantité optimale de matières à garder en stock [GAI-83].

Tout système de planification des stocks repose sur deux objectifs de gestion:

- .La planification des matières premières.
- .La planification des en-cours.

I.1. La planification des matières premières:

La planification des matières premières nécessaires pour la

réalisation des échéanciers de production est une activité importante. A cet effet, la *planification des besoins matières* s'applique à en réduire les stocks, en tâchant de mieux faire correspondre les entrées matières aux besoins prévus pour la production. Cependant, il a été prouvé que, même dans les meilleures applications, il est impossible de réaliser une correspondance parfaite entre les entrées et les sorties matières pour éliminer tout stock.

Par ailleurs, il n'existe pas de modèle uniformément applicable au calcul de la quantité de matières à commander. Chaque situation requiert qu'on en analyse les caractéristiques principales en considération du système de production.

Dans la structure organisationnelle propre à l'industrie de la construction métallique, l'une des phases d'*approvisionnement en matières premières* se situe en amont du processus de production, où les tôles et les barres doivent être entreposées en l'attente d'être découpés. L'aire de stockage aménagée à cet effet est appelée "aire de préparation".

La gestion du flux matières entre cette zone et le "stock principal" incombe au *Département gestion des stocks*.

Aussi, si une commande de pièces doit être réalisée, le chef d'atelier "Débit-usinage" formule ses besoins matières directement au Département gestion des stocks. Préalablement à toute passation de commande matières, il y a lieu d'en planifier les besoins.

Pour planifier les besoins matières, il faut répondre à cette question:

Quelles quantités de barres et de tôles doit-on stocker dans l'"aire de préparation" pour que la commande de pièces soit satisfaite ?

I.2. La planification des en-cours:

Il est rare que deux opérations successives aient exactement la même cadence de production, surtout dans un système de production aussi complexe que celui de la construction métallique; C'est ce qui explique les stocks des produits en-cours. Néanmoins, le processus de production décrit en problématique révèle l'existence, en aval des ateliers "Débit-usinage", de deux populations d'en-cours. La *première population* est constituée des pièces usinées (pièces rectangulaires et "morceaux" de barres). Par contre, les individus

de la *deuxième population* sont les chutes produites dont le volume global a été estimé à plus de 20% de la matière première utilisée pour les opérations de découpe.

A cet effet, la planification des en-cours sera axée sur deux problèmes centraux:

Comment minimiser le volume des chutes occasionnées par les opérations de découpe?

Quelle politique de gestion des stocks adopter pour l'optimisation des en-cours en pièces usinées?

I.3. Corrélation Planification des stocks-Problème de découpe

Il est apparent que les procédures de découpage en cours ne favorisent guère l'utilisation rationnelle de la matière première, dès le moment où la complète initiative est laissée à l'opérateur. En l'occurrence, pour ne pas avoir à gérer des stocks de "chutes" trop importants, l'unique alternative scientifique, jusque là explorée, consistera à rechercher la meilleure façon de disposer les pièces à découper sur le "matériau" de base de telle sorte à minimiser le taux des chutes générées. Le schéma selon lequel ces pièces seront ordonnancées est appelé "*modèle de découpes*", dont l'élaboration renvoie vers un problème classique de la recherche opérationnelle: le problème de découpe, souvent identifié par son appellation anglo-saxonne: "Cutting Stock Problem".

Aussi, tenant compte des spécificités techniques de notre système de production, des éléments de réponse aux préoccupations formulées plus haut ne seront donnés qu'à travers un solutionnement du "cutting stock problem".

Et, ce sera en ce point précisément que viendront se rejoindre les deux premiers objectifs de *planification des stocks*.

Quant au dernier problème (planification des en-cours en pièces usinées), celui-ci se trouve conditionné par l'agencement des opérations de découpage.

Cette vision sera complètement développée une fois la phase "ordonnancement de la production" engagée.

II. PROBLEMES DE DECOUPE EN GESTION DE LA PRODUCTION:

Plusieurs entreprises sont confrontées, fréquemment, si ce n'est quotidiennement, à des problèmes de découpe.

Comment, dans un "matériau" de dimensions données, découper un nombre maximal d'éléments homogènes ou hétérogènes de dimensions plus petites?

Comment découper un nombre donné d'éléments de manière à utiliser une quantité minimale de "matériau" de base?

Ces opérations peuvent consister en des découpes réelles dont le "matériau" est alors la tôle, le papier, le verre, le bois, etc... ou encore, en des partages: le volume, l'espace ou le temps constituent alors le "matériau".

CONCLUSION:

Dans notre travail, nous allons limiter l'horizon de notre recherche à deux types précis de problèmes de découpes: les problèmes de découpe unidimensionnelle et bidimensionnelle. S'inspirant de l'état de l'art de SWEENEY et PATERNOSTER [SWE-91], OUKIL [OUK-95] a essayé d'avoir une vue aussi synthétique que globale possible sur le problème de découpe, appréhendé à travers ces deux types particuliers de problèmes.

En utilisant la typologie de DICKHOFF [DIC-90], un problème de découpe unidimensionnelle ($N=1$) où plusieurs pièces de quelques types (R) doivent être découpées (V) sur des matériaux en stock de même dimensions (I) sera désigné par: $1/V/I/R$.

Parallèlement, un problème de découpe bidimensionnelle ($N=2$) sous les mêmes conditions que précédemment est identifié par: $2/V/I/R$.

Lorsque les dimensions des matériaux en stock sont multiples, ces deux problèmes seront identifiés par les modèles $1/V/V/R$ et $2/V/V/R$ respectivement.

A cet effet, nous commencerons par proposer des approches de résolution aux problèmes $1/V/I/R$ et $2/V/I/R$, lesquelles approches seront généralisées aux cas $1/V/V/R$ et $2/V/V/R$ sous certaines hypothèses inhérentes au système de gestion de production.

Chapitre Deuxième

PLANIFICATION DES STOCKS DE BARRES

Approches via le problème de découpe unidimensionnelle

INTRODUCTION:

A la lumière de notre option méthodologique, nous pensons avoir disposé d'une échéance suffisante pour pouvoir amorcer une approche de résolution des problèmes particuliers qui nous préoccupent concrètement.

A prime abord, des formulations mathématiques seront proposées, les recherches antérieures devant servir pour cela de repère.

Dès que nous aurons mené à terme cette phase, nous serons appelés à développer une méthodologie d'approche aussi fidèle qu'il se peut aux objectifs fixés et aux contraintes considérées.

I. FORMULATIONS DU PROBLEME:

Des barres d'acier sont entreposées en stock en attendant d'être découpées en "pièces", de tailles plus petites.

Les commandes sont classées suivant la section (critère dominant) demandée: le carnet de commande donne, pour chaque section, la liste des longueurs l_i à découper et le nombre n_i de pièces demandées pour chaque longueur. Le registre du stock disponible fournit la liste des longueurs normalisées (standard) des barres sur lesquelles ces pièces pourront être découpées.

Il s'agira, chaque jour, de déterminer un programme de découpe satisfaisant les commandes.

En général, sur chaque barre, la découpe effectuée laisse un morceau trop petit pour être réutilisé et sera considéré, par conséquent, comme une "chute".

Pour minimiser la longueur totale des chutes générées par une commande donnée, nous allons présenter une formulation mathématique en un PLNE pour le problème de type $1/V/I/R$, dont une extension sera faite au cas $1/V/V/R$.

I.1. FORMULATION MATHÉMATIQUE DU PROBLÈME 1/V/I/R:

Le problème de découpe unidimensionnelle peut être identifié par le modèle 1/V/I/R dans deux situations différentes:

-Lorsque chaque critère dominant correspond à une seule longueur de barre (par exemple, la section carrée n'existe qu'en des barres de longueur L). Et, sachant qu'une commande regroupe exclusivement des pièces répondant au même critère dominant, le problème à résoudre portera sur un seul type de barres et le modèle associé sera 1/V/I/R (Typologie de DICKHOFF [DIC-90]).

-Lorsqu'un même critère dominant est disponible pour plusieurs longueurs différentes mais nous décidons de traiter le problème pour chaque longueur séparément; une démarche très efficace avant acquisition des barres auprès des fournisseurs.

Précisions d'ordre terminologique:

Dans ce travail, nous désignerons par "commande" l'ensemble constitué des pièces de différents types (critère dominant uniforme), alors que le terme "demande" sera utilisé pour identifier les groupes de pièces répondant au même critère auxiliaire (longueur l_i).

Pour l'élaboration du $j^{\text{ème}}$ modèle de découpe, le problème, formulé en un PLNE, est exprimé comme suit:

(PLNE1)

$$\text{Minimiser } Z = L - \sum_{i=1}^n l_i x_{ij}$$

$$\text{Sujet à: } \sum_{i=1}^n l_i x_{ij} \leq L \quad (1)$$

$$x_{ij} \leq N_{ij} \quad (2) \quad (i=1, \dots, n)$$

$$x_{ij} \text{ sont des entiers positifs} \quad (i=1, \dots, n)$$

Notations:

Pour "n" types différents de pièces, et "m" modèles de découpes élaborés jusqu'à satisfaction de toute la commande,

La variable de décision est x_{ij} , correspondant au nombre de pièces de type i contenues dans le modèle j.

l_i est la longueur de la pièce de type i.

N_{ij} est le nombre de pièces de longueur l_i disponibles lors de l'élaboration du jème modèle.

L est la longueur de la barre à découper.

où: $i=1, \dots, n$ et $j=1, \dots, m$

Fonction objectif:

Bien que l'objectif principal est la minimisation de la longueur totale des chutes, la formulation présentée ne concernera qu'une seule barre pour un modèle j à déterminer.

Le PLNE formulé sera destiné à la minimisation de la chute générée sur une seule barre, et toute résolution ne fournira qu'un seul modèle de découpes à la fois. De là, le modèle 1/V/I/R se transforme en une série de modèles 1/V/O/R distincts.

Ce choix est intimement lié à la méthodologie d'approche qui sera développée avec plus d'arguments dans les sections ultérieures.

Contraintes du problème:

Les groupes de contraintes (1) et (2) décrivent respectivement les contraintes de la première et de la deuxième catégorie.

La deuxième catégorie de contraintes concerne uniquement la fraction de la demande non satisfaite qui peut être contenue par la longueur de la barre.

I.2. EXTENSION AU PROBLEME 1/V/V/R:

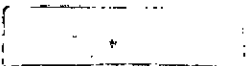
Si la commande doit être découpée sur des barres de longueurs différentes, le (PLNE1) devra être adapté.

Pour l'élaboration du j^{ème} modèle de découpes, utilisant la barre de longueur L_k , il faut résoudre le (PLNE2).

Les notations sont restées inchangées, à l'indice "k" près, qui désigne le type de barre concerné par la formulation.

Si l'on dispose en stock de R longueurs de barres différentes, alors $k=1, \dots, R$.

(PLNE2)

<p>Minimiser $Z = L_k - \sum_{i=1}^n l_i x_{ijk}$</p> <p>Sujet à: $\sum_{i=1}^n l_i x_{ijk} \leq L_k \quad (1)$</p> <p style="text-align: center;">$x_{ijk} \leq N_{ijk} \quad (2) \quad (i=1, \dots, n)$</p> <p style="text-align: center;">x_{ijk} sont des entiers positifs $(i=1, \dots, n)$</p>	
---	---

II. APPROCHES DE RESOLUTION DU PROBLEME:

La plupart des méthodes utilisées dans l'industrie pour résoudre les problèmes de découpe sont des méthodes heuristiques [COS-82]. Ces approches sont les seules adaptées à toute circonstance de résolution de ces types de problèmes [HAE-91].

Trois raisons en sont à l'origine:

1. Les solutions optimales des problèmes de découpe formulés en des PLNE ne peuvent être trouvées que pour des commandes de petite taille.

Etant donnée la taille des problèmes réels à résoudre, il serait coûteux (temps machine) sinon impossible, d'obtenir la meilleure solution [HAE-91].

2. La précision des divers coûts (matières premières, stockage, manutention, etc...) est insuffisante pour affirmer l'existence d'une meilleure solution [COS-82].

3. Les solutions obtenues par ces méthodes sont, le plus souvent, jugées satisfaisantes par les responsables des entreprises [COS-82].

Deux types d'heuristiques ont été largement utilisées pour la résolution des problèmes de découpe:

La première approche consiste à générer des modèles de découpes qui satisfont séquentiellement une partie de la commande. Cette procédure heuristique séquentielle (PHS) s'arrête dès que toute la commande est satisfaite [HAE-91].

La deuxième approche combine à la fois la résolution d'une PHS et celle d'un PL, utilisées conjointement pour la recherche de la meilleure solution possible à un problème de découpe: ce sont les procédures de résolution hybrides (PRH).

L'avantage d'une telle approche réside dans le fait qu'elle permet d'intégrer la capacité de la PHS à tenir compte de certains paramètres comme par exemple, le nombre de changements de modèles de découpes, et la capacité du programme linéaire à minimiser les chutes.

De quelconque nature sera la méthode choisie, la qualité de la solution qui sera obtenue pour le problème 1/V/I/R est complètement dépendante des modèles de découpes élaborés donc, de la procédure d'approche des problèmes 1/V/O/R successifs.

Partant de ce constat, les approches de résolution que nous exposerons se déroulent en deux phases:

.D'abord, la construction d'un algorithme à même de résoudre le problème 1/V/O/R.

.Ensuite, la recherche d'une stratégie d'exploitation "judicieuse" des résultats procurés par cet algorithme.

II.1.Approches du problème 1/V/O/R:

Il existe deux façons de présenter un algorithme: d'une manière assez "littéraire" ou d'une manière très proche de la mise en oeuvre informatique [GON-85]. Généralement, l'exposé "littéraire" est beaucoup plus clair pour la compréhension de l'algorithme.

En raison de l'intérêt complémentaire de ces deux descriptions, nous adopterons cette même logique pour décrire les algorithmes que nous avons élaborés.

II.1.1.Algorithme de la PHS à "Chute minimale":

Etant donnée une commande de "n" types de pièces, chaque type est caractérisé par une longueur l_i et une demande n_i , le problème consiste à découper cette commande sur des barres de longueur

standard L en minimisant la longueur totale des chutes produites.

PAS 1 Calcul de la capacité relative de la barre:

A ce stade, nous déterminerons, pour chaque type de pièces, le nombre maximale N_{ij} que l'on peut disposer sur la longueur L, en tenant compte de la demande correspondante.

$$N_{ij} = \begin{cases} \left[\frac{L}{l_i} \right] & \text{si } \left[\frac{L}{l_i} \right] \leq n_{ij} \\ n_{ij} & \text{sinon} \end{cases} \quad \begin{matrix} (i=1, \dots, n) \\ (i=1, \dots, n) \end{matrix}$$

$\left[\frac{L}{l_i} \right]$ désigne la division entière de L sur l_i .

et n_{ij} désigne le nombre de pièces de type i qui restent à utiliser pour l'élaboration du modèle de découpes j.

PAS 2 Calcul de la chute minimum:

Le critère de choix entre différents types de pièces à être découpées repose sur le critère de la chute minimale. Il faut d'abord calculer la chute générée par type de pièces,

$$CH_i = L - N_{ij} l_i \quad (i=1, \dots, n)$$

ensuite, déduire la chute minimale

$$CH_{\min} = \min (CH_i)$$

CH_{\min} est une chute minimale relativement au type de pièces.

Tant qu'une chute est qualifiée de relative, sa récupération reste toujours possible pour une utilisation future.

PAS 3 Choix du type de pièces à découper:

Après calcul de la chute minimale, deux cas peuvent se présenter:

Premier cas: La chute minimale est unique

Second cas : La chute minimale est multiple

Le second cas, contrairement au premier, est un obstacle quant au choix du type de pièces (nous ne pouvons choisir qu'un seul type de pièces à la fois).

Pour le franchir, nous introduisons un critère de performance secondaire, lié directement à la dynamique globale du processus.

En cas de multiplicité de la chute minimale, nous choisirons le type de pièces dont la demande sera satisfaite le plus tôt.

Nous allons procéder comme suit:

1. Commençons par identifier l'ensemble K des indices des types de pièces dont la chute est minimale.

Soit $K = \{ k, k=1, \dots, n: CH_k = CH_{\min} \}$

2. Déterminons l'écart E_k entre la demande qui doit être satisfaite (relativement à la commande) et celle qui pourrait être satisfaite (relativement à la barre).

$$E_k = n_{kj} - N_{kj} \text{ pour } k \in K$$

3. Plus faible est la valeur de E_k , plus proche est la satisfaction de la demande de type k . Là, nous opterons définitivement pour le découpage des pièces de type r tel que:

$$E_r = \min_k (E_k)$$

4. Si jamais nous nous trouvons confrontés une seconde fois à un problème de multiplicité de l'écart minimum, le choix entre les pièces de type r est alors effectué aléatoirement.

PAS 4 Actualisation de la commande:

Soit s l'indice du type de pièces choisi.

Actualiser la commande revient à réajuster la demande en pièces de type s .

$$n_{sj} \rightarrow E_s$$

PAS 5 Classement des pièces:

Il s'agira de classer les pièces de la commande non encore entièrement satisfaites par ordre croissant de leurs longueurs.

Nous aurons donc, pour tout $i, 1 \leq i < i+1$.

PAS 6 Test de la possibilité de récupération de la chute:

Parmi toutes les demandes non encore satisfaites, nous vérifierons si des pièces peuvent être découpées sur la chute. Pour cela, il suffit de vérifier

.Si $l_1 \leq CH_{\min}$ (1, indice de la pièce non encore satisfaite de longueur minimale) alors, CH_{\min} est récupérable.

Aussi, il faut:

ajuster la longueur de la barre

$$L \rightarrow CH_{\min}$$

ensuite, reprendre la procédure depuis le début avec la nouvelle longueur de barre.

.Sinon, CH_{\min} devient une chute absolue (elle n'est plus récupérable sur la commande en cours).

La procédure d'élaboration du modèle j est achevée.

II.1.2. Algorithme de la PHS à "niveau de chutes tolérable":

Pour établir un compromis entre la récupération des chutes et leur rejet éventuel, STAINTON [STA-77] a introduit comme nouveau paramètre de performance le "niveau de chutes tolérable", défini au chapitre deuxième.

Contrairement à STAINTON, nous avons préconisé l'appréhension de ce paramètre relativement à chacun des modèles élaborés, plutôt qu'à toute la commande.

Favorable à l'aspect pratique procuré par ce paramètre, la PHS à "Niveau de chutes tolérable" opère conformément à l'ordre ci-dessus:

PAS 1 Détermination du niveau de chutes tolérable:

D'un point de vue pratique, la longueur de la pièce découpée de plus faible dimension, toutes commandes confondues, conviendrait le mieux comme "Niveau de Chutes Tolérable" (NCT).

Ceci permettra, surtout, d'éviter la production de chutes qui ne pourraient être récupérées sur aucune commande.

Soit δ cette longueur, dont la valeur sera fixée à 0 pour notre application.

PAS 2 Calcul de la chute minimale :

Pour cette phase, il s'agira de se conformer à la procédure décrite aux PAS 1 et 2 de l'algorithme de la "chute minimale".

PAS 3 Choix du type de pièces à découper:

Soit CH_{\min} la chute minimale déterminée au PAS 2.

Cette fois-ci, deux situations sont possibles:

Première situation: La chute minimale est inférieure au "niveau de chutes tolérable".

Seconde situation: Le "niveau de chutes tolérable" se trouve au deçà de la longueur de la chute minimale.

Dans la première situation, il faudra revenir à l'algorithme de la "chute minimale" à compter du PAS 3.

Par contre, la seconde situation va créer un problème qui portera fondamentalement sur la recherche du type de pièces qui devra répondre au critère "niveau de chutes tolérable".

PAS 4 Recherche de la chute correspondant au "NCT":

Désignons par C_1 l'ensemble des chutes calculées au PAS 2.

$$C_1 = \{ CH_i, i=1, \dots, n \}$$

Désormais, nous convenons que, pour une même commande, il est possible de construire plusieurs échelons de chutes.

C_1 décrit le premier échelon de chutes.

Pas 4.1. Construction de la matrice des chutes du second échelon:

Pour tout élément CH_k de C_1 , nous calculerons les chutes générées si nous utilisons CH_k en tant que nouvelle barre.

Le principe restant le même qu'au PAS 1, pour l'élaboration du modèle j , la capacité relative de la chute CH_k , saturée en pièces

de type i , sera:

$$N_{ijk} = \begin{cases} \left\lceil \frac{CH_k}{l_i} \right\rceil & \text{si } \left\lceil \frac{CH_k}{l_i} \right\rceil \leq n_{ij} & (i=1, \dots, n) \\ n_{ij} & \text{sinon} & (i=1, \dots, n) \end{cases}$$

avec $i \neq k$ et $1 \leq CH_k$,

$\left[\frac{CH_k}{l_i} \right]$ désigne la division entière de CH_k sur l_i .

Le calcul des chutes du second échelon s'effectuera par:

$$CH_{ik} = CH_k - N_{ijk} \times l_i \text{ pour tout } i \neq k.$$

La matrice des chutes du second échelon aura la structure C2:

$$C2 = \begin{bmatrix} . & CH_{21} & CH_{31} & CH_{41} & \dots & CH_{n1} \\ CH_{12} & . & CH_{32} & CH_{42} & \dots & CH_{n2} \\ \dots & & & & & \\ CH_{1n} & CH_{2n} & CH_{3n} & CH_{4n} & \dots & \dots \end{bmatrix}$$

Pas 4.2. Choix du type de pièces à découper:

Le choix du type de pièces à découper n'ayant pas été possible dans l'ensemble C1, faute d'avoir vérifié le critère "niveau de chutes tolérable", les éléments de la matrice C2 serviront de nouvelle assise pour tenter d'effectuer ce choix.

Soit $CH_{rs} = \min (CH_{ik})$ la longueur minimale des chutes de C2.

.Si $CH_{rs} \leq \delta$ alors, le modèle j sera constitué de N_{rj} pièces de type r et N_{rsj} pièces de type s. La récursion entre les deux échelons s'établissant à travers l'indice s.

.Si $CH_{rs} > \delta$ alors, engager un autre échelon en considérant les chutes CH_{ik} comme nouvelles barres, pour $i \neq s$ et $i \neq r$.

Reprendre l'algorithme à partir du Pas 4.1.

Notons, tout de même, qu'à chaque nouvel échelon, la matrice des chutes voit chacune de ses lignes diminuée d'une composante.

Cette observation faite, si la commande est constituée de "n" types de pièces alors, le nombre d'échelons possibles "Ne" ne peut jamais excéder "n-1" : $Ne \leq n-1$, laquelle inégalité servira de critère de limitation de la recherche.

Si $N_e = n-1$ et $\min_{(n-1)\text{-uple}} (CH_{(n-1)\text{-uple}}) > \delta$ alors, aucune chute,

quelqu'en soit l'échelon, ne répond au critère "niveau de chutes tolérable".

Dans pareil cas, il faut se satisfaire de $\min_{(n-1)\text{-uple}} (CH_{(n-1)\text{-uple}})$.

Remarques:

1. La structure du modèle de découpes j est d'autant plus hétérogène que le nombre d'échelons nécessités par son élaboration est important.

2. Intuitivement, la situation de non satisfaction du critère "niveau de chutes tolérable" se produirait lors de l'élaboration des derniers modèles de découpes, la taille de la commande étant plus réduite. Par ailleurs, si la commande traitée est de taille suffisamment grande et les pièces découpées sont de dimensions moyennes, ce cas serait très rare.

La dernière remarque ne peut être confirmée que par une étude plus fine, intégrant les multiples cas possibles. Chose que nous n'aurons pas à effectuer.

PAS 5 Actualisation de la commande:

Contrairement à l'algorithme de la "chute minimale", l'ajustement de la commande ne va plus concerner un seul type de pièces mais plusieurs, puisque chaque échelon correspond à un type particulier.

II.2. Approche du problème 1/V/I/R:

Dans cette approche, les objectifs principalement visés sont:

- La minimisation de la longueur totale de la chute générée
- La minimisation du nombre de changements de modèles de découpes

Aussi, au cours du processus d'élaboration des modèles de découpes, nous insisterons sur l'intégration de ces deux objectifs.

II.2.1. Intérêt pratique du nombre de changements de modèles:

Le dernier objectif, largement discuté par les chercheurs, revêt un intérêt particulier sur le plan pratique.

La chaîne "Boulton", outil de découpage des barres, est conçue de telle sorte que, pour un seul réglage, plusieurs barres peuvent être découpées selon le même modèle de découpe. A cet effet, plus le nombre de modèles de découpe est élevé, plus nombreux sont les arrêts pour réglage et, conséquemment, la durée totale du processus de découpage se verra allongée.

Essayons d'en faire une démonstration quelque peu grossière.

Pour cela, adoptons les notations suivantes:

"R" est le nombre total de modèles de découpe *différents* à découper.

m_j est le nombre de barres à découper selon le modèle j, ($j=1, \dots, R$).

t_r est le temps de réglage de la machine (nous le supposons équivalent pour tous les modèles de découpe).

t_j est la durée de l'opération de découpage proprement dite du modèle j ($j=1, \dots, R$).

t_m est le temps de manutention d'une quantité donnée de barres (quelque soit la charge transportée, ce temps est pratiquement le même).

En raison des dimensions relativement grandes des objets transportés, ajoutée aux temps d'attente prérequis pour disposer du moyen de manutention adéquat, MEBTOUL [MEB-86] signale que, dans le secteur de la construction métallique, les opérations de manutention consomment la plus grande part de la durée totale du processus de production.

Le processus de découpage nécessitera un temps t tel que:

$$t = R(t_r + t_m) + \sum_{j=1}^R m_j t_j \quad (1)$$

Si l'on suppose que tous les modèles de découpe contiennent le même nombre de pièces et qu'ils soient disponibles en un même nombre, c'est à dire $t_j = t$ et $m_j = m$ pour tout $j=1, \dots, m$;

alors, l'expression (1) devient:

$$t = R_x(t_r + t_m + m t) \quad (2)$$

De l'équation (2), nous déduisons que, plus grande est la valeur de R, plus longtemps durera le processus de découpage. Ce qui confirme la pertinence du critère *minimisation du nombre de changements de modèles de découpes*.

Toutefois, cet aspect du problème risque d'avoir des incidences probablement négatives sur la phase "assemblage-soudure" si les gammes d'assemblage sont rigides à tel point que l'ordre de succession des pièces se trouve trop déphasé par rapport aux modèles de découpes générés.

Ce point sera amplement développé dans la phase ordonnancement de la production.

Remarque:

L'hypothèse établie pour le passage de (1) à (2) pourrait être toujours plausible si les longueurs l_i sont très faiblement dispersées par rapport à la longueur moyenne.

Cette proposition peut faire l'objet d'une discussion plus approfondie dans des travaux futurs.

II.2.2. Procédure heuristique séquentielle à deux objectifs:

Cette procédure se déroule en trois étapes:

Première étape: Elaboration d'un seul modèle de découpes par l'algorithme de la PHS à "chute minimale" ou bien, à "niveau de chutes tolérable".

Seconde étape: Reproduction du modèle généré autant de fois que le permet la composition actuelle de la commande.

Troisième étape: Réajustement de la commande.

Tant que la commande n'est pas entièrement satisfaite, reprendre tout le processus.

Chaque itération de ce processus correspondra à une occurrence d'un modèle de découpes.

Remarques:

1. Le nombre de fois que ce processus est réitéré dépend principalement de deux paramètres:

a. La composition de la commande actuelle, en termes de nombre de pièces de chaque type disponibles au moment où le modèle de découpe doit être réitéré.

b. La structure de la combinaison de pièces fournie par le modèle de découpes.

2. Chaque occurrence de modèle de découpes correspondra au déroulement complet de l'algorithme pour un modèle j trouvé.

3. Le nombre d'occurrences d'un modèle de découpes correspond pratiquement au nombre de changements du modèle à travers toute la commande.

Nous aurons autant d'occurrences que de modèles de découpes, à un modèle près, lequel décrira la commande *résiduelle* (toutes les pièces encore à découper et qui peuvent être introduites en totalité dans une seule barre).

L'algorithme de la PHS s'enchaînera selon les phases suivants:

PAS 0 Données pour l'élaboration du premier modèle de découpes:

$$j=1, n_{ij} \rightarrow n_i$$

PAS 1 Elaboration du jème modèle de découpes:

Pour obtenir un modèle de découpes "individuelle", nous déroulerons l'algorithme du modèle 1/V/O/R pour une barre entière.

La solution obtenue est: $x_j = (x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{nj})$ pour laquelle la chute définitive est CH_j .

x_j décrit la combinaison obtenue sur le jème modèle.

PAS 2 Calcul du nombre maximal de répliques:

Pour le modèle j élaboré précédemment, nous calculerons le nombre de répliques autorisées par chaque type de pièces i figurant dans le jème modèle.

$$R_{ij} = \left[\frac{n_{ij}}{x_{ij}} \right] \quad (i=1, \dots, n)$$

PAS 3 Recherche de la PPCR:

PPCR est l'abréviation de "Plus Petite Commune Réplique" qui sera définie comme étant le nombre commun de répliques autorisées par toutes les pièces du modèle de découpes j .

$$PPCR_j = \min_i (R_{ij})$$

La PPCR peut être tronquée lorsque se présente une contrainte machine du type: *nombre maximale de barres* pouvant être disposées sur le tapis roulant (Nbmax). Comment?

Soit L_r et L_b les largeurs respectives du tapis roulant et de la barre (L_b varie d'une section de barre à une autre).

$$Nbmax = \left[\frac{L_r}{L_b} \right]$$

Pour respecter cette nouvelle contrainte, un test peut être effectué préalablement à l'actualisation de la commande:

$$\begin{aligned} \text{Si } PPCR_j > Nbmax & \text{ alors } PPCR_j \rightarrow Nbmax \\ \text{Sinon, } & PPCR_j \rightarrow PPCR_j \end{aligned}$$

Toutefois, ce test peut être techniquement contourné pour des barres qui s'appêtent à des imbriquements (les cornières, par exemple) ou à des empilements (barres à bases planes), sous condition qu'il y ait adaptation des caractéristiques de l'outil de découpage (disque).

Pour décider de la pertinence d'une telle action, une étude plus poussée devrait être menée.

PAS 4 Actualisation de la commande:

$$n_{ij} + n_{ij} - PPCR_j \times x_{ij} \quad (i=1, \dots, n)$$

PAS 5 Test du niveau de satisfaction de la commande:

Si la $j^{\text{ème}}$ barre ne suffit pas pour que la commande soit satisfaite alors, prendre une $(j+1)^{\text{ème}}$ barre et réitérer le processus depuis le début.

Cet algorithme est déroulé jusqu'à satisfaction de toute la commande.

II.2.3. Approche par une procédure de résolution hybride:

De part son principe, cette procédure est similaire à la PHS sauf différence au niveau de la première étape: là, le modèle de découpes est obtenu non plus par les PHS à "chute minimale" ou à "niveau de chutes tolérable", mais en résolvant le PLNE formulé pour le problème.

Contrairement à la PHS à deux objectifs, ici, dès lors qu'il s'agit de la résolution d'un PLNE, le recours à un logiciel impose une phase de préparation des données avant de lancer la procédure.

Algorithme de la procédure:

PAS 0 Calcul de la capacité relative de la barre:

(même que le Pas 1 de la PHS à un seul objectif)

Ce Pas traduit, pour le PLNE, la particularité signalée pour le second membre du deuxième groupe de contraintes.

PAS 1 Résolution du PLNE associé aux valeurs calculées:

Pour obtenir la solution optimale x_j^* du PLNE, nous utiliserons le logiciel STORM. Son OUTPUT sera:

$$x_j^* = (x_{1j}^*, x_{2j}^*, \dots, x_{n_j}^*)$$

PAS 2 Utilisation de l'OUTPUT du PLNE:

Une fois x_j^* connue, nous l'introduisons dans le programme de la PHS à deux objectifs, lequel sera déroulé du Pas 2 au Pas 4 pour le seul modèle j.

L'OUTPUT de la PHS sera le nombre n_{ij} de pièces de chaque type restant à satisfaire.

PAS 3 Test de lancement de la prochaine occurrence:

Si la commande n'est pas satisfaite (n_{ij} non nul pour au moins un type de pièces) alors, reprendre cet algorithme.

Après chaque occurrence de modèle de découpes, si la demande en pièces de type i est satisfaite, alors la structure du PLNE sera modifiée en éliminant la colonne et la ligne correspondante.

Remarques:

1. Bien que les résultats de la PRH sont sensés être meilleurs que ceux de la PHS à deux objectifs du point de vue de la valeur de la solution obtenue (longueur totale de la chute générée), il n'en demeure pas moins que la préparation et la saisie des données sont autant de tâches qui détériorent considérablement l'efficacité de la PRH puisque nécessitant un temps important.

2. Le risque encouru en utilisant la PRH est d'avoir les modèles de découpes initiaux constitués majoritairement de pièces disponibles en quantités très faibles dans la commande; situation qui implique un rétrécissement du PPCR et, par là, la convergence de l'algorithme sera très lente.

3. Lorsque toute la commande a été satisfaite, la longueur totale des chutes générées sera:

$$CH = CH_{m+1} + \sum_{j=1}^m PPCR_j \times CH_j$$

où CH_{m+1} est la chute générée par la commande résiduelle.

Généralement, CH_{m+1} n'est pas comptabilisée puisque, le plus souvent, elle est de longueur suffisante pour une utilisation subséquente.

4. Outre les deux objectifs mentionnés plus haut (*minimisation de la longueur totale de la chute et réduction du nombre de changements de modèles*), les deux algorithmes permettent de réaliser la plus grande concentration des chutes sur les derniers modèles générés (objectif cité par SINUANY-STERN et WEINER [SIN-94]). Pourquoi?

Les meilleures chutes minimales sont fournis par les premiers modèles et, tout en progressant, la taille de la commande se réduit et le nombre de combinaisons possibles suit, pour donner un modèle de découpe plus mauvais que son prédécesseur.

En termes d'optimisation de l'utilisation des barres, cet objectif est particulièrement important puisqu'il permet d'obtenir, en fin de commande, une chute utile pour une commande future.

Un autre objectif a été considéré implicitement: il s'agit de la *minimisation du nombre de barres utilisées*.

Ce point sera discuté lorsque nous engagerons notre "application".

II.3.Extension au problème 1/V/V/R:

Pour étendre les procédures précédentes au cas d'un problème 1/V/V/R, nous avons deux alternatives:

PREMIERE ALTERNATIVE: Garder un stock de barres homogène

Dans ce cas, il s'agira de résoudre, pour une commande de pièces donnée, le problème 1/V/I/R entièrement pour chaque longueur L_k de la barre. Moyennant la longueur totale de la chute obtenue pour chaque type de barres, le gestionnaire opte pour un seul type de barres: celui qui réalise le minimum de chutes.

SECONDE ALTERNATIVE: Garder un stock de barres hétérogène

Lorsqu'on décide d'appréhender les longueurs de barres par rapport aux longueurs des chutes partielles, les algorithmes développés précédemment seront adaptés comme suit:

Etape.1. Pour chaque longueur de barres L_k , résoudre un problème 1/V/O/R dont l'objectif est la minimisation de la chute et repérer la chute minimale correspondante CH_k . Cette chute sera dite partielle par opposition à la chute globale qui, elle, concerne toute la commande.

Etape.2. Une fois l'ensemble des chutes minimales déterminé, choisir la longueur de barre de chute minimale.
En cas de multiplicité de la chute minimale, opter définitivement pour la longueur de barre de capacité maximale (la barre composée du plus grand nombre de pièces).

Etape.3. Reprendre la longueur de barre, ainsi sélectionnée, autant de fois que le permet la commande (en d'autres termes, ceci revient à rechercher la PPCR relative au modèle de la barre).

Etape.4. Réajuster la commande et reprendre le processus à partir de l'étape.1. pour choisir une autre longueur de barres.
Les longueurs sélectionnées après chaque occurrence ne sont pas nécessairement les mêmes (d'où l'hétérogénéité du stock à constituer).

Remarque:

Cette dernière alternative peut être très avantageuse si les délais de réalisation de la commande sont suffisamment allongés pour que le lancement de la commande en barres auprès des fournisseurs soit effectué à temps. Cas qui est malheureusement très rare dans une industrie où plus de 75% des matières premières sont des produits d'importation [MEB-86].

CONCLUSION:

Au *Chapitre Deuxième*, nous avons parcouru un large éventail d'algorithmes heuristiques, sensés répondre aux diverses préoccupations qui se sont posées au départ. Malgré maintes "suppositions" émises au sujet de chacun des algorithmes, toute confirmation se trouve désormais conditionnée par la phase de "validation des algorithmes". Au *Chapitre quatrième*, nous engagerons une réflexion aussi objective que possible dans ce sens.

Chapitre Troisième

PLANIFICATION DES STOCKS DE TOLES

Approches via le problème de découpe bidimensionnelle

INTRODUCTION:

Tel que mentionné aux sections antérieures, la résolution des problèmes industriels et économiques complexes passe impérativement par deux phases:

Première phase: La modélisation du problème, qui n'est autre que la traduction sous forme mathématique des objectifs et des contraintes du système.

Seconde phase: La recherche de solutions réalisables par des techniques adéquates.

Le chapitre en cours portera sur la planification des besoins en tôles dans une entreprise de la construction métallique.

Le cheminement logique demeurant inchangé, des formulations mathématiques seront discutées pour diverses variantes du problème 2/V/O/R avant que soient proposées des approches pour leur résolution.

Par la suite, des extensions seront faites pour les cas des problèmes 2/V/I/R et 2/V/V/R.

Les formulations mathématiques que nous développerons sont limitées aux modèles à 2-étapes dont les commandes sont spécifiées en nombres de pièces de chaque type.

I. FORMULATIONS MATHÉMATIQUES DU PROBLÈME 2/V/O/R GUILLOTINE:

Pour la formulation du problème, nous avons procédé à:

- * Une distinction des aspects significatifs et secondaires du problème.

- * Une identification des propositions et des hypothèses qui peuvent être faites.

- * Un choix de la forme définitive du modèle.

I.1. Données du problème et objectifs:

Soit une tôle A_0 , de longueur L_0 et de largeur W_0 , sur laquelle devraient être découpées des pièces de types différents en des quantités spécifiées dans un bon de commande.

Chaque pièce de type i est un rectangle identifié par:

Une longueur l_i et une largeur w_i $(i=1, \dots, n)$.

Une surface $S_i = l_i \times w_i$ $(i=1, \dots, n)$.

Une demande b_i correspondant au nombre maximal de pièces de type i qui figurent sur le bon de commande. $(i=1, \dots, n)$.

Le problème qui se pose est:

Quel est le meilleur agencement de ces pièces sur une tôle A_0 , astreinte à un découpage type guillotine?

Autrement, répondre à cette problématique revient à élaborer l'ensemble des modèles de découpes qui optimisent un *critère de performance* convenablement choisi.

Pour l'évaluation de la qualité d'un modèle de découpes, le critère retenu est: *le taux de chutes minimal*.

I.2. Hypothèses:

1. La disposition de la pièce sur la tôle est importante: une pièce de longueur l_i et de largeur w_i est différente d'une pièce de longueur w_i et de largeur l_i .

2. Nous supposons, tout au long de ce travail, que les entités L_0 , W_0 , l_i et w_i ($i=1, \dots, n$) sont entières et que les coupes sont faites à des étapes entières le long des axes x et y .

I.3. Formulation mathématique:

Le problème 1/V/O/R type guillotine peut être formulé comme suit:

(PLNE 1)

$$\begin{aligned} \text{Maximiser } Z &= \sum_{i=1}^n n_i \times s_i \times y_i \\ \text{Sujet à: } & n_i \times y_i \leq b_i && (i=1, \dots, n) \quad \text{(I)} \\ & y_i \leq c_i && (i=1, \dots, n) \quad \text{(II)} \\ & \sum_{i=1}^n d_i^\perp \times y_i \leq D_0^\perp && (i=1, \dots, n) \quad \text{(III)} \\ & y_i \text{ entiers positifs} && (i=1, \dots, n) \end{aligned}$$

Notations:

y_i est la variable de décision qui désigne le nombre de coupes de types i à exécuter sur la tôle A_0 .

$$d_i = \begin{cases} l_i & \text{si la direction de la coupe est parallèle à l'axe des } x. \\ w_i & \text{sinon.} \end{cases}$$

D_0 est la direction de la coupe.

n_i désigne le nombre de pièces de type i que l'on peut découper sur une longueur D_0 :

$$n_i = \left[D_0 / d_i \right] \quad (i=1, \dots, n).$$

D_0^\perp est la direction perpendiculaire à celle de la coupe.

c_i compte le nombre maximal de coupes de type i qui peuvent être exécutées sur la longueur D_0^\perp .

$$c_i = \left[D_0^\perp / d_i^\perp \right] \quad (i=1, \dots, n).$$

Remarques:

1. Dans tous les paragraphes qui vont suivre, $[X]$ désigne la partie entière de X .

2. Pour éviter de trop encombrer notre exposé, les notions déjà discutées aux chapitres précédents seront utilisées sans aucun préalable.

Interprétation des contraintes:

.La contrainte (I) limite la demande: le nombre de pièces de type i ne doit pas excéder la quantité demandée b_i .

.La contrainte (II) est l'une des contraintes techniques posées par le "matériau première" (la tôle): le nombre maximal de coupes de type i que nous pouvons exécuter sur une dimension D_0 de la tôle est limité.

.La contrainte (III), quant à elle, permet de situer toutes les coupes exécutables dans les limites de la dimension D_0 considérée.

.Le groupe de contraintes (IV) traduit l'intégrité des variables de décision.

Remarque:

Avant d'aborder les différents procédés possibles de découpage, il y a lieu de remarquer qu'il existe une redondance entre les contraintes (I) et (II) [BOU-94].

En effet, la contrainte (I) peut s'écrire aussi:

$$y_i \leq b_i / n_i \quad (i=1, \dots, n).$$

D'où ressemblance avec la contrainte (II):

$$y_i \leq c_i \quad (i=1, \dots, n).$$

Pour contourner ce problème de redondance, il est proposé de combiner ces deux contraintes en une seule tel que:

$$y_i \leq B_i \quad (i=1, \dots, n).$$

$$\text{où } B_i = \min \left[\left[b_i / n_i \right], c_i \right] \quad (i=1, \dots, n).$$

Ainsi, le (PNLE 1) devient:

<p>Maximiser $Z = \sum_{i=1}^n n_i \times s_i \times y_i$</p> <p>Sujet à: $y_i \leq B_i \quad (i=1, \dots, n)$</p> <p>$\sum_{i=1}^n d_i^\perp \times y_i \leq D_0^\perp \quad (i=1, \dots, n)$</p> <p>$y_i$ entiers positifs $(i=1, \dots, n)$</p>

I.4. Variantes du problème et formulations:

Sachant que la tôle admet deux positions (horizontale et verticale) et de même pour la pièce, nous avons recensé huit (08) procédés de découpage possibles.

I.4.1. Tôle disposée horizontalement:

a) Le procédé Horizontal-Horizontal (HH):

Dans ce cas, la tôle et les pièces ont la même disposition horizontale (H). Par conséquent, les paramètres définitifs du (PLNE2) seront:

$$n_i = \left[L_0 / l_i \right] = D_0 / d_i \quad (i=1, \dots, n).$$

$$D_0 = L_0 \Rightarrow D_0^\perp = W_0$$

$$d_i^\perp = l_i \Rightarrow d_i = w_i \quad (i=1, \dots, n).$$

$$c_i = \left[D_0 / d_i^\perp \right] = \left[W_0 / w_i \right] \quad (i=1, \dots, n)$$

b) Le procédé Horizontal-Vertical (HV):

Contrairement au procédé ci-dessus, les pièces, cette fois, sont disposées verticalement (V), la tôle gardant la position horizontale (H). De là, nous avons:

$$n_i = \left[L_0 / w_i \right] = \left[D_0 / d_i \right] \quad (i=1, \dots, n).$$

$$D_0 = L_0 \Rightarrow D_0 = W_0 \quad (i=1, \dots, n).$$

$$d_i = w_i \Rightarrow d_i^\perp = l_i \quad (i=1, \dots, n).$$

$$c_i = \left[W_0 / l_i \right] \quad (i=1, \dots, n).$$

c) Le procédé Mixte-Horizontal (MH):

Pour cette variante du problème, nous utiliserons les deux positions de la pièce simultanément. Le nombre de variables sera alors doublé et le problème devient:

(PLNE 3)

$$\text{Maximiser } Z = \sum_{i=1}^n s_i \left(n_i \times y_i + n_{i+n} \times y_{i+n} \right)$$

$$\text{Sujet à: } n_i \times y_i + n_{i+n} \times y_{i+n} \leq b_i \quad (i=1, \dots, n) \quad \text{(I)}$$

$$y_i + y_{i+n} \leq \sigma_i \quad (i=1, \dots, n) \quad \text{(II)}$$

$$\sum_{i=1}^n d_i^\perp \times y_i + d_{i+n}^\perp \times y_{i+n} \leq D_0^\perp \quad (i=1, \dots, n) \quad \text{(III)}$$

$$y_i \text{ et } y_{i+n} \text{ entiers positifs } (i=1, \dots, n)$$

Notations:

i est l'indice de la pièce de type "i" dans la première position.

$i+n$ est l'indice de la même pièce dans la seconde position.

Comme la contrainte (II) signifie que les coupes de type "i" et "i+n" ne doivent pas déborder la dimension perpendiculaire à celle de la coupe, alors:

$$\sigma_i = \text{Maximum} \left\{ \left[D_0^\perp / d_i^\perp \right], \left[D_0^\perp / d_{i+n}^\perp \right] \right\} \quad (i=1, \dots, n).$$

Comme nous l'avons mentionné auparavant, nous avons introduit, à ce niveau, une modification sur le modèle de SLIMANI et OUKIL [SLI-90].

Dans le modèle de SLIMANI et OUKIL [SLI-90], la contrainte (II) était éclatée en deux contraintes:

$$y_i \leq c_i \quad (1, \dots, n).$$

et

$$y_{i+n} \leq c_{i+n} \quad (1, \dots, n).$$

Or, comme nous l'avons signifié dans la définition de cette contrainte, ceci veut dire que nous pourrions avoir en même temps, sur toute la surface de la tôle, c_i coupes de type "i" et c_{i+n} coupes de type "i+n"; Ce qui est impossible.

d) Le procédé Horizontal-Mixte avec Restriction (HMR):

Le procédé HMR ressemble au procédé HM sauf que, pour le procédé HMR, nous adopterons la démarche suivante:

1. Nous calculerons la chute "CHUT" pour chaque type de pièce et pour chacune de ses dispositions, telle que:

$$CHUT_i = D_0 - n_i \times d_i \quad (i=1, \dots, n).$$

2. Nous recenserons les types de pièces ayant la même chute, pour chacune des deux dispositions, lesquels types seront classés dans un sous-ensemble \mathbb{E} de \mathbb{R} tel que:

$$\mathbb{E} = \left\{ \left[1_i, w_i \right] : CHUT_i = CHUT_{i+n} \quad i=1, \dots, k \text{ et } k \leq n \right\}$$

3. Enfin, nous traiterons chaque pièce selon l'ensemble auquel elle appartient; C'est à dire que, si une pièce "i" appartient à \mathbb{E} alors, nous prendrons ses deux positions (horizontale et verticale), sinon nous ne retiendrons que la position pour laquelle ce type de pièces donne une chute linéaire minimale.

Pour ne pas avoir à traiter un grand nombre de problèmes, nous avons proposé un modèle qui intègre les deux configurations de la pièce, et que nous formulerons par le PLNE4.

(PLNE 4)

$$\text{Maximiser } Z = \sum_{i=1}^{n-k} n_i \times s_i \times y_i + \sum_{i=n-k+1}^n s_i \left(n_i \times y_i + n_{i+k} \times y_{i+k} \right)$$

$$\text{Sujet à: } y_i \leq B_i \quad (i=1, \dots, n-k)$$

$$n_i \times y_i + n_{i+k} \times y_{i+k} \leq b_i \quad (i=n-k+1, \dots, n)$$

$$y_i + y_{i+k} \leq \pi_i \quad (i=n-k+1, \dots, n)$$

$$\sum_{i=1}^{n-k} d_i^\perp \times y_i + \sum_{i=n-k+1}^n \left(d_i^\perp \times y_i + d_{i+k}^\perp \times y_{i+k} \right) \leq Do^\perp$$

$$y_i \text{ et } y_{i+k} \text{ entiers positifs} \quad (i=1, \dots, n)$$

Notations:

$$B_i = \text{minimum} \left(\left[\left[b_i / n_i \right], c_i \right] \right) \quad (i=1, \dots, n).$$

$$\sigma_i = \text{Maximum} \left(\left[\left[Do^\perp / d_i^\perp \right], \left[Do^\perp / d_{i+n}^\perp \right] \right] \right) \quad (i=n-k+1, \dots, n).$$

Remarque:

Le procédé HMR peut devenir un procédé HM si $k=0$.

I.4.2. Tôle disposée verticalement:

Pour ce cas, W_0 est disposée parallèlement à l'axe des x et la pièce "i" adopte les mêmes positions que celles discutées plus haut. Concernant les formulations de ce problème, il suffit de permuter L_0 et W_0 dans les programmes de PLNE1 à PLNE4.

En définitif, si nous gardons "r" types de tôles en stock, nous aurons à résoudre $(8 \times r)$ programmes linéaires pour une seule commande, avant de déduire le modèle de découpe optimal.

II. APPROCHES DE RESOLUTION DU PROBLEME 2/V/O/R:

II.1. Approche par une Procédure à "recherche arborescente":

Soient une tôle A_0 de longueur L_0 et de largeur W_0 , un ensemble R de " n " pièces de longueur l_i et de largeur w_i , commandées en nombre b_i .

Comme tout problème de découpe, l'objectif est la satisfaction de la commande sur un nombre minimum de tôles, en minimisant le pourcentage de chutes résultant de la procédure de découpage.

II.1.1. Principe de base de l'heuristique:

La PHS à "recherche arborescente" est un algorithme qui, dans sa progression, utilise conjointement les principes de:

*la phase "descendante" de la récursion de programmation dynamique développée par CHRISTOFIDES et WHITLOCK [CHR-77], reprise plus tard par BEASLEY [BEA-85a].

A chaque étape de l'algorithme, le système actualisé "tôle-commande" sera décrit par les deux états: Horizontal (H) et Vertical (V), correspondant aux deux positions possibles de la pièce. Aussi, pour chaque type de pièces, nous aurons à considérer quatre combinaisons: HH, HV, VH et VV où les deux lettres symbolisent respectivement la position de la tôle et de la pièce.

Selon le critère de performance adopté, le passage à l'étape suivante est opéré par un choix adéquat du type de pièces à découper, suivi d'une actualisation conforme des paramètres du système "tôle-commande" (dimensions de la tôle et composition de la commande).

*l'algorithme "glouton", lequel garantit la "séquentialité" de la procédure. En effet, une décision prise à une étape donnée (par exemple, découper une pièce de type k) ne peut être remise en cause aux étapes futures.

La PHS à "recherche arborescente" induit implicitement, outre les deux objectifs précités, un autre critère de performance, d'une importance pratique non des moindres: maximisation de l'utilité de la dernière chute générée sur une tôle. Cet aspect fût, certes, examiné pour le cas du problème de découpe unidimensionnelle (SINUANY-STERN et WEINER [SIN-94]) mais n'a jamais été abordé de manière explicite pour le découpage bidimensionnel.

II.1.2. Algorithme de la PHS à "recherche arborescente":

PAS 1 Calcul de la capacité relative d'une "Bande":

Par "bande", nous entendons un rectangle de longueur L_0 ou W_0 et de largeur l_i ou w_i (tout dépend de la variante considérée).

A cette étape, le travail consiste à calculer, pour chaque longueur de bande, le nombre maximal de pièces d'un certain type i qui peuvent y être insérées.

Désignons par N_{i}^{**} ce nombre. ($i=1, \dots, n$).

Remarque:

Au cours de la présente étude, les symboles A^{**} sont tels que: La première étoile peut être remplacée par l'une des deux dispositions de la tôle (H ou V) et la seconde par celle de la pièce (H ou V).

Là, quatre variantes du problème sont possibles:

Variante 1: Tôle horizontale-Pièces horizontales (HH)

$$N_{HH_i} = \left[L / l_i \right] \text{ si } \left[L / l_i \right] \leq b_i (i=1, \dots, n)$$

Variante 2: Tôle horizontale-Pièces verticales (HV)

$$N_{HV_i} = \left[L / w_i \right] \text{ si } \left[L / w_i \right] \leq b_i (i=1, \dots, n)$$

Variante 3: Tôle verticale-Pièces horizontales (VH)

$$N_{VH_i} = \left[W / l_i \right] \text{ si } \left[W / l_i \right] \leq b_i (i=1, \dots, n)$$

Variante 4: Tôle verticale-Pièces verticales (VV)

$$N_{VV_i} = \left[W / w_i \right] \text{ si } \left[W / w_i \right] \leq b_i (i=1, \dots, n)$$

où $[x]$ calcule la valeur entière de x .

Remarque:

Si la capacité calculée de la bande dépasse la demande b_i alors, sa valeur devra être limitée à cette même demande:

$$N^{**}_i = b_i \quad (i=1, \dots, n)$$

PAS 2 Choix du critère de performance:

Le choix d'un critère donné est, généralement, conditionné par les objectifs qui sont assignés à l'algorithme. Pour notre cas, il s'agira de choisir, à chacune des étapes de la génération du modèle de découpes, le type de pièces à retenir.

Intuitivement, le critère de performance qui paraît le plus évident est la "*chute linéaire minimale*", calculée sur la longueur de la bande.

Toutefois, au cours de la conception de cette heuristique, nous avons recensé plusieurs critères de performance.

Le critère "*surface minimale de la chute*", adoptant les mêmes données que la "*chute linéaire minimale*" sauf que le choix du type de pièces est opéré sur la base d'une comparaison des surfaces des chutes générées sur la bande.

Ce critère a été utilisé par TADJ et AÏSSIOUENE [TAD-91] pour l'algorithme heuristique qu'ils ont conçu.

Les critères "*globaux*":

Dans cette catégorie, la référence n'est plus la bande, mais la tôle. En l'occurrence, pour choisir le type de pièces à découper, deux paramètres peuvent être introduits: la surface de la pièce et sa surface pondérée par la demande.

L'utilisation du premier paramètre nécessite le calcul de la surface de chacune des pièces de la commande ($S_i = l_i \times w_i$ pour $i=1, \dots, n$),

lesquelles pièces seront classées par ordre croissant de leurs surfaces. A chaque étape, nous choisissons le type de pièces dont la surface est la plus grande (ou la plus petite) par rapport à celle de la tôle de l'étape en cours.

Quant au second paramètre, la procédure de choix reste la même, à part que celle-ci sera opérée par rapport à la surface pondérée de la pièce ($Sp_i = b_i \times S_i$ pour $i=1, \dots, n$).

Pour notre application, nous nous sommes tenus aux seuls critères "chute linéaire minimale" ensuite "surface de la chute minimale" les autres pouvant être examinés dans des travaux futurs.

PAS 3 Calcul de la chute linéaire minimale:

Comme nous devons exploiter plusieurs variantes, les chutes linéaires seront calculées pour chaque type de pièces, relativement à chacune des quatre variantes.

Variante 1: Tôle horizontale-Pièces horizontales (HH)

$$CHH_i = L - NHH_i \times l_i \quad (i=1, \dots, n)$$

Variante 2: Tôle horizontale-Pièces verticales (HV)

$$CHV_i = L - NHV_i \times w_i \quad (i=1, \dots, n)$$

Variante 3: Tôle verticale-Pièces horizontales (VH)

$$CVH_i = W - NVH_i \times l_i \quad (i=1, \dots, n)$$

Variante 4: Tôle verticale-Pièces verticales (VV)

$$CVV_i = W - NVV_i \times w_i \quad (i=1, \dots, n)$$

Nous calculerons donc $4 \times n$ chutes linéaires.

Sur chacune des variantes, nous déterminerons la chute minimale que nous noterons C^{**min} .

Nous décidons de rechercher C^{**min} en réservant aux chutes C^{**}_i le même traitement adopté aux PAS 2 et 3 de l'algorithme de la PHS "Chute minimale" (voir le CHAPITRE "planification des stocks de barres").

Une fois que le choix de la chute minimale devient définitif au niveau de chaque variante, nous obtenons le quadruple:

$(CHHmin_a, CHVmin_b, CVHmin_c, CVVmin_d)$ où les indices a, b, c et d

désignent les types de pièces de chute linéaire minimale pour les variantes 1, 2, 3 et 4 respectivement.

Arrivés à ce stade, nous pouvons choisir la variante la plus convenable en procédant de manière similaire à celle qui nous a permis d'obtenir C^{**min} .

PAS 4 Actualisation de la commande:

A toute étape de l'élaboration du modèle de découpe, nous sélectionnons le type "s" de pièces répondant au critère de performance considéré.

Pour notre cas, soit C_{\min_s} la chute linéaire minimale calculée au

PAS 3.

La demande en pièces de type "s" doit être réajustée:

$$b_s \rightarrow b_s - N_{\min_s}$$

PAS 5 Actualisation des dimensions de la commande:

Selon la position de la tôle et celle de la pièce, nous convenons d'appeler "chute" le rectangle généré sur la longueur de la bande et "sous-tôle" la partie restante de la tôle.

Les dimensions de la chute et de la sous-tôle seront calculées, conformément à la variante retenue.

Variante 1: Tôle horizontale-Pièces horizontales (HH)

$$\text{CHUTE} \begin{cases} \text{Longueur: } L_c = CH_{\min_s} \\ \text{Largeur: } W_c = w_s \end{cases}$$

$$\text{SOUS-TOLE} \begin{cases} \text{Longueur: } L_k = L_{k-1} \\ \text{Largeur: } W_k = W_{k-1} - w_s \end{cases}$$

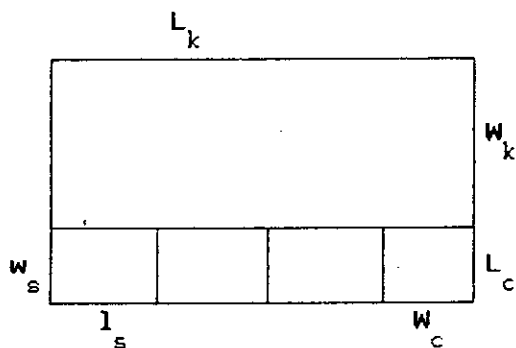


Figure II.1

Structure d'une variante
(HH)

Variante 2: Tôle horizontale-Pièces verticales (HV)

$$\text{CHUTE} \begin{cases} \text{Longueur: } L_c = CHVmin_s \\ \text{Largeur : } W_c = l_s \end{cases}$$

$$\text{SOUS-TOILE} \begin{cases} \text{Longueur: } L_k = L_{k-1} \\ \text{Largeur : } W_k = W_{k-1} - l_s \end{cases}$$

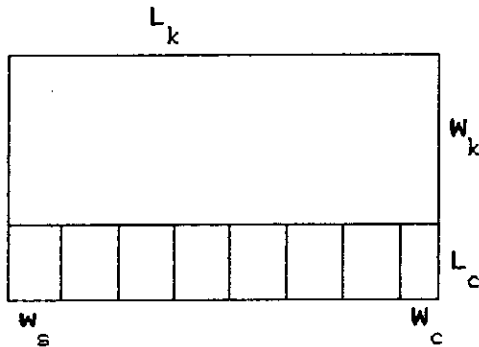


Figure II.2

Structure d'une variante
(HV)

Variante 3: Tôle verticale-Pièces horizontales (VH)

$$\text{CHUTE} \begin{cases} \text{Longueur: } L_c = W_s \\ \text{Largeur : } W_c = CVHmin_s \end{cases}$$

$$\text{SOUS-TOILE} \begin{cases} \text{Longueur: } L_k = L_{k-1} - W_s \\ \text{Largeur : } W_k = W_{k-1} \end{cases}$$

Variante 4: Tôle verticale-Pièces verticales (VV)

$$\text{CHUTE} \begin{cases} \text{Longueur: } L_c = CVVmin \\ \text{Largeur : } W_c = l_s \end{cases}$$

$$\text{SOUS-TOILE} \left\{ \begin{array}{l} \text{Longueur: } L_k = W_{k-1} \\ \text{Largeur: } W_k = L_{k-1} - l_s \end{array} \right.$$

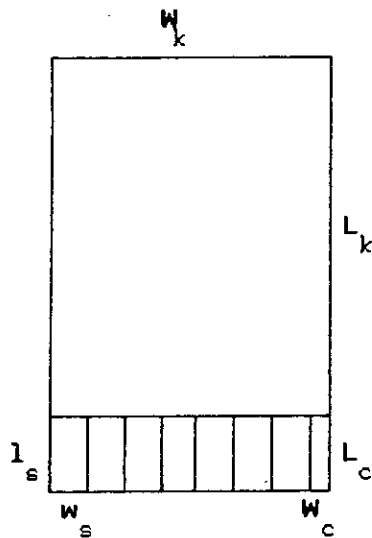


Figure II.4

Structure d'une variante

(VV)

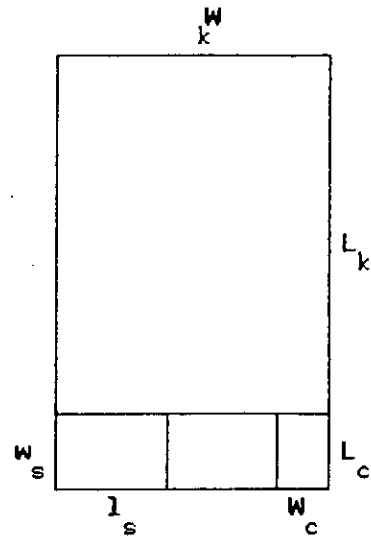


Figure II.3

Structure d'une variante

(VH)

PAS 6 Test de la satisfaction de la commande:

Une fois la commande ajustée, il faut s'assurer que toutes les pièces demandées ont été introduites.

Si ce n'est pas le cas, continuer la procédure.

PAS 7 Test de la "récupérabilité" de la chute:

Fidèle à son principe, l'algorithme de la PHS à "recherche arborescente" s'efforce de réaliser une exploitation maximale de la "bande" avant de passer à toute autre étape.

Dans ce sens, la chute, dimensionnée plus haut, est prioritaire tant qu'il existera des pièces qui peuvent y être insérées.

La procédure va être déroulée comme suit:

PAS.7.1. Classement des pièces restantes de la commande:

Les pièces de la commande, non encore découpées, sont classées dans l'ordre croissant de leurs longueurs.

Si une suite de deux pièces présente la même longueur ($l_i = l_{i+1}$)

alors, il faut examiner leurs largeurs respectives de manière à garantir l'inégalité stricte sur au moins une dimension (l'objectif devenant, pour ces deux pièces, le classement des surfaces). Finalement, nous obtiendrons un échantillon ordonné tel que:

$$l_1 < l_2 < \dots$$

PAS.7.2. Test de l'"insérabilité" de la première pièce:

. Si $l_1 \leq \text{Sup}(L_c, W_c)$ alors, vérifier le cas a).

. Sinon, se référer au cas b).

Cas a) Si $w_1 \leq \text{Inf}(L_c, W_c)$, la chute, récupérable pour au moins un type de pièces, sera considérée comme nouvelle tôle et doit subir le même traitement qu'une tôle ordinaire.

Sinon, se reporter au cas b).

Cas b) La chute en cours, non récupérable dans l'immédiat, sera traitée conformément à la politique de "gestion des chutes" pratiquée par l'entreprise.

II.2. Approche par une Procédure Heuristique à "deux phases":

II.2.1. Principe de base de la PHS à "deux phases":

La PHS à "deux phases" retient fondamentalement le principe du problème de sac à dos décrit par GILMORE et GOMORY [GIL-65]. Elle consiste à élaborer des modèles de découpes en considérant, pour une configuration donnée de la tôle, (horizontale ou verticale) les deux positions possibles de la pièce au même moment. Une hypothèse est donc émise:

"Une pièce de longueur l_i de largeur w_i sera différente d'une pièce de longueur w_i et de largeur l_i ".

De là, si la commande est composée de "n" types de pièces, l'élaboration du modèle de découpes nécessitera le traitement de "2xn" types de pièces différents (principe de la configuration mixte vue lors de la formulation mathématique du problème).

La PHS à "deux phases" opère, comme son nom l'indique, en deux phases distinctes:

Première phase: Construction d'une solution initiale.

Seconde phase :Amélioration de la solution initiale.

La phase de construction d'une solution initiale commence par un agencement des pièces, en "bandes" de largeurs différentes, sur l'une des dimensions de la tôle.

Les bandes, classées préalablement dans l'ordre croissant des chutes générées, seront, par la suite, disposées sur l'autre dimension de la même tôle.

Et, pour les deux agencements, le critère de performance sera "la chute linéaire minimale".

La phase d'amélioration de la solution initiale consiste à récupérer les chutes provoquées par la phase précédente, en tenant compte essentiellement du type "guillotine" de l'opération de découpage.

II.2.2.Algorithme de la PHS à "deux phases":

Phase de construction du modèle initial

PAS 1 Constitution des bandes de pièces homogènes:

A cette étape, nous envisageons, pour chaque configuration de la tôle, l'introduction d'un nombre maximum de pièces de même type sur la dimension considérée.

Ceci revient à dérouler le PAS 1 de l'algorithme de la PHS à "recherche arborescente".

PAS 2 Classement des bandes:

Là, il faut calculer les chutes linéaires générées sur chacune des bandes. Cette opération coïncide avec celle du PAS 3 de l'algorithme de la PHS à "recherche arborescente".

Par la suite, classer les bandes (chaque bande correspondant à l'une des variantes VV,VH,HV ou HH) par chute linéaire croissante.

Nous aboutissons à l'échantillon ordonné suivant:

$$C^{**}_1 \leq C^{**}_2 \leq C^{**}_3 \leq \dots$$

La multiplicité de la chute ne pose pas problème, à priori (ce point de détail sera examiné plus loin).

Pas 3 Choix de la disposition de la tôle:

Chaque chute est caractérisée par les dispositions et de la tôle, et de la pièce à la fois.

Pour le choix de la configuration définitive de la tôle (verticale ou horizontale), les caractéristiques de C^{**}_1 sont décisives.

Aussi, connaissant C^{**}_1 et, par la même, la disposition de la tôle à laquelle celle-ci correspond, nous n'allons retenir, pour les phases suivantes, que les chutes qui s'adaptent avec cette disposition et écarter de la concurrence toutes les autres.

Si $C^{**}_1 = C^{**}_2$ et chacune des deux chutes correspond à deux positions différentes de la tôle alors, les deux cas devront être exploités séparément et la disposition finale de la tôle ne sera décidée qu'en fin de toute la procédure.

Pour une meilleure clarté de l'exposé, nous allons restreindre notre étude à une disposition particulière de la tôle (prenons, par exemple, la disposition verticale).

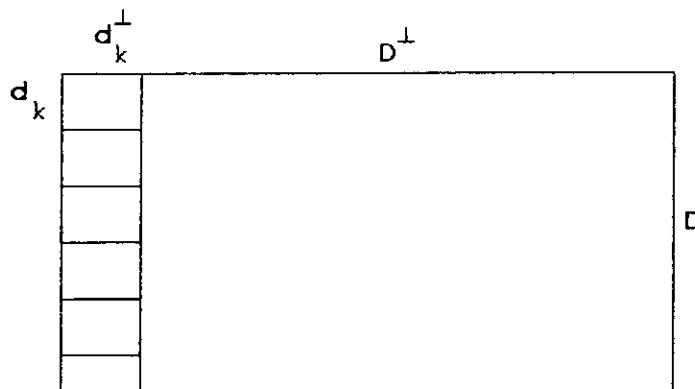
Les chutes linéaires traitées se limiteront à ce cas et seront notées: CV^*_k .

PAS 4 Affectation des bandes à la dimension orthogonale à D:

Soit D^\perp la dimension de la tôle orthogonale à D.

Les pièces qui fournissent la chute C^{**}_k sur la dimension D de la tôle sont de longueur d_k et de largeur d_k^\perp (tel que convenu dans les hypothèses de départ, une longueur n'est pas nécessairement la dimension la plus grande de la pièce).

Soit d_k la dimension parallèle à l'axe de D (figure II.5).



Désignons par N^{**}_k la capacité relative d'une "bande" en pièces de type k.

Figure II.5. Structure d'une tôle à bande homogène

Le problème auquel nous nous trouvons confrontés se résume à:
Comment disposer les bandes de pièces "homogènes" sur la dimension D^\perp ?

Une bande est caractérisée par trois paramètres:

- .une chute linéaire CV_k^* ;
- .une largeur d_k^\perp ;
- .une longueur du lot de pièces k, noté LL_k .

Un lot de pièces k est un ensemble de pièces de type k, regroupées en bandes de même capacité.

PAS 5 Calcul de la longueur d'un lot de pièces:

Sur la dimension D de la tôle, nous pouvons insérer NV_k^* pièces de type k dont la demande est b_k .

Par conséquent, une bande de type k peut être reproduite LL_k fois, et:

$$LL_k = \left[\frac{b_k}{NV_k^*} \right] \quad (k=1, \dots, n)$$

est la longueur du lot de pièces k.

PAS 6 Classement des bandes:

La disposition de la tôle fixée, le nombre de chutes linéaires qui seront en concurrence est $2 \times n$ (chaque pièce possède deux dispositions différentes).

La discipline d'ordonnancement des lots de pièces accorde une priorité absolue à la chute linéaire CV_k^* .

Chaque bande étant propre à une pièce de type k, nous procédons au classement des bandes par ordre croissant de leurs chutes.

Nous obtenons l'enchaînement suivant:

$$CV_p^* \leq CV_q^* \quad \text{où } p \text{ et } q \text{ prennent leurs valeurs sur } I = \{1, \dots, n\}.$$

p et q peuvent avoir la même valeur pour une même pièce qui présente les deux dispositions (verticale et horizontale).

PAS 7 Détermination du nombre de répliques:

Soit "s" l'indice de la première chute donnée par le classement.

Le nombre de répliques est le nombre maximal de bandes qui peuvent être agencées sur la dimension D^\perp de la tôle:

$$NR_s^* = \left[D^\perp / d_s^\perp \right]$$

PAS 8 Traitement des cas de débordement:

Les cas de débordement se produisent:

-Lorsque les chutes linéaires calculées pour les deux positions de la pièce sont de même longueur.

-Lorsque deux (ou plusieurs) chutes linéaires consécutives sont de même longueur et la dimension D^\perp de la tôle ne peut contenir tous les lots de pièces correspondants.

-Quand un lot de pièces ne peut être contenu entièrement par la dimension D^\perp de la tôle.

Premier cas: Même pièce-Même chute pour les deux positions

Si les chutes générées pour les deux positions de la pièce i sont de même amplitude ($CVV_i = CVH_i$), nous devons déterminer les nombres respectifs de répliques: NRH_i et NRV_i .

Aussi, il s'agira de rechercher le nombre "optimal" de bandes de chaque type (H et V) qu'il faut agencer sur la dimension D^\perp de la tôle, de telle sorte à minimiser la chute linéaire produite sur cette même dimension (D^\perp).

Nous nous ramenons ainsi à la résolution d'un problème 1/V/O/R où la barre est de longueur D^\perp et les pièces à découper de longueurs d_v^\perp et d_H^\perp ($d_v^\perp = d_H^\perp$ et $d_v^\perp = d_H^\perp$).

Le problème est formulé, pour un seul type de pièce i , par (PLNE5). y_v et y_H désignent respectivement le nombre de bandes de largeur d_v^\perp et d_H^\perp que l'on doit introduire sur la dimension D^\perp .

Deuxième cas: Pièces différentes-Même chute linéaire

Soient deux pièces de types différents p et q dont les chutes linéaires mesurées sur leurs bandes respectives (correspondant à la même dimension D de la tôle) sont de même longueur.

.Si l'affectation des longueurs des deux lots cumulées déborde la dimension D^\perp , c'est à dire que:

$$LL_q \times d_q^\perp + LL_p \times d_p^\perp > D^\perp$$

alors, nous nous trouvons devant une situation similaire à la précédente laquelle peut être formulée comme (PLNE6).

Pour la résolution des deux problèmes formulés, nous avons fait appel aux procédures heuristiques dûment élaborées au CHAPITRE "planification des stocks de barres".

Troisième cas: Un type de pièces - Une seule disposition

Ce dernier cas est inclus dans la procédure de "chargement" adoptée dans cet algorithme: nous affectons un lot de pièces d'un même type à la dimension D^\perp "actuelle" mais celui-ci ne peut y être contenu entièrement.

Alors, au lieu d'y affecter tout le lot, nous nous limiterons au nombre de répliques possible: $y_k = NR_k^*$.

Sinon $y_q = LL_q$ et $y_p = LL_p$

(PLNE 5)

$$\text{Minimiser } Z = D^\perp - \left(d_V^\perp \times y_V + d_H^\perp \times y_H \right)$$

$$\text{Sujet à: } NVH_i \times y_H + NVV_i \times y_V \leq b_i$$

$$d_V^\perp \times y_V + d_H^\perp \times y_H \leq D^\perp$$

y_V et y_H entiers positifs.

Remarques:

1. Le deuxième cas a été étudié pour le cas de deux pièces uniquement à titre illustratif; La démarche reste inchangée si cette même situation venait à se présenter pour plus d'une pièce.

2. Si les deux cas surgissent au même moment, le passage au second cas reste conditionné par le résultat du premier. D'où l'ordre de priorité.

3. Pour toutes les situations qui sortent du contexte particulier décrit plus haut, $y_k = NR_k^*$.

(PLNE σ)

$$\text{Minimiser } Z = D^\perp - \left(d_q^\perp \times y_q + d_p^\perp \times y_p \right)$$

$$\text{Sujet à: } NVH_i \times y_q + NVV_i \times y_p \leq b_i$$

$$d_q^\perp \times y_q + d_p^\perp \times y_p \leq D^\perp$$

$$y_q \leq LL_q$$

$$y_p \leq LL_p$$

y_q et y_p entiers positifs.

PAS 9 Affectation des bandes à la dimension D^\perp de la tôle:

Ayant passé en revue les particularités auxquelles nous pouvons être confrontés, la procédure d'affectation des bandes se réduit à un problème de minimisation de la chute linéaire produite sur la dimension D^\perp de la tôle mais, où la procédure de "chargement" des largeurs de bandes respecte:

.l'ordre de succession des bandes établi par rapport au classement de leurs chutes linéaires respectives.

.les astreintes de particularité que nous avons passées en revue au paragraphe précédent.

.la discipline de "chargement" par lots de pièces

PAS 10 Réajustement des paramètres du système:

Le réajustement des paramètres du système est effectué au fur et à mesure qu'un lot de pièces est affecté à la dimension D^\perp . Une fois que nous avons tranché sur le nombre de bandes à associer à une chute donnée (prise respectivement à son ordre de classement), nous procédons au réajustement de:

La longueur D^\perp de la tôle

$$D^\perp \rightarrow D^\perp - \sum_k d_k^\perp \times y_k$$

La commande en cours

$$b_k \rightarrow b_k - \sum_j NV_j^* \times y_j$$

PAS 11 Choix du type de pièces suivant:

En se basant toujours sur le classement des chutes, nous extrayons la chute suivante et nous repérons la largeur de bande correspondante. Soit d^\perp cette largeur.

.Si $d^\perp \leq D^\perp$, le processus doit être réitéré à compter du PAS 4

.Sinon, examiner la chute suivante.

Et ainsi de suite, jusqu'à parcourir tous les types de pièces. Au premier itinéraire, l'algorithme ne peut passer par un même type de pièces qu'une seule fois (logique d'un parcours hamiltonien).

Si le premier itinéraire ne comprend aucune pièce qui réponde au test, alors poursuivre la recherche, quitte à repasser par un type de pièce déjà exploré auparavant où même ayant été retenu (au second passage, la pièce est explorée sur l'autre disposition).

Remarques:

1. La procédure de construction de la solution initiale tient compte, principalement, de deux facteurs:

.la progression croissante des chutes linéaires générées sur les bandes,

.le découpage des pièces par lots successifs.

Ces deux facteurs réunis, la chute correspondant au modèle initial sera structurée en "escalier" (figure II.6).

Le modèle est dit "normalisé" dès lors que toute la chute se retrouve concentrée sur un même bord de la tôle.

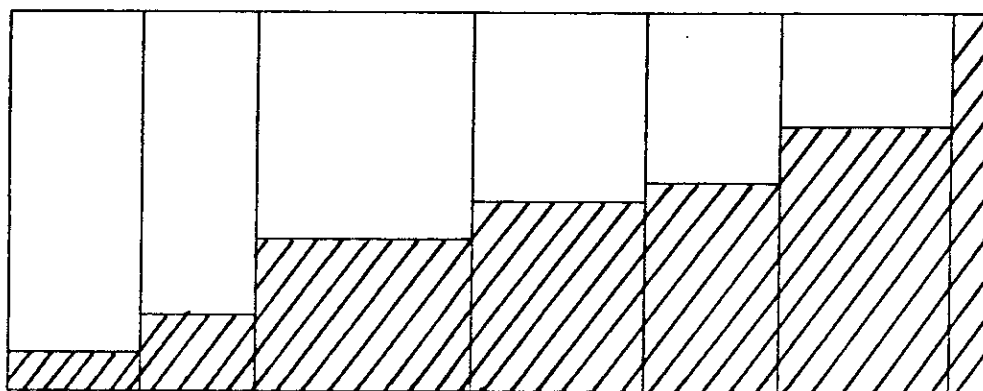


Figure II.6.

Structure d'un modèle de découpes "initial"

La surface hachurée représente la chute générée sur le modèle initial.

2. Rappelons que le principe de l'algorithme de la PHS à "deux phases" a déjà fait l'objet d'une discussion par SLIMANI et OUKIL [SLI-90], lesquels, à la phase "Affectation des bandes à la dimension orthogonale à D", ont dû générer plus d'une solution pour les cas particuliers de chutes égales.

Par contre, le présent algorithme recherche, dès le départ, une solution unique: l'optimum est fourni par la résolution des PLNE 5 et 6 formulés ci-dessus.

3. La politique de découpage par lots de pièces peut être inconvenable, dans la mesure où elle accroît le nombre de changements de modèles de découpes.

Par ailleurs, celle-ci pourrait contribuer de façon appréciable à réduire l'effort d'identification des pièces lors des opérations de stockage et de manutention.

Phase d'amélioration du modèle initial

La qualité du modèle initial n'étant pas concluante quant à l'objectif visé (minimisation de la surface de la chute), une tentative d'amélioration de celle-ci est de rigueur.

Dans ce sens, la procédure que nous proposons opère un recensement des chutes récupérables avant d'enclencher le processus de récupération proprement dite.

PAS 12 Recensement des chutes récupérables:

A ce niveau, il s'agira essentiellement de mesurer les

dimensions des chutes "locales", lesquelles seront incrémentées à "pas" bien spécifiés jusqu'à rallier toute l'étendue de la chute récupérable.

Une chute est "locale" si elle est uniforme (possède une seule longueur CV_k^*) et concerne un lot de pièces homogène (les pièces sont toutes de même type).

Soient K l'ensemble des indices de pièces retenues lors de la phase 1 et y_k le nombre de bandes de largeur d_k^\perp correspondants ($k \in K$).

La longueur de la chute "locale" sera:

$$LC_k = y_k \times d_k^\perp \quad (k \in K).$$

La largeur de la chute "locale" n'est autre que la longueur de la chute linéaire générée sur la bande de type k :

$$WC_k = CV_k^* \quad (k \in K).$$

Connaissant les dimensions des chutes "locales", nous pouvons prétendre à la génération de tous les ensembles possibles de chutes (partition de chutes). Chaque ensemble est obtenu par modification progressive des dimensions d'une ou plusieurs chutes dans les limites du domaine des chutes.

Les dimensions des chutes "locales" seront considérées comme unités de base pour ces modifications.

La première partition sera:

$$P1 = \left\{ (LC_k, WC_k) : LC_k = y_k \times d_k^\perp \text{ et } WC_k = CV_k^*, k \in K \right\}$$

Pratiquement, cette partition est la plus mauvaise puisque caractérisée par un fractionnement maximal de la chute.

Plus une chute est fractionnée, plus faibles sont les chances de sa récupération.

Partant de ce raisonnement, la partition qui intervient immédiatement serait obtenue sur un lot de bandes "hétérogène" de chute linéaire uniforme (cas particuliers discutés plus haut).

Soit $K1$ l'ensemble des indices des pièces répondant à ces critères.

La deuxième partition sera représentée par:

$$P2 = \left\{ (LC_k, WC_k) : LC_k = \sum_j y_j \times d_j^\perp \text{ et } WC_k = CV_k^*, j \in K1 \right. \\ \left. LC_k = y_k \times d_k^\perp \text{ et } WC_k = CV_k^*, k \in K \setminus K1 \right\}$$

L'idée du cumul des longueurs de bandes "hétérogènes" sur une chute linéaire uniforme nous a amenés à envisager les cas susceptibles de se présenter en prolongeant une largeur de chute sur la longueur des chutes suivantes.

Prenons, par exemple, un modèle contenant trois types de bandes, p, q et s, à chutes linéaires différentes CV^*_p , CV^*_q et CV^*_s

($CV^*_p < CV^*_q < CV^*_s$), et reproduites y_p , y_q et y_s fois respectivement (figure II.7).

En pointillés, nous avons tous les prolongements possibles des chutes.

Bandes de pièces de type "p"	Bandes de pièces de type "q"	Bandes de pièces de type "s"
	-----	-----
-----	-----	-----

Figure II.7.

Modèle de découpes "initial" à trois lots de bandes homogènes

Prolongement de CV^*_p sur la longueur du lot de type q :

$$P31 = \left\{ (CV^*_p, d_q^\perp y_q + d_p^\perp y_p), (CV^*_q - CV^*_p, d_q^\perp y_q), (CV^*_s, d_s^\perp y_s) \right\}.$$

Prolongement de CV^*_p sur la longueur des lots de type q et s :

$$P32 = \left\{ (CV^*_p, d_q^\perp y_q + d_p^\perp y_p + d_s^\perp y_s), (CV^*_q - CV^*_p, d_q^\perp y_q), (CV^*_s - CV^*_p, d_s^\perp y_s) \right\}.$$

$$P33 = \left\{ (CV^*_p, d_q^\perp y_q + d_p^\perp y_p + d_s^\perp y_s), (CV^*_q - CV^*_p, d_q^\perp y_q + d_p^\perp y_p), (CV^*_s - CV^*_q, d_s^\perp y_s) \right\}.$$

Prolongement de CV*_q sur la longueur du lot de type s:

$$P34 = \left\{ (CV^*_p, d^{\perp}_p x y_p), (CV^*_q, d^{\perp}_q x y_q + d^{\perp}_s x y_s), \right. \\ \left. (CV^*_s - CV^*_q, d^{\perp}_s x y_s) \right\}.$$

Il est donc visible que , plus le modèle est varié, plus grand est le nombre de cas à exploiter, donc un coût de calcul encore plus important.

Pour réduire le nombre de cas possibles, nous convenons d'écarter de la procédure de prolongement toutes les chutes dont l'une des dimensions (LC_k ou WC_k) ne peut contenir la plus petite pièce de la commande.

$$\text{Soit } d_{\min} = \min_k \left\{ d_k \right\} \quad (k=1, \dots, 2 \times n).$$

.Si $LC_k < d_{\min}$ ou $WC_k < d_{\min}$ alors, la chute (LC_k, WC_k) est une chute irrécupérable dans l'immédiat (commande en cours).

Quant au sort à réserver à cette chute (la garder en stock ou la rejeter), ceci revient entièrement à la politique de gestion de la chute suivie par l'entreprise.

.Sinon, la chute (LC_k, WC_k) mérite le même traitement qu'une tôle ordinaire.

PAS 13 Processus de récupération des chutes:

La "récupérabilité" d'une chute est conditionnée par la composition de la commande "actualisée", en d'autres termes, de la disponibilité des pièces qui peuvent y être découpées.

Aussi, l'ordre d'intervention d'une chute dans le processus de récupération est très important.

Etant donnée, à une certaine étape k de la récupération, une chute k réalisé la valeur optimale de l'objectif en utilisant des pièces d'un type "1" et, à l'étape suivante (k+1), la chute (k+1) ne peut être récupérée qu'avec le même type de pièces "1".

Si, au même moment , la demande en pièces de type "1" s'est vue satisfaite à l'étape k, il n'est aucun doute que la chute (k+1) qui, au départ (lors du recensement) était récupérable, perd cet avantage en cours du processus de récupération. Toute tentative d'exploration des combinaisons possibles dans leur quasi-totalité risque de mener vers des dérives "exponentielles" (surtout lorsque la commande est très variée).

Au regard de cette éventualité, nous nous sommes contentés d'un processus de récupération "avant" (de gauche à droite) lequel évolue dans le sens de l'accroissement des largeurs de chutes, à commencer par celle de plus faibles dimensions (prise dans l'ensemble des chutes récupérables).

Assimilée à une tôle, la chute est désormais soumise à l'algorithme de la phase de construction du modèle initial.

Généralement, cette phase seule suffit pour une récupération optimale de la chute sans qu'il y ait besoin de recourir à un quelconque raffinement supplémentaire. Néanmoins, ceci n'est plus vérifié pour les commandes "résiduelles".

PAS 14 Modèle de découpes pour la commande résiduelle:

Pratiquement, une commande "résiduelle" intervient sur le dernier modèle de découpes. Elle consiste souvent en un nombre très limité de pièces dont la surface globale est très faible devant celle de la tôle à découper.

De ce cas particulier justement, est né le besoin de réfléchir à une stratégie d'élaboration d'un modèle de découpes propre à la commande "résiduelle". L'analyse de la commande "résiduelle" seule vient conforter une préoccupation pratique:

Plutôt que de disperser les pièces sur toute la surface de la tôle, pourquoi ne pas essayer de les concentrer sur une partie de la tôle. convenablement choisie? De cette manière, il serait possible de récupérer une chute aussi continue que possible, au lieu d'une multitude de chutes qui ne risquent de servir à aucun usage ultérieur.

L'algorithme décrit plus haut sera aussi intéressant lors de la construction du modèle de découpes associé à la commande "résiduelle". Toutefois, plutôt que d'appliquer une seule fois les deux phases (phase de construction de la solution initiale et phase d'amélioration) pour l'ensemble de la commande en cours, celles-ci vont être mises en oeuvre "alternativement" au niveau de chaque bande.

Cette procédure n'est autre que la PHS à "recherche arborescente" développée à la section précédente.

Remarques:

1. Le seul problème qui peut entraver la logique de cette procédure est: A quel moment pouvons-nous qualifier une commande de "résiduelle"?

A prime abord, nous pouvons énumérer trois ratios dont l'influence est certaine sur toute affirmation allant dans ce sens, à savoir:

$$R1 = \frac{\text{Surface de la commande non encore satisfaite (CNES)}}{\text{Surface de la tôle à découper}}$$

$$R2 = \frac{\text{Longueur de la plus grande dimension des pièces de la CNES}}{\text{Longueur de la plus faible dimension de la tôle}}$$

$$R3 = \frac{\text{Capacité de la plus faible dimension de la tôle par pièce}}{\text{Demande en pièces de même type non encore satisfaites}}$$

Il est évident que toute étude engagée dans le sens de l'analyse du comportement d'un algorithme en fonction des quelques ratios sus-définis est en soit un créneau de recherche.

Pour notre application, nous avons convenu que la commande est "résiduelle" dès que:

$$\rho = \frac{\text{Surface de la commande non encore satisfaite}}{\text{Surface de la tôle}} < 0.80$$

où la valeur 0.80 est déduite du taux de chutes moyen déclaré par les gestionnaires de l'entreprise, lequel est estimé à 20%.

2. Dans le cas d'un problème 2/V/V/R, la satisfaction de la commande "résiduelle" est possible par un recours à une tôle de dimensions plus réduites mais de même épaisseur.

Cette politique permet de réaliser des économies appréciables en matières premières. Conséquemment, l'existence d'un stock de tôles "hétérogène" serait un impératif de gestion.

Toutefois, ceci risque, à la longue, d'entrer en conflit avec le principe même de *minimisation des chutes*: des tôles de dimensions réduites favorisent la "discontinuité" des chutes et, par la même, sa "non récupérabilité".

Cet aspect mériterait une étude beaucoup plus poussée.

PAS 15 Choix du modèle de découpes optimal:

La procédure de récupération des chutes permet de construire plusieurs modèles de découpes différents malgré la solution initiale qui leur est commune.

A ce stade de l'algorithme, nous ne devons retenir qu'un seul modèle.

Le critère de choix le plus évident se trouve être le taux de chutes minimum. Aussi, nous repérons toutes les pièces qui composent chaque modèle et nous calculons la surface correspondante que nous noterons S_m :

$$S_m = \sum_i n_{im} \times l_i \times w_i \quad (m=1, \dots, P).$$

où "P" désigne le nombre de "partitions" réalisables construites. Nous avons autant de modèles de découpes que de "partitions" réalisables.

En notant par S la surface de la tôle utilisée, le taux de chutes tx_m associé à chaque modèle m sera défini par:

$$tx_m = \left(S - S_m \right) / S \quad (m=1, \dots, P).$$

Le meilleur modèle sera tel que: $Tx = \min_m \left(tx_m \right)$.

III. EXTENSION AUX MODELES 2/V/I/R ET 2/V/V/R GUILLOTINE:

Globalement, le principe de résolution des problèmes 2/V/I/R et 2/V/V/R guillotine est similaire aux cas 1/V/I/R et 1/V/V/R.

Aussi, les extensions suggérées au modèle 2/V/O/R guillotine obéissent exactement à la même logique algorithmique du 1/V/O/R.

Il sera remarqué que le nombre de modèles de découpes élaborés est plus important. Comment?

La procédure de "chargement" par lots homogènes, utilisée pour la résolution des problèmes 2/V/O/R successifs, rend la multiplication d'un modèle de découpes presque impossible en cas de commandes de tailles faibles ou moyennes.

Le "chargement" par lots homogènes est une compression de la commandes par groupes d'un même type de pièces. Si la population chargée sur un modèle correspond à un type de pièces d'un faible effectif, la probabilité de voir ce modèle se reproduire est presque nulle.

CONCLUSION:

Conformément à la démarche que nous avons adoptée, le *Chapitre Troisième* a couvert certains algorithmes de résolution des problèmes 2/V/O/R auxquels des extensions furent proposées.

Le recours à ce type de problèmes est un passage obligé pour la "planification des stocks de tôles".

Néanmoins, quoiqu'évident puisse-t-il paraître, tout algorithme doit être évalué sur le plan des performances pratiques.

Les algorithmes élaborés, parviennent-ils à satisfaire tous les objectifs pratiques pour lesquels ils furent conçus?

Si c'est le cas, à quel coût?

Sur cette lancée, justement, le *Chapitre Quatrième* se chargera d'apporter des réponses aussi concluantes qu'il se peut à ces interrogations.

VALIDATION DES ALGORITHMES HEURISTIQUES

INTRODUCTION:

Pour SILVER et al (voir [POR-87] pour référence), une heuristique peut être qualifiée de *bonne* si:

- La durée des calculs nécessaires est "réaliste".

Le terme "réaliste" dépend de la taille maximale des problèmes abordés et du délai autorisé pour fournir la solution.

- La valeur du critère est en moyenne proche de l'optimum.

Les évaluations en moyenne d'un critère peuvent être obtenues de deux façons [POR-87]:

.On associe aux différentes caractéristiques du problème posé des variables aléatoires dont on précise la loi de probabilité, et on cherche l'espérance mathématique de l'écart par rapport à l'optimum des solutions fournies par les méthodes approchées.

.On génère un large échantillon de problèmes que cet algorithme est supposé résoudre et on effectue des statistiques sur les résultats fournis par les différentes méthodes.

Toutefois, d'un certain point de vue, toute conclusion quant à l'efficacité de l'algorithme ne pourrait être définitive, dans la mesure où l'échantillon des problèmes test générés ne pourrait être exhaustif [SAK-82].

- La probabilité d'avoir une très mauvaise valeur pour le critère est faible.

- L'heuristique est aussi simple que possible donc, facile à comprendre par l'utilisateur.

Pour tester les performances des heuristiques développées le long de cette partie, nous prévoyons d'examiner chacun des points cités ci-dessus.

Pour évaluer en moyenne, nous n'avons considéré que la deuxième approche, laquelle ne comporte aucune restriction sur les lois utilisées dans les générateurs.

Par ailleurs, en cas de choix multicritère, la notion de solution optimale n'ayant plus de sens, il n'y a plus d'algorithmes exacts ni heuristiques mais des procédures itératives multicritères où la notion de solution efficace remplace celle de solution optimale [POR-87].

En gestion de la production, l'enchevêtrement des flux matières et

informations rend indispensable l'intégration de plusieurs objectifs à la fois pour la conception de tout modèle de gestion. Il en ressort pertinamment que la notion d'efficacité doit y jouir d'une certaine priorité.

Les résultats sont donnés sous forme de tableaux synthétiques, accompagnés de remarques.

Lorsque nos méthodes sont comparées à d'autres, ces dernières sont rappelées brièvement.

I.GENERATION DES COMMANDES ALEATOIRES:

Les conclusions que l'on peut tirer d'un plan d'expériences dépendent du plan d'expériences choisi. Cela signifie que des résultats expérimentaux doivent toujours être accompagnés de la description du générateur des problèmes.

La génération d'une commande suppose l'affectation de valeurs aux paramètres descriptifs de la commande, s'efforçant de ne pas trop s'écarter des cas rencontrés en pratique.

Pour la description d'une commande, nous avons répertorié les paramètres essentiels, à savoir:

Cas d'une commande de produits longs:

Fixer le nombre "n" de pièces de longueurs différentes dans toute la commande.

Générer les longueurs l_i et les demandes n_i de chaque type i de pièces ($i=1, \dots, n$).

Cas d'une commande de produits plats:

Pour les produits plats, "n" est choisi comme constant.

Les longueurs l_i , les largeurs w_i et les demandes b_i d'une pièce de type i seront générées ($i=1, \dots, n$).

Ces paramètres n'obéissent à aucune loi de distribution de probabilité particulière.

Nous avons commencé par relever les valeurs extrêmes V_{min} et V_{max} propres à chacun des paramètres ensuite, nous avons généré des échantillons d'une loi uniforme (V_{min}, V_{max}) en utilisant la méthode des transformations inverses (ANNEXE.B).

Cette dernière procédure nécessitant la génération de nombres pseudo-aléatoires, nous dûmes faire usage d'un générateur, proposé par l'ECUYER [ECU-88]: the Combined Random Numbers Generator, dont les performances furent testées par l'auteur (ANNEXE.C).

Les commandes générées figurent en ANNEXE.D, avec les valeurs extrêmes correspondant à chaque paramètre.

Remarque:

1. Les valeurs extrêmes V_{min} et V_{max} sont des données recueillies auprès de l'entreprise. Grâce à ce choix, nous pouvons au moins garantir que les échantillons générés seraient proches des commandes réelles.

2. Le nombre de commandes générées a été fixé à dix parce qu'en littérature, la majorité des auteurs qui ont eu à traiter des problèmes de découpes estiment suffisant pareil effectif pour peu que les échantillons générés ne soient pas corrélés.

II. ALGORITHMES DE PLANIFICATION DES STOCKS DE BARRES:

II.1. Résultats de la "Planification des stocks de barres":

Les algorithmes développés au *Chapitre Deuxième* ont été traduits en langage PASCAL. Toutes les exécutions ont été effectuées sur un micro-ordinateur OLIVETTI M300-04 (386).

Les Procédures Heuristiques Séquentielles (PHS) ont produit des résultats en un temps moyen de 3 secondes.

Par contre, la Procédure de Résolution Hybride (PRH) a nécessité un temps machine moyen de 2 minutes et 5 secondes soit, près de 42 fois la durée d'exécution moyenne d'une PHS.

Cet ordre de grandeur s'expliquerait aisément par la logique algorithmique de la PRH, laquelle consiste à résoudre une suite de programmes linéaires en nombres entiers.

Remarque:

Le temps machine fait abstraction des temps de saisie et remise à jour des données, tâches dont le coût est faramineux.

A l'occasion, nous signalerons que, pour l'ensemble des 12 commandes, il nous a fallu plus de 21 heures (près de 3 jours).

Ce qui donne, de manière beaucoup plus palpable, une idée sur le coût d'une solution fournie par la PRH.

Les résultats détaillés sont reproduits en ANNEXE .E, accompagnés des tableaux récapitulatifs que nous avons utilisés.

Abréviations:

PRH: Procédure de Résolution Hybride.

PHSCM: Procédure Heuristique Séquentielle à Chute Minimale.

PHSNCT: Procédure Heuristique Séquentielle à Niveau de Chute Tolérable.

II.2. Evaluation de la Procédure de Résolution Hybride:

PORTMANN [POR-87] affirme qu'une heuristique devient, grâce à une nouvelle démonstration, un algorithme exact.

Motivés par la force d'une telle proposition, nous entreprîmes de la tester sur la Procédure de Résolution Hybride que nous soupçonnons donner une solution très proche de l'optimum.

L'évaluation des performances de la PRH va porter sur deux aspects:

- .L'optimalité de la solution.
- .L'efficacité de cette même solution.

a. Evaluation en moyenné de la PRH:

A cet effet, nous avons alloué à chacune des commandes des paramètres "virtuels" utiles pour la circonstance:

.Le nombre de barres "virtuel", calculé sous l'hypothèse de la "continuité" des matériaux tout au long de la commande: les barres sont démunies de leur aspect "unitaire" lorsqu'il est question d'en utiliser plus d'une. Autrement, si la commande devait être découpée sur "Nb" barres de longueur L sans qu'aucune chute ne soit produite (en dehors de la chute cumulée sur la dernière barre), nous supposerons que la barre utilisée est "continue", de longueur "Nb x L".

"Nb" est calculé par l'expression suivante:

$$Nb = 1 + \left[\sum_{i=1}^n n_i \times l_i / L \right] \quad (1)$$

.Le taux de chutes "virtuel", déduit directement du nombre de barres "virtuel" utilisées. Celui-ci correspond au taux de chutes calculé sur la base de la longueur de barre cumulée sur la dernière barre utilisée, et répond à la formule:

$$\gamma = \left[Nb - \sum_{i=1}^n n_i \times l_i \right] / \left[Nb \times L \right] \quad (2)$$

$$\gamma = 1 - \left[\sum_{i=1}^n n_i \times l_i / (Nb \times L) \right] \quad (3)$$

Dans les expressions de (1) à (3), l_i et n_i désignent la longueur et la fréquence (nombre) respectives de la pièce de type i . Les résultats obtenus sont résumés au tableau suivant:

Disposant de ces nouvelles données, nous avons procédé à une analyse des résultats de la PRH, confrontés aux paramètres "virtuels".

En moyenne, l'écart entre les taux de chutes "virtuels" et "PRH" est de l'ordre de 4.26%.

Parallèlement, l'écart entre les niveaux des stocks de barres prévisionnels est évalué, approximativement à 6% en moyenne.

Une interprétation "probabiliste" de ces pourcentages ne laisse aucun doute que la PRH satisfasse pleinement aux objectifs "principaux" qui lui furent assignés, à savoir:

- .minimisation du taux de chutes produit.
- .minimisation des approvisionnements en barres.

Commande N=°	Nb	γ (%)
1	57	1.699
2	75	1.143
3	95	0.150
4	57	1.151
5	74	0.017
6	136	0.617
7	204	0.387
8	115	0.463
9	121	0.335
10	135	0.169
11	5	8.500
12	46	0.547
Moyennes	94	1.264

Tableau n°1.
Paramètres "virtuels"
des commandes

Une telle conclusion est soutenable dès lors qu'elle découle d'une évaluation par rapport à un "référentiel absolu" (cas virtuel).

Quel crédit peut-on accorder à cette proposition?

Quel jugement porter sur la PRH, appréhendée cette fois dans le contexte des algorithmes qui produisent des solutions "réalisables"?

Ces deux interrogations nous ramènent, sans le moindre détour, vers une discussion sur l'optimalité des solutions fournies par la PRH.

b. Evaluation de l'optimalité des résultats de la PRH:

Pour l'application de l'algorithme qu'ils ont développé, SINUANY-STERN et WEINER [SIN-94] ont utilisé les commande n°11 et 12) sur des barres de longueur 600cm (voir ANNEXE.D).

Les deux auteurs affirment que la solution qu'ils ont obtenue est optimale, à savoir:

Concernant la commande n°11, la longueur de la chute cumulée sur la dernière barre représente près de 90.59% de la chute totale. Ceci est un signe indiscutable de satisfaction de l'objectif de "maximisation de la longueur de la chute cumulée".

Numéro de la commande	11	12
Chute totale (cm)	255	750
Nombre de barres en stock	5	47
Nombre de modèles générés	4	8
Longueur de la chute cumulée sur la dernière barre	231	354

Tableau n°2.

Résultats de l'algorithme de SINUANY-STERN et WEINER

Néanmoins, ils précisent que cette optimalité n'a de sens que si les modèles de découpes à chute "nulle" sont écartés.

Pratiquement, une telle hypothèse est confortée par le fait que, lors de l'opération de découpage, une fraction de la longueur de la barre est perdue sous forme de copeaux (particules d'acier).

Pour prévoir cette situation, SINUANY-STERN et WEINER [SIN-94] ont estimé la chute par usinage à une longueur $\Delta l = 0.5\text{cm}$. De là, les dimensions de toutes les pièces sont allongées de Δl de sorte que si la pièce à obtenir est de longueur l_i alors, pour la résolution du problème, la longueur qui sera retenue sera: $l_i + \Delta l$.

Afin que la procédure de Résolution Hybride élaborée puisse être utilisée comme méthode de référence, nous avons repris les mêmes commandes 11 et 12, pour lesquelles nous obtînmes les résultats résumés par le tableau n°3. (les détails sont disponibles en ANNEXE.E).

A propos de la commande n°11 toujours, nous noterons que, grâce à la PRH, la longueur totale de la chute a été réduite de 0.5cm. A première vue, ce résultat peut sembler sans importance pratique. Toutefois, il constituerait sûrement une preuve irréfutable quant à la consistance de la Procédure de Résolution Hybride (PRH). D'autant plus que la longueur de la chute cumulée avoisinerait, cette fois, les 90.77% de la longueur totale de la chute.

<i>Numéro de la commande</i>	11	12
<i>Chute totale</i>	254.5	750
<i>Nombre de barres en stock</i>	5	47
<i>Nombre de modèles générés</i>	3	6
<i>Longueur de la chute cumulée sur la dernière barre</i>	231.0	291.0

Tableau n°3.

Résultats de la Procédure de Résolution Hybride

Quant aux stocks de barres prévisionnels, nous relèverons que les niveaux produits par la PRH et l'algorithme de SINUANY-STERN et WEINER [SIN-94] sont les mêmes et se trouvent remarquablement serrés par rapport aux stocks "virtuels".

L'analyse des résultats à l'appui, nous estimons que la PRH produit une solution très proche de l'optimum.

Une telle conclusion ne saurait être définitive sans une étude plus poussée où les caractéristiques des échantillons utilisés feraient l'objet d'une meilleure appréhension.

A cet égard, les PHS élaborées pour la "planification des stocks de barres" seront validées relativement à la PRH.

II.3.Evaluation des procédures heuristiques séquentielles:

Maintenant que nous disposons d'un repère "valable", nous allons engager une évaluation des résultats des Procédures Heuristiques Séquentielles (PHS).

II.3.1.L'objectif est la minimisation du taux de chutes:

Ici, nous commencerons par une comparaison des deux PHS. Sitôt, nous évaluerons la meilleure PHS par rapport à la PRH.

Il faut s'assurer que les paramètres calculés pour chacune des procédures sont significativement différents, et que la différence observée est le résultat des performances des méthodes et non due à la variabilité des échantillons pris.

Pour cela, nous devons recourir à un test statistique approprié.

a.Choix d'un test statistique:

Le choix d'un test convenable pour l'analyse d'une situation donnée nous oblige à répondre préalablement aux questions suivantes:

(1) S'agit-il d'évaluer un paramètre de population à partir d'une statistique obtenue dans un échantillon?

(2) S'agit-il d'une comparaison de la valeur globale de plusieurs échantillons?

(2.1).Compare-t-on des moyennes?

(2.2).Compare-t-on deux échantillons ou plus de deux?

(2.3).Les échantillons sont-ils appariés ou non?

(3) S'agit-il d'une comparaison d'effectifs (ou de fréquences ou de pourcentages)?

(4) Doit-on comparer des variances ou des écart-types?

(5) Cherche-t-on s'il existe une relation entre deux variables?

En soumettant notre cas à ce questionnaire, nous pouvons le situer dans le cadre ci-dessous:

.Les données sont métriques.

.La comparaison porte sur des valeurs globales (taux de chutes, nombres de barres, longueurs de chutes cumulées).

.La comparaison se fait entre deux échantillons appariés: c'est-à-dire que chaque élément d'un échantillon forme avec un élément de l'autre échantillon une paire unie par une relation (chaque donnée de l'un dépend de la valeur d'une donnée de l'autre).

Dans ces circonstances, nous avons opté pour le test de MANN-WHITNEY [MAN-47] dont un rappel est introduit en ANNEXE.F.

b.Confrontation de la PHSCM à la PHSNCT:

La différence entre les taux de chutes moyens produits par les deux méthodes est-elle significativement différente?

Il n'y a pas de raison de penser que les valeurs d'un échantillon sont nécessairement supérieures ou égales à celles de l'autre échantillon.

L'hypothèse à tester sera:

Ho: $S_1=S_2$ contre H1: $S_1 \neq S_2$

où: S_1 et S_2 désignent les taux de chutes moyens de la PHSCM (Echantillon 1) et la PHSNCT (Echantillon 2) respectivement.

Après application du test de MANN-WHITNEY [MAN-47], les deux échantillons sont significativement différents à un niveau de confiance $p=0.05$.

Par conséquent, la PHSNCT est, en moyenne, meilleure que la PHSCM et le risque de se tromper est de 5%.

La différence moyenne relative est, environs, 30%.

c. Confrontation de la PRH et la PHSNCT:

Dès le moment où nous avons isolé une procédure heuristique (PHSNCT), comment la situer par rapport à la PRH?

Dans ce cas, aussi, nous procéderons comme en (a).

Les circonstances du test sont les mêmes mais S_1 désigne le taux de chute moyen de la PRH (Echantillon 1).

En guise de conclusion, nous remarquerons que la différence relative moyenne est de 40%, ce qui n'est pas du tout négligeable.

II.3.2. L'objectif est la minimisation du stock de barres:

Pour les commandes aléatoires que nous avons générées, les stocks de barres moyens varient en une progression arithmétique de raison 5 barres et de premier terme 95 barres, correspondant à la PRH. En moyenne, la PRH fournit les meilleurs stocks de barres, chose qui n'est pas surprenante en raison de la corrélation stock de barres-taux de chutes.

Conséquemment, l'objectif "minimisation du nombre de barres à stocker" se trouvant étroitement lié à l'objectif analysé plus haut, le comportement des groupes de résultats serait similaire.

II.3.3. L'objectif est la minimisation du nombre de modèles:

Quant au nombre de modèles de découpes, la PHSCM semble utiliser le nombre moyen le moins important, situation qui s'écarte, quelque peu, de celle rencontrée pour les deux objectifs précédents.

A quel point cette différence peut-elle être significative?

Dans ce cas, nous remarquons que les écarts entre les valeurs de chaque paire de valeurs peuvent être de signes contraires. L'utilisation du test de WILCOXON [WIL-65] sera donc justifié. (Pour plus de détails sur ce test, voir l'ANNEXE.G).

a. Confrontation de la PHSCM à la PRH:

L'hypothèse à tester sera:

$H_0: S_1 = S_2$ contre $H_1: S_1 \neq S_2$

où: S_1 et S_2 désignent les nombres de modèles produits par la PHSCM (Groupe 1) et la PRH (Groupe 2) respectivement.

Suite à l'application du test de WILCOXON [65], nous pouvons conclure que le nombre de modèles de découpes générés est le même quelque soit la procédure heuristique séquentielle utilisée, le

risque de se tromper est de 5%.

b. Confrontation de la PHSCM à la PHSNCT:

Pour ce test, S2 est le nombre de modèles générés par la PHSNCT, tous les autres paramètres restant inchangés, par ailleurs. Après test, la même conclusion exprimée plus haut s'impose:

Le nombre de modèles de découpes générés est le même quelque soit la procédure utilisée, le risque de se tromper est de 5%.

II.3.4. L'objectif est la maximisation de la longueur de la chute générée sur la dernière barre:

La PRH permet de concentrer, en moyenne, la plus grande longueur de chutes sur la dernière barre ($l_{max}=505.25cm$) devant la PHSNCT ($341.08cm$) et la PHSCM ($287.83cm$).

L'inconvénient des procédures heuristiques séquentielles est qu'elles intègrent les pièces dans les modèles de découpes par lots. Par conséquent, ce sera la longueur du lot qui conditionnera la "récupérabilité" de la chute. Nous avons déjà admis, après tests, que ces trois méthodes évoluent dans le même ordre s'agissant des objectifs de minimisation des "taux de chutes" et des "stocks de barres".

Partant, nous pouvons conclure que la plus grande concentration des chutes est garantie par la PRH, suivie par la PHSNCT et la PHSCM, prises dans cet ordre.

II.4. Raffinement de la solution donnée par la PRH:

Démarrant de l'hypothèse que la PRH fournissait les meilleurs modèles de découpes, nous avons été tentés par une adaptation de l'algorithme de GILMORE et GOMORY [GIL-63] à la série de modèles correspondant à chaque échantillon (le dernier modèle est exclu s'il est unique).

Ainsi, l'algorithme de GILMORE et GOMORY "adapté" est conçu pour tester une éventuelle amélioration des résultats de la PRH.

A cet effet, nous dûmes résoudre les programmes linéaires (PLNE5) et (PLNE6) (voir [OUK-95] pour les formulations respectives) pour les objectifs respectifs de planification du nombre de barres minimum à disposer en stock et de génération d'une longueur de chutes minimale.

La résolution des programmes linéaires a été effectués sur un micro-ordinateur OLIVETTI M300-04 (386), grâce au logiciel STORM. Les résultats obtenus sont représentés dans les tableaux n°4 et n°5. (les détails figurent en ANNEXE.H).

II.4.1. Analyse des résultats:

Dans un tiers des cas, la résolution du PLNE5 permet d'améliorer le taux de chutes alors que celui-ci reste inchangé pour la moitié des commandes et pour les autres, il se détériore. Parallèlement, le nombre de modèles de découpes utilisés est diminué de près de 29.31% (en moyenne, ce nombre diminue de 3 modèles par commande).

En revanche, le PLNE6 marque une détérioration substantielle des taux de chutes "réelles" ainsi que des stocks de barres avec, toutefois, une diminution notoire du nombre de modèles de découpes utilisés, avoisinant les 51.72% (soit 5 modèles de découpes en moins par commande).

Commande n=°	Chute (%)		Nombre		Durée (sd) d'exécution
	théorique	réelle	barres	modèles	
1	7.960	11.941	62	5	85
2	0.000	20.472	155	2	14
3	0.000	7.889	103	6	2
4	0.206	37.000	98	3	10
5	0.120	31.369	108	4	38
6	0.046	25.671	202	7	73
7	1.409	6.782	218	8	5
8	1.386	42.766	200	3	45
9	15.411	17.869	153	4	2
10	4.074	4.416	141	9	26
11	0.633	42.810	8	3	1
12	0.000	46.152	130	2	1

Tableau n°4.

Résultats fournis par la résolution du PLNE6

II.4.2. Exploitation pratique des résultats:

Trois alternatives s'offrent au décideur:

1. Procéder au découpage de tous les modèles entièrement et constituer des stocks de pièces supplémentaires. Aussi, il sera nécessaire de gérer des en-cours additionnels sur une période de

temps qui demeure tributaire de la composition des commandes à venir. Le résultat d'une telle démarche est décrit par la chute "théorique".

2. Ne découper que le nombre juste nécessaire à la satisfaction de la commande. Cette décision pourrait être prise dans deux situations différentes:

.Si les longueurs de barres non utilisées doivent être rejetées systématiquement. Cette éventualité est mesurée par la chute "réelle". Celle-ci inclut, outre la chute "théorique", la longueur de la production "excédentaire".

Ce cas peut se produire si l'entreprise estime que la gestion des chutes serait plus coûteuse que l'acquisition de nouvelles barres ou encore, en l'absence d'un quelconque système de gestion des chutes.

Commande n°	Chute (%)		Nombre		Durée (sd) d'exécution
	théorique	réelle	barres	modèles	
1	7.810	8.150	61	5	96
2	1.302	2.379	79	7	124
3	0.105	0.105	94	12	420
4	3.070	4.500	59	5	53
5	0.785	1.345	75	10	207
6	0.046	25.671	202	7	55
7	1.906	2.192	208	10	1850
8	5.696	6.174	122	6	252
9	16.400	16.830	145	5	15
10	4.074	4.416	141	9	185
11	8.500	8.500	5	3	2
12	0.543	0.543	46	3	2

Tableau n°5.

Résultats fournis par la résolution du PLNE5

.Si le système de gestion de production prédispose l'entreprise à garder en stock des chutes tout en soumettant le découpage des modèles choisis à des règles de priorité basées sur le principe d'accumulation des chutes sur un nombre de barres réduit au minimum (objectif discuté par SINUANY-STERN et WEINER [SIN-94]). De cette manière, l'identification des chutes devient une tâche aisée et,

surtout, l'éventail des pièces qui peuvent y être découpées est plus large (maximisation des chances de "récupération" de la chute).

II.4.3. Synthèse de la procédure de raffinement:

En définitif, la résolution du PLNE6 révèle que la contrainte satisfaction de la demande est prédominante, d'où l'écart très prononcé entre la chute "théorique" et la chute "réelle".

L'objectif "*minimisation de la longueur totale de la chute*" se trouve affaibli sous le poids des contraintes demande.

Ceci explique l'importance des stocks de barres prévisionnels.

D'un autre côté, le nombre de modèles de découpes utilisés se trouve réduit, situation qui sera certainement en faveur de l'objectif "*minimisation du nombre de changements de modèles*".

Quoique représentant un avantage pour la phase "ordonnancement de la production", la réduction du nombre de changements de modèles perd de son influence devant la prépondérance des paramètres de "planification des stocks de barres".

Pour clore cette phase, nous pouvons, au moins, affirmer que l'utilisation des modèles de découpes générés par la PRH pour la résolution du PLNE5 offrirait certainement de larges possibilités d'amélioration des résultats de la PRH (abstraction faite du coût d'obtention de cette solution).

III. ALGORITHMES DE PLANIFICATION DES STOCKS DE TOLES:

Comparés au taux de chutes estimés au niveau de l'unité de production et qui oscillent entre 15 et 20%, les taux de chutes moyens observés sur les commandes considérées varient entre 4 et 16% pour l'ensemble de la commande et entre 1 et 4% s'agissant de chaque tôle, en excluant la dernière tôle.

Ceci est un indice intéressant sur la qualité des modèles générés par les heuristiques que nous avons conçues.

Les temps d'exécution relevés au cours de l'élaboration des modèles de découpes sont également intéressants. Ils varient de 4 secondes jusqu'à 12 secondes, soit un temps moyen de 3 secondes 5 centièmes. En procédant de manière similaire qu'en II, les résultats produits par les algorithmes de "Planification des stocks de tôles" seront rassemblés dans des tableaux avant d'être analysés.

Supposant que, dans ce cas aussi, les procédures de résolution hybrides fournissent toujours la meilleure solution, nous avons déterminé un algorithme dont les grandes lignes sont les suivantes:

III.1. Algorithme de la Procédure de Résolution Hybride:

PAS 1 Génération de la solution initiale:

Pour chaque commande, nous résolvons les programmes linéaires PLNE1 jusqu'à PLNE4 pour les deux dispositions de la tôle (8 variantes).

Chaque résolution doit fournir une solution que nous allons considérer comme "initiale" puisque pouvant être sujette à des améliorations.

A une permutation près des bandes de pièces, les modèles de découpes obtenus à cette étape sont en "escalier".

PAS 2 Dimensionnement des chutes:

Comme ce fût le cas de l'algorithme de la Procédure Heuristique à "deux phases", nous opérons un dimensionnement des chutes pour chaque modèle de découpes généré au PAS 1.

PAS 3 Raffinement de la solution initiale:

Une fois que le modèle "initial" est produit, nous réajustons la commande proprement à chaque variante.

Tant que les chutes dimensionnées au PAS 2 sont récupérables, nous reprendrons le processus à compter du PAS 1, la chute étant assimilée à une tôle parfaite.

Si l'ensemble des chutes récupérables a été épuisé, le modèle de découpes obtenu sera le "meilleur" pour la variante traitée.

PAS 4 Choix du modèle de découpes "optimal":

Jusqu'au PAS 3, nous obtenons une série de 8 modèles de découpes. Là, il faudrait évaluer les chutes occasionnées pour chaque modèle de découpes pris à part.

Le modèle "optimal" sera celui dont le taux de chutes est minimal.

Remarque:

Il convient de préciser que l'application de cet algorithme s'est faite uniquement pour la première tôle.

Cette restriction est justifiée par:

1. Un taux de chutes obtenu sur les premières tôles, généralement le plus faible, car au fur et à mesure que nous avançons dans la procédure de génération des modèles de découpes "optimaux", le nombre de pièces diminue et, de ce fait, le problème devient encore plus contraint (L'OUTPUT d'un système est d'autant plus mauvais que ce dernier est contraint).

2. La détermination des modèles de découpes "optimaux" d'une commande entière nécessite plusieurs interventions humaines. Ce qui prend un temps fastidieux.

III.2. Analyse des premiers modèles de découpes:

Le déroulement de chacun des algorithmes de "Planification des stocks de tôles" a permis de produire, sur la première tôle, le taux de chutes relevés sur le tableau n°6.

Sur 70% des commandes traitées par la PHDP, le premier modèle de découpes généré présente le taux de chutes le plus faible. Quant aux autres commandes (les 30% restantes), leur défection à la règle serait certainement due au fait que la configuration de la tôle doit être fixée en début du processus: contrainte additionnelle qui réduit le domaine des solutions réalisables. Ce même comportement caractérise la PHRAS. Tandis que la PHRAL produit 60% de cas.

Commande n°	PHDP	PHRAS	PHRAL	PHRALC	PRHT
1	3.2710	0.3694	0.3694	1.1399	0.9500
2	0.8821	0.9676	1.0855	0.9692	2.2898
3	1.4620	0.7579	1.4325	1.7111	0.1000
4	1.5138	0.6525	0.4105	0.4510	0.3500
5	4.7451	4.1715	0.7030	4.8228	2.3100
6	0.6912	0.7036	0.9254	1.1905	1.1610
7	2.6512	1.1182	0.7738	0.3310	2.0100
8	1.4841	1.8138	0.7296	1.7312	1.1410
9	2.3200	0.6388	0.5995	2.9596	2.3500
10	0.8111	1.2436	0.2504	2.3221	0.4110

Tableau n°6.

Taux de chutes générés sur le premier modèle de découpes

Abréviations:

PHDP: Procédure Heuristique à "deux phases".

PHRAS: Procédure Heuristique à "recherche arborescente" basée sur le critère de performance "partiel" surface minimale.

PHRAL: Procédure Heuristique à "recherche arborescente" basée sur le critère de performance "partiel" chute linéaire minimale

non contrainte.

PHRALC: Procédure Heuristique à "recherche arborescente" basée sur le critère de performance "partiel" chute linéaire minimale contrainte.

PRHT: Procédure de Résolution Hybride "tronquée".

Pour ces deux dernières, les défaillances s'expliqueraient par l'effet du hasard (comme nous l'avons déjà signalé, en cas de multiplicité de la chute sur la bande, le choix est arbitraire).

Enfin, reste la PHRALC où 80% des commandes sont découpées sur un premier modèle dont le taux de chutes est inférieur à celui produit sur tous les autres.

La question qui s'impose serait:

Est-ce que cette fois encore, les résultats de la PRHT peuvent être utilisés comme référence pour l'évaluation des procédures heuristiques?

La probabilité pour que le premier modèle présente le taux de chutes le moins important pour tous les algorithmes est de l'ordre de 0.23. Nous en déduisons que les chances de voir cet événement se produire sont trop faibles pour que soit limitée l'évaluation aux premiers modèles.

Comme second argument, nous remarquerons que même si ces chances venaient à être augmentées, la comparaison serait, d'un point de vue pratique, infondée. Un examen de la structure des modèles de découpes montre que les échantillons de pièces qui y sont découpées sont différents. Aussi, n'y a-t-il pas lieu de comparer des résultats produits par des échantillons non semblables.

Finalement, nous abandonnâmes l'idée d'utiliser la PRHT, décision confortée par le coût machine de la procédure. Le temps moyen par variante est de 14minutes, sans compter les temps de saisie et remise à jour des données. Il faudrait donc près de 1heure 30minutes pour traiter une seule commande et en tirer le modèle "optimal".

III.3. Evaluation des procédures heuristiques:

III.3.1. Construction du paramètre d'évaluation:

Ayant renoncé à restreindre l'évaluation des procédures heuristiques à une partie de la commande, le critère d'évaluation globale le plus évident reste le taux de chutes produit par l'ensemble de la commande.

$$Tg = \left[\sum_{j=1}^m tx_j \right] / m \quad (1)$$

où tx_j est le taux de chutes généré sur le modèle de découpes j .

m est le nombre de modèles de découpes (donc, de tôles) nécessaires pour satisfaire toute la commande.

Par ailleurs, si la commande est composée de pièces de surface S_i ($S_i = l_i \times w_i$) demandées en quantités b_i et que cette commande nécessite " m " tôles de surface S_0 alors, le taux de chutes pourra être calculé par:

$$Tg = 1 - \left[\sum_{i=1}^n b_i \times S_i \right] / \left[m \times S_0 \right] \quad (2)$$

Des expressions (1) et (2), il découle que si une commande est répartie sur un même nombre de tôles pour deux algorithmes différents, les taux de chutes globaux seront égaux malgré les différences entre modèles de découpes respectifs.

Les résultats des algorithmes de "Planification des stocks de tôles" laissent entrevoir une situation analogue.

A cause de cela, nous fûmes amenés à construire un coefficient susceptible de mettre en évidence les différences entre les divers algorithmes.

Soit μ donné par:

$$\mu = tx_m \times \left[\sum_{j=1}^{m-1} tx_j \right] / (m-1) \quad (3)$$

μ est le produit de la chute générée sur la $m^{\text{ème}}$ tôle, par la moyenne des chutes produites par les $(m-1)$ premières tôles.

μ est un coefficient qui intègre deux critères de performance de l'algorithme en même temps:

.minimisation de la chute sur les premiers modèles.

.maximisation de la concentration de la chute sur la dernière tôle.

Les résultats sont résumés par le tableau n°7.

III.3.2. Analyse des résultats:

L'analyse des valeurs moyennes prises par le coefficient μ situe l'algorithme de la PHRAL meilleur que tous les autres, suivi directement par la PHRAS.

Au fond, ces deux algorithmes ne diffèrent que par la nature des

critères de performance "partiels" qui y sont utilisés, tous les autres détails algorithmiques restants communs, par ailleurs. D'un autre côté, les résultats produits par la PHRALC et la PHDP seraient moins intéressants que leurs prédécesseurs.

L'appréciation des moyennes ne suffisant pas pour trancher quant à la préférence d'un algorithme à un autre, des tests seront engagés dans les paragraphes suivants.

a. Confrontation de la PHRAL à la PHRAS:

Vus les rapprochements décelés en moyenne au niveau des couples d'algorithmes (PHRAL, PHRAS) et (PHRALC, PHDP), le test de WILCOXON [WIL-65] portera sur l'analyse des différences entre les échantillons de résultats de chacun des deux couples.

L'hypothèses à tester sera:

Ho: $\mu_1 = \mu_2$ contre H1: $\mu_1 \neq \mu_2$

où: μ_1 et μ_2 désignent les valeurs des coefficients μ correspondant à la PHRAL (Groupe 1) et la PHRAS (Groupe 2) respectivement.

Commande N=°	PHDP	PHRAS	PHRAL	PHRALC
1	9.3372	6.2358	6.1789	9.6197
2	49.3967	52.6167	21.1356	31.6333
3	148.2417	94.1611	103.8281	134.9602
4	14.2417	9.7752	12.9849	21.0690
5	226.4145	151.3086	110.8389	195.0699
6	11.9585	8.1927	7.9800	15.3864
7	48.9847	29.8468	32.1809	20.8058
8	52.2746	29.8367	16.0407	47.1618
9	28.1402	15.1245	15.7082	25.7696
10	6.6703	6.5395	5.7917	8.3560
Moyennes	59.5660	40.3637	33.2667	50.9831

Tableau n°7.

Valeurs des coefficients μ

Le test de WILCOXON [WIL-65] nous permet de conclure que les deux échantillons de résultats seraient issus d'une même population au niveau de confiance $\alpha=5\%$.

b. Confrontation de la PHDP à la PHRALC:

L'hypothèse testée est la même, sauf que, cette fois, μ_1 et μ_2 désignent les valeurs des coefficients μ correspondant à la PHDP (Groupe 1) et la PHRALC (Groupe 2) respectivement. Avec un risque d'erreur de 5%, les deux procédures fourniraient presque toujours les mêmes résultats.

c. Confrontation de la PHRAL à la PHRALC:

Les conclusions des tests précédents à l'appui, nous pouvons tester la différence entre les groupes de résultats qui sont les meilleurs en moyenne, à savoir: la PHRAL et la PHRALC.

Toujours, à travers le test de WILCOXON, la différence entre les deux populations de méthodes est significative au seuil de confiance $\alpha=5\%$.

En définitif, les résultats de la PHRAL sont meilleurs que ceux de la PHRALC, situation qui s'expliquerait sans trop de peine par le fait que cette dernière est soumise à une contrainte pratique supplémentaire: découpage du type de pièces qui satisfait la commande au plus tôt.

Du point de vue statistique, cette préférence demeure valable jusqu'à un seuil de confiance de 4%. Au deçà de ce niveau, les écarts entre les deux procédures deviennent insignifiants.

CONCLUSION:

Dans la population des méthodes de "*Planification des stocks de barres*", la PRH s'est distinguée par la qualité des résultats auxquels elle permet d'aboutir.

Nous avons eu l'occasion de prouver, par un procédé que nous estimons original, que les solutions produites étaient très proches de l'optimum et cela, pour l'ensemble des objectifs visés, à savoir:

- .La minimisation des taux de chutes globaux,
- .La minimisation des stocks de barres,
- .La minimisation du nombre de changements de modèles,
- .La maximisation de la "récupérabilité" de la chute cumulée sur le dernier modèle de découpes généré.

Néanmoins, nous aurons quand même à noter que l'obtention de ces solutions est coûteuse en temps machine et traitement des données. Pour compenser cette lacune, la procédure heuristique séquentielle à "niveau de chute tolérable" serait fortement recommandée, d'autant plus que celle-ci intègre des paramètres pratiques aussi importants que le "niveau de chute tolérable".

En tout état de cause, toutes les procédures de "planification des stocks de barres" suggérées amélioreraient sensiblement l'état actuel du système de production.

Pour les méthodes de "*Planification des stocks de tôles*", un intérêt très particulier fut accordé à la "récupérabilité" de la chute produite sur la dernière tôle.

Cette option trouve son origine dans la "constance" du stock de tôles prévu par chacune des méthodes proposées.

En fin de parcours, nous conclûmes que les procédures de recherche arborescente fournissaient les meilleurs résultats.

Les analyses purement "théoriques" cachent souvent des réalités "pratiques" indiscernables en l'ignorance de certains paramètres du système de production. En effet, un modèle de découpes généré par une procédure à "deux phases" présenterait des qualités bien meilleures lors de la phase de découpage proprement dite: le nombre de manipulations de l'objet est beaucoup plus réduit puisque la direction des découpes de l'étape 1 est uniforme, contrairement aux cas "arborescents". Cette propriété favorisera considérablement l'aspect rapport "homme-machine" et sera, en conséquent, source d'un gain de temps non négligeable.

Aussi, l'appréciation des deux catégories de méthodes restera sujet à des discussions ultérieures.

Malgré toutes les insuffisances dont elles pourraient être l'objet, nous pensons que les objectifs de gestion de production fixés au départ pourraient être atteints à des degrés variables. Au pire des cas, il y aurait des chances de voir des améliorations remarquables à des niveaux divers du système de production.

Partie c

ORDONNANCEMENT DE LA PRODUCTION

EN

INDUSTRIE DE LA CONSTRUCTION METALLIQUE

Chapitre Premier

PROBLEMATIQUE DE L'ORDONNANCEMENT DE LA PRODUCTION DANS L'INDUSTRIE DE LA CONSTRUCTION METALLIQUE

INTRODUCTION:

Dans l'industrie de la construction métallique, une commande est souvent très variée et consiste en plusieurs pièces différentes.

Dans la phase "*Planification des stocks matières*", il était question de l'"*ordonnement de ces pièces*" sur un "matériau" supposé disponible en stock, de manière à réaliser un certain nombre d'objectifs dont, principalement, la minimisation des chutes.

Dans ce chapitre, nous comptons cerner la problématique de l'ordonnement de la production telle qu'elle se distingue dans l'industrie de la construction métallique. Autrement, il s'agira d'examiner la dynamique du système de production dans les limites structurelles propres au secteur.

Au départ, un positionnement typologique du problème d'ordonnement est de rigueur.

Au chapitre suivant, nous insisterons sur quelques aspects de gestion, fortement liés à un système de production en industrie de la construction métallique. Ces derniers seront, par la suite, exploités pour une spécification implicite des objectifs de gestion visés par l'ordonnement de la production.

I. POSITIONNEMENT TYPOLOGIQUE:

I.1. Réduction du système de production:

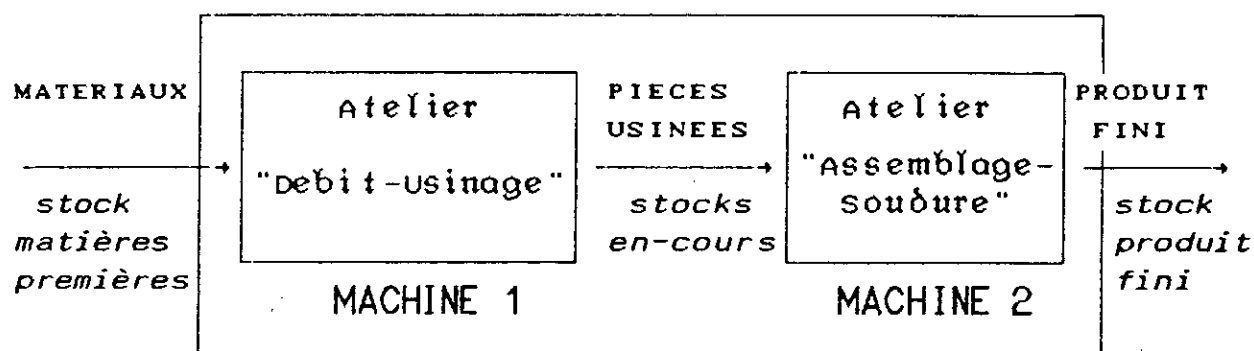
La description du système de production (Partie.A -CHAPITRE DEUXIEME) a permis de mettre en relief un aspect prédominant du système de production, à savoir que le processus de production se concentrait en deux activités principales:

.Le *découpage*, exécuté essentiellement au niveau des ateliers "Débit tôles-fines" (opérations de cisailage) et "Chaine Boulton" (opérations de sciage).

.Le *montage*, lequel concerne les ateliers "Assemblage"

(opérations de vissage, goupillage,...) et "Soudure" (opérations de soudage sous ces modes divers).

Le système de production, réduit aux ateliers "Débit-Usinage" et "Assemblage-Soudure", peut être assimilé à un atelier à 2 machines (Figure.A).



ATELIER A 2 MACHINES

Figure.A. Schéma réduit du système de production

Cette réduction est d'autant plus justifiée par les éléments suivants:

..Un même matériau ne subit qu'une seule opération de découpage et, conséquemment, l'obtention d'un lot de pièces décrit par un modèle de découpes donné ne nécessitera l'utilisation que d'une seule machine pour tout le lot.

Le découpage n'est interrompu qu'une fois toutes les pièces du modèle découpées: les opérations sont donc non interruptibles.

..Dès qu'une pièce découpée est acheminée vers l'atelier "Assemblage-soudure", l'opération de montage n'engagera qu'un seul mode d'assemblage ou de soudure pour une même pièce. Aussi, l'outil ou la machine utilisés pour cette opération est unique pour une pièce bien définie.

I.2. Classification du problème d'ordonnancement:

*Les gammes de fabrication sont dynamiques:

Désormais, l'ordonnancement de la production concernera un atelier à 2 machines.

L'arrivée des matériaux dans cet atelier est conditionnée par:

..la structure du produit fini en termes de caractéristiques des

pièces qui doivent prendre part à sa composition (dimensions, quantités).

..la séquence définissant l'ordre de passage des pièces usinées (découpées) vers l'opération de montage.

Ainsi, les arrivées des matériaux sont progressives dans le temps: les gammes de fabrications sont donc dynamiques.

*La fabrication obéit à des gammes techniques linéaires:

Pour l'opération de découpage, l'affectation des matériaux (barres et tôles) est effectuée à la vue des caractéristiques de la machine. Il en est de même pour les opérations de montage.

Aussi, le choix des machines est imposé.

Par ailleurs, l'ordre d'exécution de toutes ces opérations est déterminé à l'avance par le plan de production.

A cet effet, la gamme de fabrication serait une gamme technique linéaire.

*Le problème d'ordonnement est de type flow-shop:

Soient deux ou plusieurs produits finis différents dont toutes les gammes de fabrication requièrent les deux opérations: découpage et montage.

L'ordre de succession de ces deux opérations reste le même quelque soit le produit fabriqué: le découpage doit impérativement précéder le montage.

Le problème traité, situé par rapport aux problèmes d'ordonnement d'ateliers serait incontestablement un flow-shop à 2 machines.

Avant de désigner les objectifs de l'ordonnement, nous allons évaluer l'impact de l'identification des pièces ainsi que leur manutention, sur la dynamique de l'atelier de fabrication.

II. INTERET DE L'HOMOGENEITE DES STOCKS D'EN-COURS:

Un produit fini est le résultat du regroupement de plusieurs pièces, en des quantités spécifiées par le plan de production.

Ces pièces, de dimensions variées, sont produites sur des machines de découpage avant d'être assemblées.

Ainsi, des lots de pièces "hétérogènes" vont constituer les stocks

des produits en-cours (Figure-A). Si, d'autre part, l'élaboration des modèles de découpes est partie prenante du système de gestion, l'aspect du lot produit, après chaque opération de découpage, ne sera que le reflet des structures de ces modèles.

L'existence des en-cours étant une donnée incontournable du système de production, l'objectif de gestion le plus en vue serait la constitution de stocks de pièces "homogènes" au coût le plus réduit.

Pour obtenir un stock "homogène", il faut *identifier* les pièces découpées, les *classer* par rapport à leurs dimensions respectives (critère d'homogénéité) pour, enfin, les *transporter* vers la zone de stockage.

Conséquemment, cette politique provoque un accroissement des besoins en superficie et, certainement, un encombrement de l'environnement de travail, surtout lorsque la commande est trop diversifiée.

Au cas où la contrainte "superficie" venait à être relaxée, l'ouvrier sera appelé à consentir un effort supplémentaire pour la tâche d'identification des pièces découpées avant de les assigner aux lots spécifiques.

L'effort d'identification varie en fonction de la composition des lots de pièces découpées. L'effort d'identification des pièces pourrait être atténué par la minimisation du nombre de changements de modèles, objectif largement traité au niveau "*Planification des stocks matières*", ou encore, la mise sur pied d'un système d'identification par barres.

La première alternative constitue déjà un pas en avant pour la concrétisation de l'intégration "*Planification-ordonnancement*".

La seconde alternative s'insère parmi les décisions stratégiques (investissement). Par suite, elle sort du cercle de notre étude.

Comme nous aurons à le démontrer au prochain chapitre, l'effort d'identification peut être minimisé par un ordonnancement approprié des séquences de passage des modèles de découpes sur une même machine.

III. MAITRISE DES OPERATIONS DE MANUTENTION:

La manutention est une tâche indissociable du processus de production dans une entreprise de la construction métallique.

Deux ponts roulants circulent le long de l'"*Atelier-Débit*". Ils

sont utilisés par différentes équipes de travail (débit, assemblage et soudure). Ces interférences sont les causes principales du dysfonctionnement qui freine l'activité de stockage des matériaux dans les différents espaces de travail.

La manutention des produits usinés (découpés) implique des coûts divers, dont:

-Un coût de mobilisation des moyens de manutention (Clark, chariot, pont roulant,...etc.) qui dépendra notamment de la fréquence de l'utilisation de tel moyen ou tel autre;

-Un coût de démobilisation de l'ouvrier par rapport à sa véritable tâche (découpage); Au lieu de vaquer aux tâches de découpage proprement dites, l'ouvrier doit orienter l'opération de manutention dès lors qu'il se trouve le mieux placé vis à vis des objets à transporter. D'où une augmentation de la durée de réalisation du produit fini, due au report du découpage de certaines pièces, le temps de transporter un lot de pièces déjà découpées.

Remarque:

Remarquons que l'une des alternatives à même d'éviter cette perturbation serait d'affecter un ouvrier supplémentaire à chaque machine, et ce serait à celui-ci qu'incombera le suivi de la manutention (cette alternative est adoptée par certaines unités de l'ENCC, notamment celle de la "Côte-Rouge" au Caroubier).

A la lumière de tous ces ingrédients, il n'est nul doute que la maîtrise de l'activité de manutention doit constituer l'un des axes centraux de tout système de gestion de la production.

CONCLUSION:

En définitif, la gestion des stocks d'en-cours, en somme "classique" dans un système de production en séries, est loin d'être facile à atteindre en industrie de la construction métallique. Cette complexité se manifeste non seulement par la nécessité d'aménagement d'aires de stockage ou de mise en oeuvre d'un dispositif d'identification efficace mais, aussi, par la gestion des moyens de manutention destinés à l'acheminement des produits vers leurs entrepôts respectifs.

Les *coûts de gestion des en-cours* dépendront du degré de contrôle des tâches "identification", "classement" et "manutention".

Appréciées en tant que variables du système de gestion, ces tâches paraissent *fortement corrélées*: toute perturbation de l'une influe sur l'état des deux autres. Les paramètres les plus influents du système de production étant cernés, nous nous retrouvons devant la problématique suivante:

Comment intégrer tous ces aspects dans un modèle de gestion de production global?

A travers l'analyse avancée, il nous est permis de dégager les objectifs de gestion qui suivent:

- *Utilisation optimale des moyens de manutention;
- *Réduction de l'hétérogénéité des stocks constitués.

Les deux objectifs énumérés renvoient, dans le contexte particulier de la construction métallique, à la résolution d'un problème, connu en recherche opérationnelle par "*Pattern Allocation Problem*". Ce point sera développé amplement au cours des chapitres suivants.

Chapitre Deuxième

ORDONNANCEMENT DE LA PRODUCTION

Approche via le "Pattern Allocation Problem"

INTRODUCTION:

Le contrôle de la tâche d'identification est bel et bien possible avant l'exécution de l'opération de découpage proprement dite. Comment?

Le passage des pièces découpées vers la phase montage obéit à une séquence définie proprement à chaque produit et indépendamment de la structure des modèles de découpes.

Aussi, au lieu de procéder à l'exécution des modèles de découpes de manière arbitraire, il est possible d'entreprendre une action tendant à *définir un ordre de succession des modèles de découpes sur la machine.*

De ce point de vue, le planificateur se retrouvera face à un nouveau problème:

Dans quel ordre découper les matériaux (tôles et barres), moyennant les modèles de découpes préalablement élaborés, de façon à minimiser l'effort d'identification des lots de pièces produits?

Un ordonnancement sera "optimal" si celui-ci minimise le *nombre de discontinuités* ou encore, *l'étendue de la commande.*

Ce problème est couramment connu sous le vocable de "*Pattern Allocation Problem*" (abréviation PAP) ou "*Cutting Sequence*".

Une *discontinuité* se produit lorsqu'une machine réalise partiellement la demande d'un certain type de pièces moyennant un modèle de découpes donné et, sur le modèle de découpes suivant, aucune pièce de ce même type n'est découpée.

L'*étendue de la commande* (order-spread) est la distance qui sépare les opérations de découpes de la première et la dernière pièce d'un même type.

Cette distance peut être mesurée en nombre de barres (ou tôles).

Si toute la commande est découpée sur une seule barre, l'étendue de la commande est 0. En revanche, si la commande est découpée complètement sur deux barres voisines, l'étendue de la commande est 1.

Remarques:

1. Le "Pattern Allocation Problem" concerne le découpage aussi bien des barres que des tôles. Pour alléger l'exposé, tout le raisonnement sera axé sur les barres, sauf indication complémentaire.

2. Nous convenons de limiter cette application à un seul produit sidérurgique (commande). Dès lors, le concept "commande", utilisé le long de cette section, ne désignera plus un "produit" mais, chaque groupe de pièces d'un même type qui composent ce produit.

3. La notion de *discontinuité* n'a de sens que si l'opération de découpage est amorcée.

Les méthodes de résolution du "PAP" ont été parcourues, de manière plus ou moins détaillée, par OUKIL [OUK-95].

Pour cette étape, nous ne voyons pas utile de rechercher une formulation nouvelle au problème, celle de MADSEN [MAD-88] répondant parfaitement aux objectifs.

Quant à l'approche de résolution, nous comptons reprendre la démarche suggérée par ce même auteur, histoire d'en mesurer l'efficacité une fois adaptée aux conditions propres à notre application.

I. APPROCHE DE RESOLUTION DU PROBLEME:

Dans la démarche qu'il propose, MADSEN [MAD-88] procède en trois étapes:

Etape 1 Résolution du problème de minimisation des chutes.

Pour l'application que nous envisageons, la première étape a déjà bénéficié d'une part plus que suffisante à la partie B de la présente étude.

La "Procédure de Résolution Hybride" a prouvé une efficacité certaine quant aux objectifs de gestion auxquels nous nous sommes intéressés. Parmi tous ces objectifs, nous insisterons

particulièrement sur la *minimisation du nombre de modèles de découpes*.

Il a été démontré qu'à travers la satisfaction de cet objectif, nous parvenions à réduire de manière conséquente le nombre de villes (modèles de découpes différents) à visiter.

Le coefficient de réduction associé à la PRH est près de 10.

Autant, les dimensions du PVC rendent sa résolution moins coûteuse.

Définition:

Le coefficient de réduction est le rapport de la moyenne du nombre de barres à stocker sur la moyenne du nombre de modèles de découpes correspondants.

Etape 2 Construction de la matrice C.

Concernant l'étape 2, MADSEN [MAD-88] propose un algorithme de construction de la matrice des coûts, lequel algorithme intègre les résultats de l'étape 1.

Puisque cet aspect de l'algorithme renforce l'objectif principal de l'étude, à savoir l'élaboration d'un modèle de gestion de production intégré, nous pensons utile de procéder de manière conforme à la démarche proposée par l'auteur. Voici, en bref, l'essentiel de cette procédure:

1. Soient p et q les modèles de découpes qui contiennent exclusivement des commandes singulières (des commandes qui figurent sur un modèle particulier et nulle part ailleurs).

Les coûts associés seront définis par:

$$C_{pj} = C_{jp} = 1\ 000 \quad \text{pour } p \neq j$$

$$C_{qj} = C_{jq} = 1\ 000 \quad \text{pour } q \neq j$$

$$C_{pq} = C_{qp} = 110 \quad \text{pour } p \neq q$$

Grâce à ces restrictions, il est possible d'identifier ces modèles "spéciaux", et rendre leur exclusion aisée par l'approche du

voyageur de commerce.

Après l'étape 2, ces modèles peuvent être placés premiers ou derniers dans la séquence.

Remarque:

L'emplacement des modèles à commandes singulières est indifférent (premiers ou derniers) s'agissant de la minimisation de l'étendue de la commande. Cette indifférence ne sera guère de bonne augure lorsque la gamme d'assemblage devra être intégrée. Ceci sera étudié au prochain chapitre.

2. Pour des modèles de découpes qui ont "r" commandes en commun, le coût c_{ij} est donné par:

$$c_{ij} = 100 - 10 \times r \quad (i=1, \dots, m) \text{ et } (j=1, \dots, m)$$

(Il est supposé que deux modèles peuvent avoir en commun au plus 10 commandes).

3. Les éléments diagonaux de la matrice C seront fixés à une valeur suffisamment grande:

$$c_{ii} = 10\ 000 \quad (i=1, \dots, m)$$

Exemple:

La phase 1, appliquée à un certain problème 1/V/I/R (ou 2/V/I/R), a permis de déterminer les modèles de découpes de la Figure.1.

Chaque colonne décrit un modèle de découpes. Les modèles de découpes produits sont numérotés de 2 à 6.

Les nombres portés à l'intérieur de chaque modèle correspondent aux types de pièces (commandes) qui y sont découpées.

Le modèle N=°1 est un modèle "fictif" introduit pour éviter une séquence de découpes circulaire.

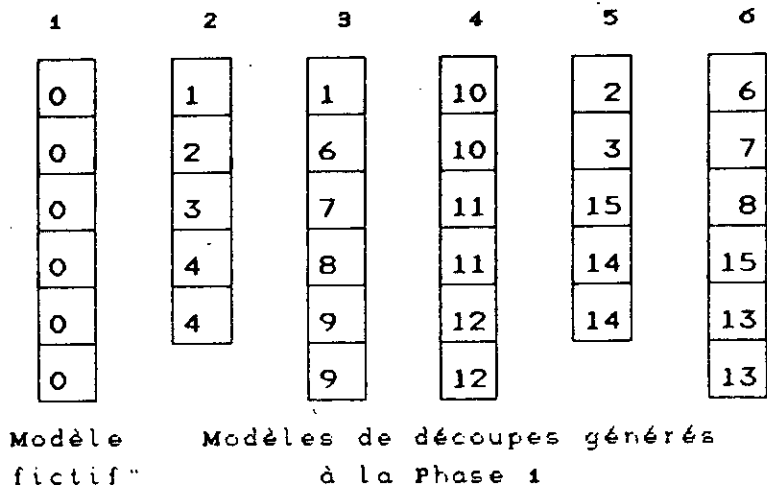


Figure n°1. Structure des modèles de découpes

L'application de l'algorithme pour le calcul des coûts fournit la matrice C telle que:

$$C = \begin{bmatrix}
 10000 & 1000 & 1000 & 110 & 1000 & 1000 \\
 1000 & 10000 & 90 & 1000 & 80 & 100 \\
 1000 & 90 & 10000 & 1000 & 100 & 70 \\
 110 & 1000 & 1000 & 10000 & 1000 & 1000 \\
 1000 & 80 & 100 & 1000 & 10000 & 90 \\
 1000 & 100 & 70 & 1000 & 90 & 10000
 \end{bmatrix}$$

Etape 3 Résolution du problème du voyageur de commerce.

Tous les paramètres du problème quantifiés, MADSEN [MAD-88] a utilisé, pour le résoudre, la méthode 3-opt de LIN [LIN-65]. La méthode 3-opt a été choisie parce qu'elle fournit de bonnes solutions en un temps de calcul raisonnable. Grâce à la réduction du nombre de sommets du graphe, le coût de recherche du chemin hamiltonien "optimal" se voit amoindri.

(L'ANNEXE.I.fournit l'essentiel sur les méthodes de résolution du Problème du Voyageur de Commerce).

II.APPLICATION:

La Procédure de Résolution Hybride (PRH) a déjà été déroulée pour le cas de la commande n°7. Celle-ci a conduit aux modèles de découpes dont la structure est décrite au tableau.A.

Modèle n°	Structure du modèle										PPCR
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	5
2	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	66
3	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	27
4	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	24
5	1	0	0	0	3	0	0	0	0	0	29
6	1	0	0	0	1	0	0	0	2	0	1
7	1	0	0	0	0	0	0	0	3	0	18
8	0	0	1	0	0	0	2	0	2	0	16
9	0	0	2	0	0	5	0	0	0	0	2
10	0	0	0	0	0	3	1	0	2	0	1
11	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	12
12	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	6
13	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	1
Total	208 barres										
Taux global des chutes = 2.114%											

Tableau.A. Structure des modèles de découpes de la commande n°7

Une première analyse présente la commande n°7 comme la plus

"large" dès lors qu'elle nécessite un stock de 208 barres de 8 mètres de long.

Parallèlement, le nombre de modèles de découpes requis n'excède pas 12, en excluant le dernier modèle généré.

Le coefficient de réduction équivaut, ainsi, à près de 17.

Par ailleurs, un examen minutieux des structures des modèles de découpes permet de distinguer un seul modèle "singulier": le modèle n°1.

II.1. Construction de la matrice des coûts:

Le nombre total de modèles de découpes (13), augmenté du modèle "fictif" (n=°0), la matrice des coûts C sera une matrice carrée symétrique d'ordre 14, représentée comme suit:

C=	100	1.1	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
		100	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
			100	.9	1	1	1	1	1	1	1	1	1
				100	.9	1	1	1	.8	.9	.9	1	1
					100	.9	.9	.9	.9	.9	1	1	1
						100	.8	.9	1	1	1	1	1
							100	.8	.9	1	.9	1	.9
								100	.9	1	.9	1	.9
									100	.9	.8	1	.9
										100	.9	.9	1
											100	.9	.9
												100	1
													100

Les coûts illustrés par la matrice C représentent le $1/100^{\text{ème}}$ des valeurs calculées. Et, en raison de la symétrie de C, nous n'avons reporté que les éléments situés à droite de la diagonale.

A ce stade, les données en notre possession suffisent pour la résolution d'un PVC où le nombre de villes visitées est 14.

II.2. Résultats et commentaires:

Les méthodes 2-opt et 3-opt^[LIT] ont été implémentées en langage PASCAL par les étudiants de 5^{ème} année Génie-Industriel (1995). L'exécution du programme a permis d'obtenir une tournée (figure n°2.a) d'étendue $Z=1970$, au bout de 2 secondes seulement, sur un micro-ordinateur PC-286.

Un temps de calcul aussi faible a, certainement, été favorisé par la taille du problème traité. Situation qui aurait été plus complexe si nous disposions d'autant de modèles de découpes que de barres (208).

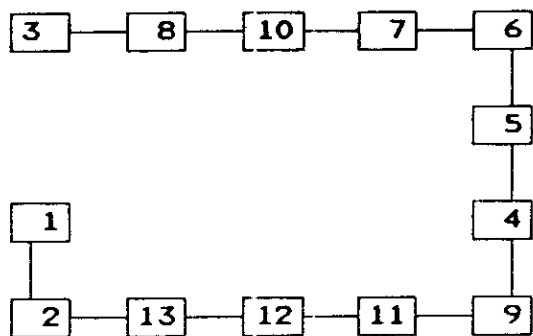
Nous estimons qu'une étendue de valeur $Z=1970$ est intéressante dès lors que si tous les arcs avaient pour valeur le coût minimal (soit $c=80$), l'étendue serait $Z^*=1880$).

Remarques:

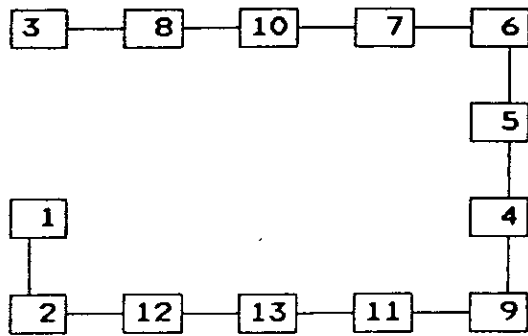
1. Les chemins $\boxed{13} - \boxed{12} - \boxed{2}$ et $\boxed{12} - \boxed{13} - \boxed{2}$ sont de même coût.

Conséquemment, nous pouvons adjoindre à la séquence de la figure.2.a une autre séquence optimale (figure.2.b).

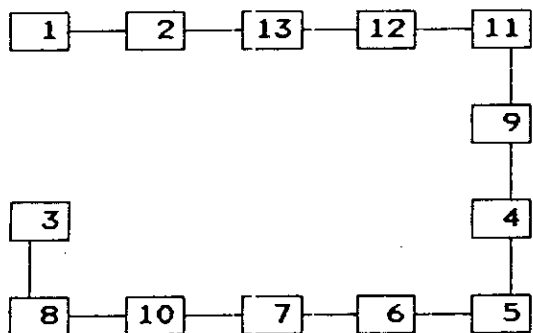
2. En raison de la symétrie de la matrice des coûts, deux autres séquences sont possibles (figures.2.b et 2.c).



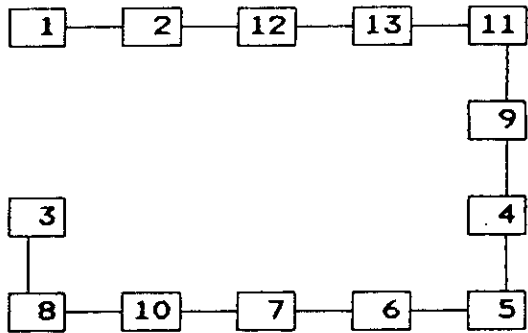
-a-



-b-



-c-



-d-

Figure.2. Séquences de découpage "optimales"

CONCLUSION:

Moyennant les modèles de découpes du tableau.A, l'effort d'identification des pièces de la commande n°7 ne sera à son seuil minimal (Z=1970) que si les opérations de découpage des modèles générés sont obéissent à l'une des quatre séquences décrites par la figure n°2.

Cette démarche est parfaitement plausible dans un système de gestion de production où l'évolution des produits dans l'espace (stocks intermédiaires) et le temps (délai de fabrication) est un détail subsidiaire.

Dans la réalité, ceci n'est point le cas. Aussi, au CHAPITRE TROISIEME, nous essayerons d'inclure, dans l'ordonnancement de la production, d'autres paramètres de gestion dont l'impact est non négligeable.

Chapitre Troisième

ORDONNANCEMENT DE LA PRODUCTION

via une procédure heuristique intégrée

INTRODUCTION:

La résolution du "Pattern Allocation Problem" permet certainement de répondre à l'aspect "homogénéité" des en-cours. Le problème d'ordonnement de la production, vu de cet angle, tend à être perçu comme un processus "statique": il n'a été tenu compte ni de l'évolution du système dans le temps, ni de l'influence d'autres composantes du système de production sur sa "dynamique".

La projection des modèles de découpes sur la gamme de production crée, inéluctablement, une perturbation du système de gestion de la production. Cette perturbation se manifeste à travers un décalage de l'opération de découpage d'un type donné de pièces par rapport à la position que celle-ci occupe sur la gamme de production.

Ainsi, tout retard (décalage avant) accusé par une tâche, se répercute immédiatement sur le délai total de réalisation du produit.

Une exécution en avance (décalage arrière) de la tâche permet d'économiser du temps sur le date de fin au plus tard du produit. En revanche, cette situation appelle des dispositions supplémentaires en matière de gestion des en-cours.

Dans ce chapitre, nous tenterons d'approcher le problème d'ordonnement de la production, mais, de manière à *intégrer* un maximum des paramètres qui régissent cette "dynamique".

Il sera notamment question de trouver une séquence pour l'exécution des modèles de découpes de telle sorte que *la suite des pièces découpées coïncide au mieux avec la gamme de production.*

I. FORMULATION DU PROBLEME:

Dans notre cas, une gamme de production décrira la séquence de montage d'une série de pièces, de même critère "dominant", découpées sur une même machine et destinées pour la fabrication d'un même produit fini.

PRODUITS													TEMPS
	3	3	2	5	10	4	8	8	8				P1
	1	1	2	4	15	3	3	3	3	1	3	1	P2
	3	4	4	9	10	11	1	8					P3

Figure n°1. Structure de la gamme de production

La figure.1. illustre une gamme de production: les numéros identifient les types de pièces et la fréquence d'un numéro désigne le nombre de pièces de ce type qui composent le produit fini.

Remarque:

Par tâche, nous entendons le découpage d'une pièce correspondant à une date bien définie de la gamme de production.

Dans le contexte particulier de la construction métallique, nous ne connaissons pas de formulation au problème d'ordonnancement de la production.

A cet effet, nous avons vu que le problème pouvait être modélisé en une suite de *problèmes d'affectation de lots de modèles de découpes* à la gamme de production, de manière à minimiser un coût global que nous spécifierons plus tard.

Notations:

x_{ij} est une variable booléenne qui se comporte telle que spécifié par le PLNE.

c_{ij} est le coût de l'affectation (i,j).

Pratiquement, ce coût peut être quantifié par divers paramètres, allant nécessairement dans le sens des critères d'évaluation d'un ordonnancement (vus au CHAPITRE DEUXIEME).

$$\text{Minimiser } Z = \sum_i \sum_j c_{ij} \times x_{ij}$$

$$\text{Sujet à: } \sum_i x_{ij} = 1 \quad (j=1, \dots, m)$$

$$\sum_j x_{ij} = 1 \quad (i=1, \dots, m)$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si le lot de modèles } j \text{ est affecté à la} \\ & \text{sous-gamme } i. \\ 0 & \text{sinon avec } i \neq j \text{ pour } i=1, \dots, m \text{ et } j=1, \dots, m. \end{cases}$$

II. APPROCHE DE RESOLUTION DU PROBLEME:

Pour minimiser les en-cours, l'approche "triviale" consiste à découper des barres conformément à la gamme de production, sans se soucier du taux de chutes occasionné.

Ceci suppose que la phase "élaboration des modèles de découpes" doit être complètement ignorée.

Pratiquement, l'antagonisme entre ces deux phases peut être géré en concevant une procédure "intégrée", dont la finalité serait une conciliation des deux objectifs principaux que sont:

- .La minimisation des chutes.
- .La minimisation des en-cours.

Pour approcher ce problème, nous avons convenu d'axer notre raisonnement sur les modèles de découpes fournis par la *Procédure de Résolution Hybride*.

Disposant de ces modèles, nous entreprîmes un ordonnancement de la production des pièces (découpage) par une projection de ces mêmes modèles sur la gamme de production.

Dans cette perspective, nous avons développé un algorithme que nous avons appelé "algorithme des scores".

Algorithme heuristique pour l'ordonnement de la production

PAS 1 Construction de la sous-gamme:

Désormais, nous allons procéder à une *désagrégation "progressive"* de la gamme de production en sous-gammes. Une sous-gamme sera définie comme un ensemble de pièces à découper, prises dans l'ordre de leur succession sur la gamme, en quantités compatibles avec la fréquence du modèle de découpes considéré. Aussi, la $r^{\text{ème}}$ sous-gamme S_r sera:

$$S_r = \left\{ l_k, k=d(r), \dots, f(r): Nb_j=R_j \right\}$$

où:

$d(r)$ est l'indice de la pièce qui se trouve en tête de la sous-gamme r .

$f(r)$ est l'indice de la pièce qui intervient en dernier sur la sous-gamme r .

R_j est la fréquence du modèle de découpes j .

Nb_j est le nombre de barres à "délimiter" sur la gamme.

En d'autres termes, la création des sous-gammes n'est autre que l'"*ordonnement*" des pièces de la commande sur les barres, conformément à la suite $\left(l_k \right)_k$ définie par la gamme de production.

PAS 2 Identification des objets de l'ordonnement:

Par objets d'ordonnement, nous entendons les structures des sous-gammes et des modèles de découpes.

Pour décrire la structure de la $r^{\text{ème}}$ sous-gamme, introduisons un vecteur g_r tel que: $g_r = \left(g_{1r} \ g_{2r} \ \dots \ g_{nr} \right)$.

g_r signifie que la sous-gamme "r" est constituée de g_{ir} pièces de type i ($i=1, \dots, n$).

A la phase "*Planification de la production*", nous sommes parvenus à répartir la commande sur "m" types de modèles de découpes x_j , disponibles en quantités respectives R_j tels que:

$$x_j = \left(x_{1j} \ x_{2j} \ \dots \ x_{nj} \right) \quad (j=1, \dots, m).$$

En disposant les modèles ainsi désignés dans une matrice M, nous obtenons la *matrice des modèles de découpes* suivante:

$$M = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{21} & \dots & x_{n1} \\ x_{12} & x_{22} & \dots & x_{n2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{1m} & x_{2m} & \dots & x_{nm} \end{bmatrix}$$

PAS 3 Analyse du stock produit par un modèle de découpes:

A ce stade, il faudra confronter la sous-gamme "r" au lot de pièces du modèle de découpes en compétition.

Sous l'hypothèse qu'un lot retenu doit être entièrement découpé (*tâche non interruptible*), nous déterminons le *niveau des en-cours* produits par chaque modèle.

Pour chaque type i de pièces, le niveau du stock résultant du découpage d'un modèle j sera:

$$S_{ij} = R_x x_{ij} - g_{ir} \quad (i=1, \dots, n) \text{ et } (j=1, \dots, m).$$

.Si $S_{ij} > 0$ alors, le modèle j crée une sur-production en pièces de type i.

.Si $S_{ij} = 0$, la demande figurée par la sous-gamme "r", pour les pièces de type i, est totalement satisfaite.

.Si $S_{ij} < 0$, ceci dénote une sous-production donc, une rupture de stocks "provisoire" en pièces de type i.

PAS 4 Choix des objectifs:

Au regard des états possibles des stocks, soient:

Cp_i le coût de la rupture de stocks provoquée par une pièce de type i.

P l'ensemble des pièces pour lesquelles il y a rupture de stocks.

Cs_i le coût de gestion d'un stock d'une unité de la même pièce.

S l'ensemble des pièces à stocker.

Minimisation du coût "global" de gestion des en-cours:

Le coût "global" de gestion des en-cours inhérents à un modèle de découpes j sera:

$$C_j = \sum_{i \in P} C_{p_i} \times S_{ij} + \sum_{i \in S} C_{s_i} \times S_{ij} \quad (j=1, \dots, m) \quad (1)$$

De l'expression (1), il n'y a que le second terme (coût de possession du stock) qui pourrait être calculé, si certaines conditions sont réunies sur le plan de la saisie et du traitement des informations.

Quant au premier terme (coût de l'insuffisance du stock), les gestionnaires s'accordent qu'il est difficilement cernable, en raison des paramètres, souvent subjectifs, qui le composent.

D'ores et déjà, pour contourner ces difficultés, nous renonçons à l'aspect "coût" proprement dit, que nous tenterons de combler par d'autres paramètres d'évaluation.

Minimisation du retard occasionné par un modèle:

Le coût d'un stock, qu'il soit positif ou négatif, dépend à la fois du nombre d'articles qui le composent ainsi que de la durée de son existence.

Soient d_{ij} l'instant auquel une pièce de type i est effectivement découpée sur le modèle de découpes j.

a_i la date prévue pour le réceptionnement de cette même pièce.

Remarque:

Il est utile de préciser que le réceptionnement d'une pièce n'équivaut nullement à la date programmée pour son assemblage. Une pièce peut être livrée à l'atelier "Assemblage-soudure" à une date donnée alors que l'opération d'assemblage n'a effectivement lieu qu'à une date ultérieure.

Désignons par t_{ij} le délai qui sépare ces deux instants:

$$t_{ij} = a_i - d_{ij} \quad (i=1, \dots, n)$$

Si $t_{ij} > 0$ alors, ce délai constituera une "avance" sur la date de réception prévue. La pièce ainsi produite devra être stockée au niveau de l'atelier "Débit-usinage" en l'attente de son réceptionnement.

Pour ce cas, t_{ij} sera noté tp_{ij} .

Si $t_{ij} < 0$, la durée totale de production va subir un "retard", dû à une insuffisance en pièces de type i .

Ce retard sera identifié par ts_{ij} .

Si $t_{ij} = 0$, cas, en somme très rare, ceci sous-entend que les pièces produites sont livrées immédiatement après le découpage. Autrement, la durée de stockage de la pièce i sera supposée nulle (il s'agit du stockage au niveau de l'atelier "débit-usinage").

Remarque:

Le délai t_{ij} inclut implicitement la durée de l'opération de manutention. Une telle intégration est d'autant plus confortée par le fait que cette durée est la même quelle que soit la quantité de pièces transportées (à condition que la manutention ait lieu sur le même itinéraire).

Moyennant les délais sus-définis, l'objectif de départ se transforme en une *minimisation du retard* occasionné par le découpage d'un modèle j .

$$T_j = \sum_{i \in P} tp_{ij} + \sum_{i \in S} ts_{ij} \quad (j=1, \dots, m) \quad (2)$$

Minimisation du niveau des stocks d'en-cours:

Soit λ_i la cadence de production d'une machine pour des pièces de type i (nombre de pièces découpées par unité de temps).

Sur une période de temps t_{ij} , le nombre de pièces découpées sera:

$$S_{ij} = \lambda_i \times t_{ij} \quad (j=1, \dots, m) \quad (3)$$

Comme les pièces sont produites à une même cadence ($\lambda_i = \lambda$ pour tout $i=1, \dots, n$), la durée de l'opération de découpage tend à se confondre avec le nombre de pièces.

L'expression (3) s'écrira:

$$S_{ij} = \lambda \times t_{ij} \quad (j=1, \dots, m) \quad (4)$$

De là, nous déduisons, à partir de l'équation (2), la nouvelle forme du retard occasionné par un modèle de découpes j :

$$T_j = \sum_{i \in P} (s_{ij} \wedge \lambda) + \sum_{i \in S} (s_{ij} \wedge \lambda) \quad (j=1, \dots, m) \quad (5)$$

λ est constante. Par suite, minimiser T_j revient à minimiser:

$$T'_j = \sum_{i \in P} s_{ij} + \sum_{i \in S} s_{ij} \quad (j=1, \dots, m) \quad (6)$$

Le terme exprimé en (6) n'est autre que le niveau "global" du stock produit par le découpage d'un modèle j .

Remarque:

Pour mieux apprécier l'incidence des deux situations (en-cours et rupture), nous avons considéré les deux objectifs séparément.

PAS 5 Analyse des similitudes entre modèles:

Si, au même moment, plusieurs modèles de découpes répondent à la valeur optimale du critère d'appréciation, leur classement par ordre de préférence devient indispensable.

Pour le classement, nous avons décidé de pondérer les modèles candidats en les confrontant à la sous-gamme.

Supposons connus l'ensemble J des modèles candidats et l'ensemble I des pièces qui constituent la sous-gamme.

$$I = \left\{ i; i=1, \dots, n: g_{ir} \neq 0 \right\}$$

Désignons par Y_{ij} la variable booléenne définie par:

$$Y_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si le modèle } j \text{ contient une pièce de type } i. \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

De là, le "score" d'un modèle j sera calculé par:

$$Z_j = \sum_{i \in I} Y_{ij} \quad j \in J \quad (7)$$

Le modèle "s" qui sera retenu est tel que:

$$Z_s = \max_{j \in J} (Z_j) \quad (8)$$

Autrement, le modèle "s" sera celui qui satisfait au moindre coût la demande de la sous-gamme, tenant compte de la diversification de la production (produire le maximum de types différents).

Remarque:

Ce critère de "maximisation", bien que soutenable du point de vue des exigences de la gamme de production, peut devenir néfaste s'il est perçu par rapport au système de production global. En fait, plus diversifié sera le stock de pièces constitué, plus coûteuse sera sa gestion.

Vue la structure des modèles de découpes générés, la probabilité qu'il y'ait multiplicité du "score" maximal est très faible. Dans pareille situation, un modèle de découpes quelconque sera choisi arbitrairement parmi les modèles à "score" maximal.

PAS 6 Actualisation de la gamme de production:

En définitif, soit x_s le modèle de découpes retenu.

$$x_s = \begin{pmatrix} x_{1s} & x_{2s} & \dots & x_{ns} \end{pmatrix}$$

A ce niveau, il s'agira de réajuster la commande de telle sorte que les pièces qui figurent sur le modèle de découpes "s" soient évacuées dans l'ordre de leur succession sur la gamme de production.

Une fois cette opération achevée, la gamme est remise à jour, par un réordonnancement des pièces qui restent. Le processus est repris depuis le *PAS 1* pour le choix d'un autre modèle de découpes.

Remarque:

Rappelons que toute itération du processus ci-dessus conduit au choix d'un modèle unique.

PAS 7 Evaluation de l'horizon de planification:

En fin de la procédure, nous obtenons la séquence de découpage qui satisfait aux objectifs fixés au départ.

Du point de vue du planificateur, connaître le niveau des stocks intermédiaires est un élément de gestion essentiel.

Les entreprises de construction métallique, travaillant généralement à la commande, le plus important, ce serait de disposer d'éléments à même de renforcer la position de l'entreprise lors de la négociation d'un contrat.

Le délai à suggérer au client peut, ainsi, être déduit de la procédure précédente, connaissant les paramètres "durées" de production.

CONCLUSION:

Quoiqu'on doive penser du comportement d'un algorithme, il n'est point possible de prononcer un quelconque jugement qui puisse être définitif sans soumettre ledit algorithme à des tests.

Cette rigueur étant de fait, nous lui avons réservé le chapitre prochain. D'un certain point de vue, nous comptons apprécier de manière plus ou moins objective les insuffisances de la procédure de MADSEN [MAD-88] ou, tout au plus, son inadéquation à des systèmes de production plutôt complexes.

Chapitre Quatrième

ALGORITHME DES "SCORES" EN ORDONNANCEMENT DE LA PRODUCTION

INTRODUCTION:

La problématique se situe toujours dans un flow-shop à 2 machines réalisant chacune, prises dans cet ordre, les opérations de "découpage" et de "montage".

Tout algorithme d'ordonnancement de la production, appréhendé dans ce cadre, se doit de construire une séquence d'exécution de la première opération (découpage) sous les contraintes techniques posées par l'opération suivante (montage).

A cet effet, l'algorithme des "scores" est conçu pour répondre à cet objectif.

Lorsque nous avons appliqué le "Pattern Allocation Problem", nous avons vu que la procédure de MADSEN [MAD-88] reposait exclusivement sur le critère de minimisation de l'étendue globale d'une commande. Par opposition à cela, l'algorithme des "scores" entreprend une appréciation de l'ordonnancement sur la base de critères qui accordent une priorité à l'intégration des deux phases du processus de fabrication; L'étendue globale d'une commande n'en sera qu'une conséquence.

A travers le prisme des critères d'appréciation d'un ordonnancement, nous avons axé notre intérêt sur l'état des stocks et ses diffractions dans le temps (délai de fabrication) et dans l'espace (stocks en-cours et ruptures de stocks).

Nous rappelons, une seconde fois, que cette étude concerne toujours un prototype unique: la commande n°7.

Aussi, dans ce chapitre, nous commencerons par décrire une procédure de génération des gammes d'assemblage.

Juste après, nous examinerons la qualité des résultats produits par l'algorithme des "scores" par des paramètres de performance différents.

Des conclusions tirées de cette étape, nous tenterons une amélioration de l'algorithme des "scores", de manière à y intégrer le critère "minimisation de l'étendue de la commande".

I.GENERATION DES GAMMES D'ASSEMBLAGE:

Pour la génération des gammes, nous avons pensé que, pour éviter de reprendre toutes les commandes générées dans la partie II de l'étude, il suffirait d'en choisir une seule.

Pour garantir l'examen d'un maximum de situations pratiques, notre choix fut porté sur la commande de plus grande taille en termes de nombre de barres nécessaires à sa réalisation.

Chaque pièce de la commande est considérée comme unité.

Le nombre d'individus qui composeront la commande sera:

$$p = \sum_{i=1}^n n_i$$

où "n" est le nombre de types de pièces différents.

En second lieu, nous allons procéder à un tirage aléatoire sans remise individu par individu. A chaque tirage, chaque individu se verra doté d'un ordre de classement, auquel sera associé l'indice du type de pièces qui lui correspond.

Le 1^{er} individu prélevé sera classé à k=1 et correspondra à une pièce de type q₁;

Le k^{ème} individu, placé à l'adresse k, a pour identité le type de pièces q_k;

Le dernier individu extrait sera positionné à l'adresse k=p et identifiera la dernière pièce de la gamme.

II.APPLICATION DE L'ALGORITHME DES " SCORES ":

II.1.Minimisation des stocks d'en-cours:

Soient deux modèles de découpes A et B, en concurrence à une date t du processus de fabrication.

A cette date t, les demandes "agrégées" (tous types de pièces confondus) exprimées par l'atelier montage sont:

.100 pièces si le modèle A est retenu.

.200 pièces sinon.

Cette différence est, tout simplement, due au fait que le modèle B est reproduit plus que le modèle A (PPCR [B] > PPCR [A]).

Parallèlement, si nous procédons au découpage de chacun des deux modèles, ces derniers produiraient, une fois leur demande respective (ou une partie de cette demande) satisfaite, des volumes d'en-cours de:

.10 pièces si le modèle A est découpé.

.15 pièces sinon.

Cet exemple à l'appui, nous allons montrer que l'état des stocks peut être évalué à travers deux politiques différentes:

Première politique: le choix du modèle de découpages "optimal" est basé sur une comparaison "absolue" des volumes des stocks d'en-cours, ce qui veut dire que le modèle A, confronté au modèle B, sera meilleur dès lors qu'il conduit à un volume d'en-cours moins important ($10 < 15$). Ce qui est conforme au principe "classique" de gestion des en-cours.

Seconde politique: un stock d'en-cours, produit par un modèle de découpages donné, sera apprécié "relativement" à la demande que ce dernier est appelé à satisfaire.

Cette fois, le modèle B est meilleur que le modèle A puisque le rapport du volume des en-cours à la demande se trouve plus réduit pour le premier modèle ($15/200 < 10/100$).

Autrement, cette dernière politique intègre implicitement le critère de satisfaction de la demande au plus tôt.

Aussi, nous parlerons de minimisation :

.des niveaux d'en-cours, s'agissant de la première politique,

.des taux des stocks d'en-cours, dans le cas de la seconde politique.

II.1.1. Minimisation des stocks d'en-cours:

Le niveau des stocks d'en-cours est défini comme valeur absolue du nombre de pièces stockées à la date t , en l'attente d'être assemblées à une date ultérieure.

Ce paramètre adopté, nous avons implémenté l'algorithme des "scores" en langage PASCAL. Le programme ainsi conçu a été déroulé, pour les 10 gammes d'assemblage générées, sur un micro-ordinateur OLIVETTI M300-04 (386).

Le temps moyen d'une exécution est de 3 secondes.

Pour chaque gamme d'assemblage, le programme fournit trois résultats principaux:

- .le niveau moyen des stocks d'en-cours.
- .le niveau moyen des ruptures de stocks.
- .l'ordonnancement optimal des modèles de découpes sur la machine.

Les résultats se trouvent détaillés en ANNEXE.J.

Remarque:

Le niveau moyen des ruptures de stocks n'est considéré que pour mesurer les interférences entre deux états de stocks opposés.

Le critère de minimisation des ruptures de stocks sera examiné à la section II.2.

a. Analyse des stocks d'en-cours:

Comme le nombre de modèles de découpes élaborés pour la commande n°7 est de l'ordre de 13, les stocks d'en-cours vont se constituer sur 12 périodes différentes.

Chaque période est marquée par le découpage d'un modèle de découpes donné.

Par conséquent, en désignant par St_{ij} ($j=1, \dots, 12$) le niveau des en-cours produits à la période j pour la fabrication du produit i , le niveau moyen des en-cours sera:

$$E_i = \sum_j \left(St_{ij} / 12 \right) \quad (i=1, \dots, 10).$$

Les valeurs obtenues sont reportées au tableau n°1.

Gamme n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
E_i	31	29	30	28	29	28	30	28	30	31

Tableau n°1. Niveaux moyens des en-cours de fabrication

Ces résultats montrent que le niveau moyen des en-cours est pratiquement une fonction constante de la gamme de production.

Statistiquement, ceci est confirmé par l'écart quadratique moyen, dont la valeur avoisine 1 ($\sigma=1.11$).
Ce constat nous pousse à énoncer la proposition suivante:

Proposition de proposition:

En procédant à l'opération de découpage d'une commande déterminée (en nombres de pièces de chaque type), le niveau moyen des en-cours susceptibles d'être produits serait pratiquement le même quelque soit le produit auquel cette commande serait destinée.

Conséquence:

Sous l'hypothèse de généralisation de la proposition énoncée, le gestionnaire serait en mesure de:

.Prévoir, en commettant une erreur relativement faible, le coût de gestion des en-cours.

.Estimer les contours des aires de stockage à aménager pour les stocks d'en-cours.

b.Ponderation des stocks d'en-cours:

Soit Sp_{ij} le niveau de rupture des stocks occasionné à la période j ($j=1, \dots, 12$) lorsque le produit i est fabriqué ($i=1, \dots, 10$).

Notons par G_i le poids de la rupture du stock correspondant au produit i et mesuré par rapport à l'ensemble de tous les produits examinés (10 produits).

$$G_i = \left[\sum_j Sp_{ij} \right] / \left[\sum_i \sum_j Sp_{ij} \right] \quad (i=1, \dots, 10).$$

Ce coefficient, affecté à la valeur E_i du tableau n°1, nous obtenons le niveau moyen pondéré des stocks d'en-cours $\left[EP_i \right]$.

Gamme n=°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
EP _i	33.3	25.1	31.6	28.2	29.8	24.7	30.8	27.5	29.7	33.6

Tableau n=°2. Niveaux moyens pondérés des en-cours de fabrication

En opérant un test de WILCOXON [WIL-65], nous allons évaluer l'effet de cette pondération sur les conclusions avancées en a.

L'hypothèse à tester est:

$$H_0: EP_i = E_i \text{ contre } H_1: EP_i \neq E_i \quad (i=1, \dots, 10).$$

Après test, la différence entre les deux échantillons ne serait pas significative, avec un risque de se tromper de 5%.

En fait, au delà de son sens théorique, une telle conclusion entraîne une autre, encore plus importante:

Pratiquement, l'effet des ruptures de stocks est, en moyenne, insignifiant quant au choix d'un modèle de découpes à une période donnée.

D'ores et déjà, ceci nous permet d'écarter l'examen simultané des paramètres "stock en-cours" et "rupture des stocks", comme nous l'envisagions au *CHAPITRE TROISIEME*.

c. Ordonnement des modèles de découpes:

La finalité de l'algorithme des "scores" est moins l'optimisation de certains paramètres de gestion que la recherche d'une séquence optimale pour le découpage des barres.

Aussi, pour chaque produit fabriqué, nous obtenons un ordonnancement particulier des modèles de découpes et, ceci, conformément aux spécificités de la gamme de production.

Les séquences de découpage associées à l'échantillon des gammes générées sont données par le *Tableau n=°3*.

Un premier examen des séquences de découpage "optimales" appelle les observations suivantes:

.L'étendue de la séquence est uniforme, évaluée à 2970.

.Quelle que soit la gamme de production, les séquences de découpage présentent des itinéraires similaires, à une ou deux permutations près.

Gamme n=°	Ordonnancement des modèles de découpes	Etendue
1	13->6->10->1->9->12->4->3->7->2->5->8->11	2970
2	13->6->10->1->9->12->3->4->2->5->8->7->11	2960
3	13->6->10->1->9->12->4->3->7->2->5->8->11	2970
4	13->6->10->1->9->12->3->4->2->5->8->7->11	2970
5	13->6->10->1->9->12->4->3->7->2->5->8->11	2970
6	13->6->10->1->9->12->4->3->7->2->5->8->11	2970
7	13->6->10->1->9->12->3->4->7->2->5->8->11	2970
8	13->6->10->1->9->12->4->3->2->5->8->7->11	2970
9	13->6->10->1->9->12->4->3->7->2->5->11->8	2970
10	13->6->10->1->9->12->4->3->7->2->5->8->11	2970

Tableau n=°3.

Ordonnancement des modèles de découpes sur la machine

Comparé à l'étendue "optimale" (Z=1970) fournie par la procédure de MADSEN [MAD-88], l'effort d'identification à consentir dans ce cas est beaucoup plus conséquent, l'écart étant de 1000.

Toutefois, cet écart s'expliquerait par l'intervention du modèle "singulier" (modèle n=°1) en cours de la séquence.

Par ailleurs, l'uniformité de l'étendue, ajoutée à la forte similitude entre séquences de découpage, pourraient constituer une confirmation de la proposition formulée à l'endroit de l'état des niveaux moyens des stocks.

II.1.2. Minimisation des taux des en-cours:

Le taux des en-cours est une valeur relative, calculée par rapport à la demande d'une période de fabrication donnée. C'est le pourcentage de pièces stockées en l'attente de l'assemblage.

Si T_{ij} est le taux des en-cours produits à la période j lors de la fabrication du produit i, alors:

$$Tt_{ij} = St_{ij} / D_j \quad (i=1, \dots, 10).$$

où:

D_j est le nombre de pièces de la gamme de production, délimitées par la fréquence R_j du modèle de découpes j ($R_j = PPCR_j$).

Délimiter R_j barres sur la gamme de production revient à procéder à un "chargement" des pièces de la gamme sur des barres, en respectant l'ordre de succession de ces pièces, jusqu'à ce que le nombre de barres chargées équivale à R_j .

Sitôt, D_j sera le nombre de pièces affectées à ces barres, tous types de pièces confondus.

La résolution de ce problème, traduit en PASCAL, a permis d'obtenir les résultats présentés en ANNEXE.K.

Remarque:

Le calcul du taux des en-cours reste relatif à la période. En l'occurrence, pour notre analyse, au lieu d'utiliser ces taux, nous avons préféré retenir les niveaux des stocks qui leur correspondent. Ce qui nous ramène à des conditions de travail semblables à celles de la section précédente.

a. Analyse des stocks d'en-cours:

La démarche demeurant inchangée, les stocks moyens alloués à chaque produit i sont présentés au tableau n°4.

Gamme n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
E_i	29	29	29	28	30	28	29	29	30	28

Tableau n°4. Niveaux moyens des en-cours de fabrication

L'aspect des résultats ne laisse aucun doute quant à l'uniformité des stocks moyens des en-cours. Visiblement, les niveaux moyens des stocks se trouvent concentrés autour de 29, chose que confirment une moyenne $\bar{E} = 28.9$ et un écart-type $\sigma = 0.7$.

A cet effet, les propositions énoncées plus haut seraient autant valables.

b. Ponderation des stocks d'en-cours:

Au tableau n°5, nous avons donné les moyennes pondérées des stocks d'en-cours, lorsque le critère d'appréciation est la minimisation des taux d'en-cours.

Gamme n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
EP _i	29.8	27.4	29.0	27.3	31.1	26.5	28.3	29.2	32.5	27.7

Tableau n°5. Niveaux moyens pondérés des en-cours de fabrication

Les circonstances de l'optimisation étant relativement différentes de celles de la section précédente, il y a lieu de retester l'hypothèse H₀.

Nous aboutîmes à la conclusion que les en-cours moyens et les en-cours moyens pondérés ne diffèrent pas de façon très sensible. Ceci étant avec un risque d'erreur $\alpha=5\%$.

c. Ordonnement des modèles de découpes:

Cette fois, nous constatons que, pour 50% des cas, l'étendue de la séquence de découpage est 2950, valeur très proche de l'étendue moyenne (plus exactement, $\bar{E}=2953$).

D'un autre côté, un écart-type avoisinant 10 ($\sigma=11$) peut être un indice de similitude des séquences de découpage optimales, à une discontinuité près.

En moyenne, nous noterons, tout de même, une amélioration de l'étendue puisque celle-ci passe de 2970 (cas de la minimisation des stocks d'en-cours) à 2950. Par contre, l'écart, mesuré par rapport à l'étendue optimale ($Z=1970$), reste prononcé et, une fois encore, ceci est une conséquence du modèle "singulier".

Gamme n°	Ordonnement des modèles de découpes	Etendue
1	2->13->1->4->10->3->5->12->9->7->8->11->6	2980
2	2->13->1->4->3->6->5->10->8->9->7->11->12	2940
3	13->2->1->4->3->7->5->9->8->11->12->6->10	2950
4	13->2->1->4->3->5->10->12->9->8->7->11->6	2960
5	2->13->4->1->3->6->12->5->9->8->10->7->11	2950
6	13->2->1->4->3->6->5->10->12->9->7->8->11	2950
7	13->6->2->1->4->3->7->5->9->10->8->11->12	2940
8	2->1->4->13->3->12->5->9->8->10->7->11->6	2960
9	13->1->2->4->3->6->12->5->9->10->7->8->11	2950
10	13->6->2->1->4->3->7->5->9->8->11->12->10	2950

Tableau n°6.

Ordonnement des modèles de découpes sur la machine

II.2.Minimisation des ruptures de stocks:

Pour cette étude, les définitions des concepts ne diffèrent que par le fait qu'ici, il n'est plus question de stocks d'en-cours mais de ruptures de stocks.

De là, nous procéderons identiquement au paragraphe II.1.

Par ailleurs, une mise au point des symboles utilisés est indispensable.

Nous adopterons les notations suivantes:

Sp_{ij} sera le niveau de rupture des stocks produit à la période j

en fabricant le produit i avec ($i=1, \dots, 10$) et ($j=1, \dots, 12$).

P_i est le niveau moyen de rupture des stocks associé au produit i

et défini par:

$$P_i = \sum_j \left(Sp_{ij} / 12 \right) \quad (i=1, \dots, 10)$$

H_i désignera le poids des en-cours produits au cours du processus de fabrication du produit i .

$$H_i = \left(\sum_j st_{ij} \right) / \left(\sum_j \sum st_{ij} \right) \quad (i=1, \dots, 10)$$

PP_i est le niveau moyen pondéré des ruptures de stocks

$$PP_i = H_i \times P_i \quad (i=1, \dots, 10)$$

II.2.1. Minimisation des niveaux de ruptures des stocks:

Par simple projection de la définition du niveau des stocks d'en-cours, le niveau de rupture des stocks serait le nombre de pièces dont la demande est exprimée par la gamme de production pour une date t et que le modèle de découpes n'a pu satisfaire. L'algorithme des "scores", adapté à ce nouveau paramètre, les résultats produits pour les 10 gammes sont détaillés en ANNEXE L.

a. Analyse des ruptures des stocks:

Le tableau n°7 fournit les niveaux moyens des ruptures enregistrés pour les différentes gammes de production.

Gamme n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P_i	18	16	17	17	16	18	17	17	17	17

Tableau n°7. Niveaux moyens des ruptures de stocks

Vraisemblablement, les insuffisances sont exprimées, en moyenne, pour 17 pièces. En plus, ce niveau de rupture est relativement le plus fréquent (60% des cas) parmi des valeurs dispersées selon un écart quadratique moyen $\sigma=0.63$.

Ceci reflète immédiatement une forte concentration des observations autour de la moyenne.

A priori, dans ce cas également, la proposition ci-dessous trouve bien sa place.

Proposition de proposition:

Abstraction faite des spécificités des gammes de production, le niveau moyen des ruptures des stocks susceptible d'être produit

serait pratiquement constant pour une commande de pièces donnée.

Conséquence:

L'état global des ruptures des stocks ne dépendant que de la composition de la commande, il est possible de:

.Constituer des stocks de sécurité en gardant un sur-stock aussi réduit que possible.

.Estimer, de manière plus ou moins précise, les pénalités dues à un retard de fabrication.

.Procéder à une révision assez fiable des délais de fabrication, tenant compte des aléas de rupture des stocks.

Remarque:

Toutes ces conclusions ne sont que des appréciations globales de l'état des stocks dès le moment où les stocks sont "agrégés" et qu'aucune discernation n'en est faite quant à leur composition réelle en termes de pièces de chaque type.

b. Ponderation des ruptures des stocks:

Dans ce paragraphe, il s'agira de répondre à la préoccupation qui suit:

Est-ce que les stocks moyens d'en-cours auraient un quelconque effet sur les niveaux moyens de rupture des stocks?

Le calcul des niveaux moyens pondérés des ruptures des stocks nous donne les valeurs du tableau n°8.

Gamme n=°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PP _i	16.7	16.6	15.7	17.8	16.1	18.5	16.7	17.3	17.1	16.9

Tableau n°8. Niveaux moyens pondérés des ruptures de stocks

Pour une évaluation moyenne de l'effet de la pondération, nous testerons l'hypothèse:

$$H_0: PP_i = P_i \text{ contre } H_1: PP_i \neq P_i$$

A cet égard, le test de WILCOXON [WIL-65] conduit à ce que la différence entre les groupes de valeurs (1) et (2) est peu significative, décision prise au seuil $\alpha=5\%$.

En l'occurrence, les ruptures moyennes des stocks ne sont pas influencées par l'état des stocks d'en-cours.

c. Ordonnement des modèles de découpes:

Dans quel ordre doit-on faire passer les modèles de découpes sur la machine lorsque le niveau de rupture des stocks est au minimum?

Les séquences de découpes relativement à chaque gamme sont schématisées au tableau n°9.

Gamme n°	Ordonnement des modèles de découpes	Etendue
1	10->13->6->9->1->12->4->11->8->5->3->2->7	2970
2	6->10->13->9->1->12->11->8->7->5->4->3->2	2930
3	6->13->10->9->1->12->11->8->4->3->5->2->7	2950
4	6->13->10->9->1->12->11->8->7->5->3->4->2	2950
5	10->13->6->9->1->12->11->8->4->5->3->7->2	2960
6	10->13->6->9->1->12->11->8->7->3->4->5->2	2950
7	6->10->13->9->1->12->8->11->7->3->4->5->2	2950
8	13->10->6->9->1->12->11->8->4->7->3->5->2	2960
9	6->10->13->9->1->12->8->11->7->4->5->3->2	2940
10	6->10->13->9->1->12->8->11->4->7->3->5->2	2960

Tableau n°9.

Ordonnement des modèles de découpes sur la machine

Comparativement avec les séquences construites à la section II.1, nous décelons une faible amélioration de l'étendue moyenne des commandes, celle-ci passant de 2953 à 2946, correspondant à une réduction moyenne de près d'une discontinuité.

Ceci est, en soit, un résultat positif mais qui reste en deça de la valeur optimale (1970), effet immédiat de l'emplacement du modèle de découpes "singulier" dans les séquences.

II.2.2. Minimisation des taux de rupture des stocks:

D_j désignant la même entité vue à la section II.1.2, le taux de rupture des stocks Tp_{ij} sera défini par:

$$Tp_{ij} = \left(Sp_{ij} / D_j \right) \quad (i=1, \dots, 10)$$

Le critère d'appréciation d'un modèle de découpes j est fondé sur la minimisation du taux de rupture des stocks à chaque période j (la période j est confondue avec le modèle de découpes j à retenir).

Donc, à chaque période j , il s'agira d'examiner les valeurs Tp_{ij} des modèles de découpes j encore en compétition et choisir le modèle "s" réalisant:

$$Tp_{is} = \min \left(Tp_{ij} \right) \quad (i=1, \dots, 10)$$

Pour analyser les ruptures des stocks, nous avons utilisé les niveaux de rupture moyens produits par les taux minimaux.

Gamme n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P_i	29	24	24	26	26	23	27	26	24	26

Tableau n°10. Niveaux moyens des ruptures de stocks

Apparamment, l'aspect frappant des résultats du tableau n°10 consiste en une augmentation des niveaux de rupture moyens, passant, en moyenne, de 17 à 25.5.

Remarque:

La détérioration des résultats touche, à la fois:
. les niveaux moyens de rupture des stocks,
. les ordonnancements des modèles de découpes (les étendues augmentent, en moyenne, à 2961).
Partant de cela, nous n'avons pas vu utile d'analyser les autres résultats.

III. RAFFINEMENT DES ORDONNANCEMENTS DE MODELES DE DECOUPES:

Tout au long de la section II, la démarche de l'algorithme des "scores" était telle que l'ordonnement des modèles de découpes n'est qu'une conséquence du processus d'optimisation d'un paramètre de gestion proprement défini.

Globalement, les séquences de découpage proposées sont d'une étendue bien éloignée de l'optimum fourni par la procédure de MADSEN [MAD-88].

Au regard de la structure des ordonnancements des modèles de découpes, cette défaillance est imputée au modèle de découpes "singulier".

A cet effet, nous avons préconisé un remaniement de l'algorithme des "scores" qui "forcerait" l'ordonnement des modèles de découpes. Autrement, nous allons procéder comme suit:

PAS 1 Isolement du modèle de découpes "singulier":

Du moment que l'étendue de la commande se trouve considérablement influencée par l'emplacement du modèle de découpes "singulier", nous avons décidé de restreindre ce modèle de la compétition, en l'imposant à l'une des deux extrémités de la séquence.

PAS 2 Recherche des séquences de découpage possibles:

Avec l'hypothèse du PAS 1, nous pensons améliorer l'ordonnement des modèles de découpes en construisant deux types de séquences:

1->... et ...->1, où 1 désigne le modèle "singulier".

Dès lors que les critères d'optimisation adoptés sont au nombre de quatre, ceci signifie que, pour chaque gamme de production, nous pouvons déterminer huit séquences de découpage différentes.

PAS 3 Choix de l'ensemble des séquences de découpage "optimales"

A ce stade de la recherche, nous privilégierons l'étendue de la commande à tout autre critère de performance.

Ainsi, moyennant la matrice des coûts C construite au chapitre précédent, nous calculerons les valeurs de l'étendue associée à chacune des séquences de découpage.

Sur les huit séquences construites, nous ne retiendrons que celle (s) dont la valeur est minimale.

Par conséquent, cette fois-ci, l'étendue est choisie prioritairement, les paramètres "niveau moyen des en-cours" et "niveau moyen des ruptures des stocks" s'en déduisant.

Ces modifications introduites, nous avons obtenu les résultats du Tableau n°11.

L'examen des résultats indique une nette amélioration des ordonnancements des modèles de découpes.

L'étendue moyenne avoisinerait 2030, ce qui équivaut à une réduction de l'effort d'identification d'environ 30.74% (l'étendue moyenne minimale passant de 2930 à 2030).

Relativement à l'étendue "optimale" (1970), ce résultat dénote une différence de 3.25%.

Ce résultat est fort intéressant, d'autant plus qu'il intègre les états des stocks.

Remarque:

1. Le tableau n°11 donne non seulement les séquences de découpage "optimales" mais aussi leurs niveaux de stocks respectifs.

2. Pour chaque étendue minimale, l'algorithme des "scores" peut proposer plus d'une variante.

Cette flexibilité de la procédure est un atout en matière de gestion: conformément à l'état actuel du système de production, le décideur peut opter pour telle ou telle variante.

Notations:

Et: étendue de la commande.

Nmc: niveau moyen des en-cours.

Nmr: niveau moyen de rupture des stocks.

Gamme	Ordonnement des modèles de découpes	Et	Nmc	Nmr
1	10->13->6->9->12->11->8->4->7->5->2->3->1	2040	41	28
	2->13->4->3->5->7->8->11->12->6->10->9->1	2040	39	39
2	1->2->13->4->3->6->5->10->8->9->7->11->12	2040	28	39
	6->10->13->9->12->11->8->7->4->5->2->3->1	2040	41	17
	2->13->4->3->5->7->8->11->12->6->10->9->1	2040	39	39
3	6->13->10->9->12->11->8->7->4->3->5->2->1	2040	44	19
	2->13->4->3->5->7->8->11->12->6->10->9->1	2040	39	40
4	6->13->10->9->12->11->8->7->5->3->4->2->1	2040	44	17
	13->2->4->3->5->7->8->11->12->6->10->9->1	2040	38	38
5	10->13->6->9->12->11->8->7->4->5->3->2->1	2040	44	17
	1->2->13->4->3->6->12->5->9->8->10->7->11	2040	29	44
6	13->6->10->9->12->4->3->2->5->8->7->11->1	2040	35	28
	13->2->4->3->5->7->8->11->12->6->10->9->1	2040	38	36
	1->10->4->2->8->5->9->11->3->7->12->6->13	2040	26	25
7	13->6->2->3->4->5->7->8->10->11->12->9->1	2010	39	35
8	2->4->3->5->7->8->11->13->12->6->10->9->1	2030	40	40
9	6->10->13->9->12->11->8->7->4->5->3->2->1	2040	43	17
10	13->6->2->3->4->5->7->8->11->12->10->9->1	2020	39	36

Tableau n°11. Séquences de découpage "raffinées"

IV. PROJECTION DE LA PROCEDURE SUR LA SEQUENCE DE MADSEN:

Pour permettre au décideur de mieux situer ses choix, il faudrait mieux qu'il soit dûment informé de l'état du système (stocks d'en-cours et ruptures des stocks) aux cas extrêmes. Les séquences de découpage élaborées par la procédure de MADSEN [MAD-88] constituant l'optimum (du point de vue étendue minimale seulement), nous avons calculé les niveaux des stocks moyens qu'elles produiraient. Les résultats sont reportés dans les tableaux n°12.

Les séquences a) et c) donnent exactement les mêmes résultats. Ce comportement est justifiable par les points suivants:

.La seule différence entre les deux séquences réside au niveau de la permutation des modèles de découpes n°12 et 13.

.Si jamais il y a différence dans la dynamique du processus de fabrication, elle ne peut se manifester qu'en amont des modèles n°12 et 13.

.Du point de vue de la discontinuité, les modèles n°12 et 13, présentant la même structure (contiennent le même type de commandes), sont assimilés à un même modèle de découpes. Aussi, l'état des stocks évoluera de manière identique pour les deux séquences.

Dans le paragraphe II, l'élaboration des séquences de découpage, par le biais des critères d'appréciation divers, a permis de distinguer des valeurs moyennes pour:

.les niveaux moyens des en-cours, dont la valeur la plus intéressante fût $\bar{E}=28.9$, obtenue grâce au critère "minimisation des taux de stocks en-cours".

.les niveaux moyens des stocks de rupture, $P=17$, produite par le critère "minimisation des niveaux de rupture des stocks".

.l'étendue, soit $Z=2946$, calculée pour le critère "minimisation des niveaux de rupture des stocks".

En adoptant ces entités comme références, nous pouvons formuler les conclusions suivantes:

.Cas des séquences a) et c): Les niveaux moyens des stocks en-cours et des ruptures de stocks augmentent respectivement de 47.05% (passe de 28.9 à 42.5) et de 27.64% (passe de 17 à 21.7).

.Cas des séquences b) et d):

Là aussi, nous constatons une augmentation moyenne des niveaux des stocks en-cours, qui atteint 34.5, valeur supérieure de 19.37%. Au même moment, le niveau moyen de rupture des stocks franchit la barre de 100% (102.94%) puisque l'écart de sa valeur moyenne actuelle (34.5) par rapport à la valeur référence (17) est de 17.5.

a. Séquence 3->8->10->7->6->5->4->9->11->12->13->2->1

c. Séquence 3->8->10->7->6->5->4->9->11->13->12->2->1

Gamme n=°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
En-cours	44	42	42	42	42	43	42	44	41	43
Ruptures	23	21	22	22	23	21	21	21	22	21

b. Séquence 1->2->13->12->11->9->4->5->6->7->10->8->3

Gamme n=°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
En-cours	34	35	35	35	36	33	35	34	33	35
Ruptures	35	35	36	36	36	30	35	33	33	36

d. Séquence 1->2->12->13->11->9->4->5->6->7->10->8->3

Gamme n=°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
En-cours	34	35	35	35	35	33	34	34	33	35
Ruptures	35	35	36	36	36	30	35	33	33	36

Tableaux n=°12.

Résultats de la projection des séquences de MADSEN

CONCLUSION:

En réalité, ce chapitre constitue la synthèse de toutes les investigations menées le long de cette dernière partie. L'objectif de départ pivotait autour de l'élaboration d'un ordonnancement optimal des modèles de découpes sur la machine. Fidèles à cet objectif, nous avons adapté la démarche proposée par MADSEN [MAD-88] au contexte particulier de notre étude. Au passage, nous avons soulevé certaines insuffisances de la démarche, notamment celles liées à la dynamique du système de production. A l'occasion, nous avons dû réfléchir à une procédure qui intégrerait des paramètres de gestion aussi importants que les stocks des en-cours et les ruptures des stocks. Ladite procédure a produit trois groupes de solutions principaux:

Premier groupe de solutions: (Section II)

Optimisation des stocks \Rightarrow Séquence de découpage

La caractéristique principale de ce type de solutions est, surtout, l'"optimalité" des paramètres de gestion, les séquences de découpage n'en sont qu'une conséquence.

Deuxième groupe de solutions: (Section III)

Astreinte de l'ordonnancement + Optimisation des stocks \Rightarrow
Séquence de découpage

Là, nous imposons l'emplacement du modèle de découpes "singulier" et nous procédons à l'optimisation des stocks sous cette contrainte.

Troisième groupe de solutions: (Section IV)

Optimisation de l'étendue de la commande \Rightarrow Niveau des stocks

Ces trois schémas clairement établis, le décideur sera en mesure d'effectuer un choix en connaissance de cause.

CONCLUSION GENERALE

*"Un jour, tout sera bien, voila notre esperance;
tout est bien aujourd'hui, voila l'illusion."*

VOLTAIRE

Pour résoudre un problème concrèt, un préalable serait d'en définir les contours.

Convaincus par la pertinence d'un tel raisonnement, nous avons commencé par tracer les grands axes de notre recherche, laquelle fut centrée autour d'un objectif clef:

Elaborer un modèle de planification de la production à même d'intégrer autant de paramètres de gestion que l'y disposerait le système de production.

Pour des raisons parfaitement objectives, que nous avons dûment explicitées, cette problématique n'a pu être appréhendée dans son contexte le plus large. En outre, l'approche fut restreinte à un secteur de production spécifique: *l'industrie de la construction métallique.*

"Le lendemain s'instruit aux leçons de la veille"
PUBLIUS SYRUS (I^{er} siècle av. JC)

Limitant la problématique à un contexte productif bien défini, il fallait jeter les ponts entre:

.le problème de gestion de la production proprement à l'industrie de la construction métallique,

.et la reflexion de son image à travers le miroir de la recherche opérationnelle: le "Cutting Stock Problem".

D'ici, nous dûmes survoler les diverses méthodes de résolution consacrées à ce problème dans la littérature.

Sur la base du fond théorique exploré, nous avons développé des approches de résolution aux niveaux "*planification des stocks*" et "*ordonnancement de la production*".

a. PLANIFICATION DES STOCKS:

Dans ce créneau, nous avons discuté deux modèles de problèmes de découpes: le 1/V/I/R et le 2/V/I/R:

Cas du problème 1/V/I/R:

A cause de la complexité du problème (NP-complet) et, pour des raisons d'ordre plutôt pratique, nous avons entrepris la conception d'une première Procédure Heuristique Séquentielle: la PHS à "Chute minimale".

Quoique fournissant des résultats satisfaisants, comparés à l'état actuel du système de production, nous avons procédé à une amélioration de la PHS à "Chute minimale" en y intégrant un nouveau paramètre de gestion: le niveau de chutes tolérable.

La PHS à "Niveau de chutes tolérable" fut mise à jour.

Apparemment, les résultats que nous obtenâmes furent relativement meilleurs que ceux produits par la PHS à "Chute minimale".

En fait, ce cas de figure reste particulier à la valeur que nous dûmes fixer pour le "niveau de chutes tolérable" ($\delta=0$), autrement, les résultats devaient être de qualité moins bonne (taux de chutes plus grand) mais produits en un temps machine plus réduit (hypothèse devant être confirmée par des études ultérieures).

En passant de la version 1/V/O/R des algorithmes, à la version 1/V/I/R, nous avons intégré un critère de gestion extrêmement important, à savoir: la minimisation du nombre de changements de modèles.

C'est à partir de cela que surgît l'idée d'élaboration d'une Procédure de Résolution Hybride, opérant par la résolution combinée d'un programme linéaire en nombres entiers (problème de sac à dos), à celle d'une Procédure Heuristique Séquentielle.

Les résultats furent concluants à plus d'un paramètre de performance, à l'exception du coût de la solution en termes de temps de calcul.

En guise de tentative d'apporter d'autres améliorations, nous avons testé les solutions produites par la PRH en adaptant la procédure de GILMORE et GOMORY [GIL-63].

Sur ce point, une conclusion définitive n'a pu être possible.

Cas du problème 2/V/I/R:

A dire vrai, la discussion de ce problème ne fut qu'une consécration des conclusions émises au cas précédent.

A cet effet, nous avons aussi pensé à des procédures heuristiques séquentielles.

La PHS à "Recherche arborescente" a, par conséquent, été développée pour un certain nombre de critères de performance auxiliaires, mais, le plus intéressant dans la démarche suggérée a été l'intégration du paramètre "satisfaction d'une commande donnée

au plutôt".

Relativement aux taux de chutes générés au niveau de l'UCC (allant jusqu'à 20%), les résultats produits ont été très appréciables.

En nous inspirant des principes des procédures proposées par GILMORE et GOMORY [GIL-63] et BEASLEY [BEA-85], nous avons conçu la PHS à "Deux phases".

Cette fois également, les résultats ont été intéressants mais loin d'être meilleurs que ceux obtenus avec la PHS à "Recherche arborescente".

b. ORDONNANCEMENT DE LA PRODUCTION:

Dès lors qu'un processus de production n'est que l'interférence entre phases de fabrication distinctes, la planification des stocks n'est pas suffisante pour approcher le problème de gestion de production. Cet aspect du problème ne concernant que la phase *découpage* du processus de production, nous avons dû intégrer dans notre approche globale, la phase *montage*.

Une première approche fut l'adaptation de la procédure de MADSEN [MAD-88] au cas de la production en industrie de la construction métallique.

L'application faite a permis de construire des séquences de découpage qui ne tiennent compte que du critère *minimisation de l'effort d'identification des pièces découpées*.

Remarquant que la procédure de MADSEN [MAD-88] négligeait des paramètres de gestion aussi pertinents que le "*niveau des en-cours*" et le "*niveau des ruptures*", nous avons initié une méthode d'approche heuristique (Algorithme des "scores") qui est en mesure de construire des séquences de découpage conséquemment à l'optimisation de divers paramètres, dont:

- .le niveau des stocks d'en-cours,
- .le niveau des ruptures des stocks.

Tel que pressenti, les étendues des séquences construites s'écartent considérablement de l'optimum de MADSEN [MAD-88].

Ce résultat est en somme logique par le fait même que le modèle de découpes "singulier" intervienne en cours de la séquence, ce qui explique la forte augmentation de l'étendue.

Pour pallier à cette situation, nous avons envisagé d'introduire une solution pratique intermédiaire qui intégrerait à la fois les critères "*minimisation des stocks*" et "*minimisation de l'étendue de la commande*" (minimisation de l'effort d'identification des pièces).

En modifiant légèrement l'algorithme des "scores" (isolement du modèle de découpes "singulier"), nous sommes parvenu à des

séquences de découpage qui concilient parfaitement les deux objectifs.

Enfin, et pour quantifier l'incidence des séquences de MADSEN [MAD-88] sur la dynamique du processus de production, nous en avons effectué une projection sur l'algorithme des "scores".

Toutes ces étapes parcourues, le décideur aura à sa portée des solutions répondant à des critères variés.

"Ce sont les petites pluies qui gâtent les grands chemins"

Proverbe

La conception d'un système de gestion de production intégré est loin d'être une entreprise qui puisse être parachevée.

Certes, nous avons essayé, de notre mieux, d'être attentifs à tous les paramètres de gestions contrôlables, ensuite intégrables dans le contexte propre à l'industrie de la construction métallique. Mais, il est plus que sûr que le chemin fait, jusqu'ici, n'est qu'une partie d'une longue traversée; Les parenthèses que nous ouvrons à mesure que nous progressions n'en sont qu'une illustration.

Comment pouvons-nous voir les choses autrement lorsque le "randonneur" du -problème de sac à dos- décide de suivre les traces du "voyageur" de commerce?

BIBLIOGRAPHIE

- [BEA-85] J.E.BEASLEY (1985) "*Bounds for two-dimensional cutting*"
Journal of Operational Research Society, 36, 71-74.
- [BEA-85a] J.E.BEASLEY (1985) "*Algorithms for unconstrained two-dimensional guillotine cutting*"
Journal of Operational Research Society, 36, 297-306.
- [BEN-87] J.BENASSY (1987) "*La gestion de la production*" Hermès.
- [BOB-94] P.M.BOBROWSKI (1994) "*The effects of modeling on log bucking solution techniques*"
Journal of Operational Research Society, 45, 624-634.
- [BOO-86] J.H.BOOKBINDER and J.HIGGINSON (1986) "*Customer service vs trim waste in corrugated box manufacture*"
Journal of Operational Research Society, 37, 1061-1071.
- [BOU-94] M.Y.BOUMGHAR (1994) "*Conception d'un algorithme de résolution d'un problème de découpe bidimensionnelle contraint type guillotine*"
Mémoire d'ingénieur en statistique, Institut National de la Planification et de la Statistique.
- [BOU-89] M.BOURBON (1989) "*Méthodologie des décisions fonctionnelles*"
Office des Publications Universitaires.
- [CHA-76] M.L.CHAMBERS and R.G.DYSON (1976) "*The cutting stock problem in the flat glass industry- selection of stock sizes*"
Operational Research Quaterly, 27, 949-957.
- [CHR-83] P.CHRETIENNE (1983) "*Les réseaux de Pétri temporisés*"
Thèse d'Etat, Université PIERRE et MARIE CURIE (Paris VI).
- [CHR-72] N.CHRISTOFIDES and S.EILON (1972) "*Algorithms for large scales Traveling Salesman Problem*"
Operational Research Quaterly, 23, 511-518.
- [CHR-77] N.CHRISTOFIDES and C.WHITLOCK (1977) "*An algorithm for two-dimensional cutting problems*"
Operations Research, 25, 30-44.
- [CHU-90] C.CHU (1990) "*Nouvelles approches analytiques et concept de mémoire artificielle pour divers problèmes d'ordonnancement*"
Thèse d'Etat, Université de METZ.
- [COS-80] M.COSTA (1980) "*Problèmes de découpes linéaires, formalisation et solutions économiques*"
Thèse de 3ème cycle, Université PIERRE et MARIE CURIE.
- [COS-82] M.COSTA (1982) "*Formalisation et résolution des problèmes de découpes linéaires*"
R.A.I.R.O, 16, 65-82.
- [COS-84] M.COSTA (1984) "*Une étude pratique de découpes de panneaux de bois*"
R.A.I.R.O, 18, 211-219.

- [CRU-78] P.V.DER CRUYSSSEN and M.J.RIJCKAERT (1978) "*Heuristic for the asymmetric Traveling Salesman Problem*"
Journal of Operational Research Society, 29, 697-701.
- [DAU-92] S.DAUZERE-PERES (1992) "*Planification et ordonnancement de la production: une approche intégrée cohérente*"
Thèse d'Etat, Université PAUL SABATIER (Toulouse).
- [DIN-92] E.DINDELEUX (1992) "*Conception et mise en oeuvre d'un système interactif d'aide à la conduite d'ateliers*"
Thèse d'Etat, Université de VALENCIENNES.
- [DUF-91] L.DUFRENE (1991) "*Contribution à une méthodologie de conception des systèmes d'assemblage par familles de produits*"
Thèse d'Etat, Université de FRANCHE-COMTE.
- [DYC-90] H.DYCKHOFF (1990) "*A typology of cutting and packing problems*"
European Journal of Operational Research, 44, 145-159.
- [DYS-74] R.G.DYSON et A.S.GREGORY (1974) "*The cutting stock problem in the flat glass industry*"
Operational Research Quarterly, 25, 41-53.
- [ECU-88] P.L'ECUYER (1988) "*Efficient and portable Combined Random Number Generators*"
Communications of ACM, 31, 742-774.
- [ESM-64] M.ESMENJAUD-BONNARDEL (1964) "*Un processus de génération de nombres pseudo-aléatoires pour CAB-500*"
Revue Française de Traitement de l'Information, 7, 185-197.
- [FAR-88] A.A.FARLEY (1988) "*Mathematical programming models for cutting stock problems in the clothing industry*"
Journal of Operational Research Society, 39, 41-53.
- [FAR-90] A.A.FARLEY (1990) "*A note on bounding a class of linear programming problems, including cutting stock problems*"
Operations Research, 38, 922-923.
- [FAU-86] C.FAURE (1986) "*Planification hiérarchisée en avenir incertain: le concept de robustesse*"
Thèse de 3ème cycle, Université PAUL SABATIER (Toulouse).
- [GAI-83] N.GAITHER, S.CARRIER (1983) "*L'entreprise et la gestion des opérations*"
Editions HRW ltée, MONTREAL.
- [GHE-92] G.GHEZALI, A.SAMMOUN (1992) "*Etude d'un problème de découpe d'un logiciel*"
Mémoire d'Ingénieur en Recherche Opérationnelle, Université des Sciences et de la Technologie HOUARI BOUMEDIENE.
- [GIA-88] V.GIARD (1988) "*Gestion de la production*"
2ème édition, GESTION, Economica.
- [GIL-61] P.C.GILMORE and R.E.GOMORY (1961) "*A linear programming approach to the cutting stock problem*"
Operations Research, 9, 849-859.

- [GIL-63] P.C.GILMORE and R.E.GOMORY (1963) "A linear programming approach to the cutting stock problem-PART II"
Operations Research, 11, 863-888.
- [GIL-65] P.C.GILMORE and R.E.GOMORY (1965) "Multistage cutting stock problems of two and more dimensions"
Operations Research, 13, 94-120.
- [GIL-66] P.C.GILMORE and R.E.GOMORY (1966) "The theory and computation of knapsack functions"
Operations Research, 14, 1045-1074.
- [GON-85] M.GONDRAN, M.MINOUX (1985) "Graphes et algorithmes"
Editions EYROLLES, Paris.
- [GRE-70] H.GREENBERG, R.L.HEGERICH (1970) "A branch search algorithm for the knapsack problem"
Management Science, 16, 327-332.
- [HAE-80] R.W.HAESSLER (1980) "A note on computational modifications to the GILMORE and GOMORY cutting stock algorithm"
Operations Research, 28, 1001-1005.
- [HAE-85] R.W.HAESSLER (1985) "Production planning and scheduling for an integrated container company"
Automatica, 21, 445-452.
- [HAE-91] R.W.HAESSLER, P.E.SWEENEY (1991) "Cutting stock problems and solution procedures"
European Journal of Operational Research, 54, 141-150.
- [HAI-78] L.d'HAINAUT (1978) "Concepts et méthodes de la statistique"
Tomes I et II, Editions LABOR.
- [HAO-85] A.HAOUBA (1985) "Politique optimale en gestion de la production: gestion de stocks à deux niveaux, cas concave"
Thèse de 3ème cycle, Université PARIS IX-DAUPHINE.
- [HAX-83] A.C.HAX, D.CANDEA (1983) "Production and inventory management"
PRENTICE Hall, Inc.
- [HER-72] J.C.HERZ (1972) "Recursive computational procedure for two-dimensional stock cutting"
IBM Journal of Research Development, 461-469.
- [HOF-83] T.R.HOFFMANN, D.W.FOGARTY (1983) "Production and inventory management"
South Western Publishing.
- [IMB-86] S.IMBERT (1986) "Interaction entre deux niveaux de décision en Planification de la production"
Thèse d'Etat, Université PAUL SABATIER (Toulouse).
- [KHE-94] H.KHERCHI (1994) "

- [LAF-91] S.LAFTIT (1991) "*Graphes d'événements déterministes et stochastiques-Application aux systèmes de production*"
Thèse d'Etat, Université PARIS IX-DAUPHINE.
- [LAN-87] M.A.LANGSTON (1987) "*A study on composite heuristic algorithms*"
Journal of Operational Research Society, 38, 539-544.
- [LAS-84] J.B.LASSERE (1984) "*Horizons de planification et flexibilité des décisions-Application à des problèmes de production*"
Thèse d'Etat, Université PARIS IX-DAUPHINE.
- [LEN-75] J.K.LENSTRA, A.H.G.RINNOOY KAN (1975) "*Some simple applications of the Travelling Salesman Problem*"
Operational Research Quaterly, 26, 717-733.
- [LIN-73] S.LIN, B.W.KERNIGHAN (1973) "*An effective heuristic algorithm for the Traveling Salesman Problem*"
Operational Research Quaterly, 21, 498-516.
- [LIT-77] C.D.LITTON (1977) "*A frequency approach to the one-dimensional cutting problem for carpet rolls*"
Operational Research Quaterly, 28, 927-938.
- [MAD-88] O.B.G.MADSEN (1988) "*An application of Travelling salesman routines to solve pattern allocation problems in the glass industry*"
Journal of Operational Research Society, 39, 249-256.
- [MAN-47] H.B.MANN, D.R.WHITNEY (1947) "*On a test if whether one of two random variables is stochastically larger than the other*"
Annals of Mathematics and Statistics, 18, 52-54.
- [MEB-86] M.MEBTOUL (1986) "*Discipline d'usine, productivité et société en ALGERIE*"
Office des Publications Universitaires.
- [MEI-89] K.MEIER (1989) "*Commande hiérarchisée d'un système de production*"
Thèse d'Etat, Université de METZ.
- [MER-87] C.MERCE (1987) "*Cohérence des décisions en Planification hiérarchisée*"
Thèse d'Etat, Université PAUL SABATIER (Toulouse).
- [DUK-95] A.DUKIL (1995) "*Revue de littérature:le "Cutting Stock Problem" et le "Pattern Allocation Problem"*"
Polycope de référence, ENP.
- [ORL-75] J.ORLICKEY (1975) "*Material Requirement Planning*"
Mc GRAW Hill Book Company.
- [PAG-75] E.PAGE (1975) "*A note on a two-dimensional dynamic programming problem*"
Operational Research Quaterly, 26, 321-324.
- [POR-87] M.C.PORTMANN (1987) "*Méthodes de décomposition spatiale et temporelle en ordonnancement de la production*"
Thèse d'Etat, Université de NANCY I.

- [PRO-84] J.M.PROTH, A.HAOUBA (1984) "*Gestion des stocks à 2 niveaux*"
Rapport de Recherche n°302, INRIA.
- [PRO-84] J.M.PROTH, A.HAOUBA (1984) "*Gestion des stocks à deux niveaux: le problème général*"
Rapport de Recherche n°345, INRIA.
- [ROB-84] S.A.ROBERTS (1984) "*Application of heuristique techniques to the cutting stock problem for work-tops*"
Journal of Operational Research Society, 35, 369-377.
- [SAK-82] M.SAKAROVITCH (1982) "*Optimisation combinatoire: programmation discrète*"
Editions HERMANN.
- [SAR-88] B.R.SARKER (1988) "*An optimum solution for one-dimensional slitting problems: a dynamic programming approach*"
Journal of Operational Research Society, 39, 749-756.
- [SIN-94] Z.SINUANY-STERM, I.WEINER (1994) "*The one-dimensional cutting stock problem using two objectives*"
Journal of Operational Research Society, 45, 231-236.
- [SLI-90] M.SLIMANI, A.OUKIL (1990) "*Elaboration d'une procédure heuristique pour la résolution d'un problème de découpe bidimensionnelle-guillotine*"
Mémoire d'Ingénieur en Génie-Industriel, Ecole Nationale Polytechnique.
- [SMI-80] A.SMITH, P.DE CANI (1980) "*An algorithm to optimize the layout of boxes in pallets*"
Journal of Operational Research Society, 31, 573-578.
- [STA-77] R.S.STAINTON (1977) "*The cutting stock problem for the stickholder of steel reinforcement bars*"
Operational Research Quaterly, 28, 139-149.
- [SUM-84] D.J.SUMANTH (1984) "*Productivity engineering and management*"
Mc GRAW Hill Book Company.
- [SWE-92] P.E.SWEENEY, E.R.PATERNOSTER (1992) "*Cutting and packing problems: A categorized application: Oriented research Bibliography*"
Journal of Operational Research Society, 43, 691-706.
- [TAD-91] Z.TADJ, D.AÏSSIOUENE (1991) "*Elaboration d'une procédure de minimisation des chutes avec découpage bidimensionnel type guillotine*"
Mémoire d'Ingénieur en Génie-Industriel, Ecole Nationale Polytechnique.
- [TAH-92] C.TAHON (1992) "*Système d'aide à la décision pour la conduite des systèmes de production*"
Habilitation à diriger des recherches,
Université de VALENCIENNE et du HAINAUT CAMBRESIS.

- [VAS-94] F.J.VASKO, F.E.WOLF (1994) "A practical approach for determining rectangular stock sizes"
Journal of Operational Research Society, 45, 281-286.
- [VOL-87] T.VOLGENANT, R.JONKER (1987) "On some generalisations of the Travelling Salesman Problem"
Journal of Operational Research Society, 38, 1073-1080.
- [VOL-88] T.E.VOLLMANN, W.L.BERRY, D.C.WHYBARK (1988) "Manufacturing Planning and Control Systems"
DOX-JONES-Irwin.
- [WAN-83] P.Y.WANG (1983) "Two algorithms for constrained two-dimensional cutting stock problems"
Operations Research, 31, 573-586.
- [WIL-65] R.L.Mc CORNACK (1965) "Extended tables of the WILCOXON matched pair signed rank statistic"
J.AMER Statistics Association, 60, 864-871.
- [WOO-78] D.M.WOOD (1978) "A dynamic programming solution to a problem of loom box sequence planning"
Journal of Operational Research Society, 29, 1159-1165.
- [XIA-89] XIAO-IAN XIE (1989) "Contrôle hiérarchique d'un système de production soumis à perturbations"
Thèse d'Etat, Université de NANCY I.

NB: Toutes les références, citées dans le mémoire et ne figurant pas en BIBLIOGRAPHIE, sont explicitées dans [SWE-92].

ANNEXES

- A. Description du logiciel STORM 2.0
- B. Méthode de la transformation inverse
- C. The Combined Random Numbers Generator
- D. Caractéristiques des commandes générées
- E. Résultats des problèmes tests:
 - Planification des stocks de barres
- F. Test U de Mann-Whitney
- G. Test de Wilcoxon
- H. Résultats de l'algorithme de Gilmore et Gomory "adapté"
- I. Le problème du voyageur de commerce
- J. Ordonnancement de la production par
 - la minimisation des en-cours
- K. Ordonnancement de la production par
 - la minimisation des taux d'en-cours
- L. Ordonnancement de la production par
 - la minimisation des ruptures de stock
- Z. Résultats des problèmes tests:
 - Planification des stocks de tôles

Description Du Logiciel *STORM* 2.0

1- *Systèmes d'équipement* :

Storm se déroule sur les IBM.PC, IBM.XT, IBM.AT, PS2 et 100% sur les IBM Compatibles micro computers, nécessitant un minimum de mémoire nette de 256 K-Bytes. Pour cela, on a besoin aussi d'assez de mémoire pour prendre le DOS 2.0 ou plus et d'autres programmes. *Storm* peut s'utiliser sur les systèmes à disques souples et à disque dur, ce dernier est recommandé par le concepteur.

Storm opère et s'adapte avec beaucoup de moniteurs standards et d'imprimantes connectés à l'ordinateur.

2- *Présentation* :

Quand on active *Storm*, un menu de sélection de tâches apparaît pour spécifier le problème à traiter de la forme :

STORM : MAIN MENU

- | | |
|-----------------------------------|------------------------------------|
| * 1- Linear & Integer Programming | 9- Facility Layout |
| 2- Assignment | 10- Assembly Line Balancing |
| 3- Transportation | 11- Investement Analysis |
| 3- Distance Networks | 12- Forecasting |
| 5- Flow Networks | 13- Production Scheduling |
| 6- Project Management (PERT/CPM) | 14- Material Requirements Planning |
| 7- Queueing Analysis | 15- Statistical Process Control |
| 8- Inventory Management | 16- Statistics |

Après avoir choisi une procédure, l'introduction des inputs (data) se fait par le choix d'une des deux formes de procédures d'entrée :

- 1- Lecture sur des données existantes en mémoire.
- 2- Création d'un nouvel ensemble de données.

Storm présente une facilité d'édition et une simplicité de communication avec l'utilisateur, du fait qu'il possède un menu d'aide à chaque étape, indiquant les tâches à réaliser ultérieurement ainsi que les recommandation d'utilisation.

Pour résoudre les problèmes d'optimisation dans un réseau, on aura à choisir la tâche n°4 *Distance Networks* du menu.

Annexe B.

METHODE DE LA TRANSFORMATION INVERSE

PROBLEMATIQUE:

Soit X une variable aléatoire de densité de probabilité $f(x)$.
On désigne par Y la variable aléatoire distribuée selon une loi uniforme $\mathcal{U}(0,1)$ dont la fonction de distribution de probabilité est donnée par:

$$g(y) = \begin{cases} 1 & \text{si } y \in [0,1]. \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

Comment exprimer Y en fonction de X de telle sorte qu'à toute valeur de X corresponde une valeur de Y ?

En d'autres termes, quelle est l'expression de $y = F(x)$?

APPROCHE THEORIQUE:

La probabilité pour que Y soit dans l'intervalle dy est:

$$P(y < Y < y + dy) = g(y) dy = dy \quad \left[\text{puisque } g(y)=1 \right] \quad (1)$$

Comme il existe une correspondance entre x et y (y est une fonction de x) alors, la probabilité pour que y soit dans l'intervalle dy est égale à la probabilité que x soit dans dx .

Autrement:

$$g(y) dy = f(x) dx \quad (2)$$

De (1) et (2), nous déduisons:

$$dy = f(x) dx \quad (3)$$

$$\text{Or } y = F(x) \Rightarrow dy = F'(x) dx \quad (4)$$

En identifiant les termes des égalités (3) et (4), nous avons:

$$f(x) = F'(x) \Rightarrow F(x) = \int f(x) dx = y \quad (5)$$

d'où nous pouvons conclure que y n'est autre que la fonction de répartition de X .

Si la fonction inverse de F existe alors, $x = F^{-1}(y)$.

CONCLUSION et APPLICATION:

Dans la pratique, cela signifie qu'à toute valeur de Y uniformément distribuée sur $[0,1]$, peut être associée une valeur de X , variable aléatoire de densité de probabilité $f(x)$.

Soit X_i une variable aléatoire de loi uniforme $\mathcal{U}(X_{\min}, X_{\max})$.

$$f(x_i) = \begin{cases} 1 / (X_{\max} - X_{\min}) & \text{si } x_i \in [X_{\min}, X_{\max}]. \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (6)$$

La fonction de répartition de X_i serait:

$$F(x_i) = \begin{cases} 0 & \text{si } X_i < X_{\min}. \\ (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) & \text{si } X_i \in [X_{\min}, X_{\max}]. \\ 1 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (7)$$

Si nous posons $Y_i = F(X_i)$ alors, $Y_i \sim \mathcal{U}(0,1)$ (8)

$$(7) \text{ et } (8) \Rightarrow Y_i = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (9)$$

$$(9) \Rightarrow X_i = Y_i \times X_{\max} + (1 - Y_i) \times X_{\min} \quad (10)$$

Ainsi, à toute valeur y_i de la variable aléatoire Y_i , distribuée uniformément sur $[0,1]$, on peut faire correspondre une valeur x_i de la variable aléatoire X_i de loi uniforme (X_{\min}, X_{\max}) .

Les valeurs de X forment un échantillon artificiel de densité de probabilité $f(x_i)$.

Pour générer un échantillon de "n" nombres pseudo-aléatoires d'une loi uniforme (X_{\min}, X_{\max}) , l'algorithme de la transformation inverse sera:

PAS 1: Générer $Y_i \sim \mathcal{U}(0,1)$.

PAS 2: $X_i = Y_i \times X_{\max} + (1 - Y_i) \times X_{\min}$.

PAS 3: Recommencer tant que $i < n$.

Annexe.c.

THE COMBINED RANDOM NUMBERS GENERATOR

Les générateurs de nombres pseudo-aléatoires sont largement utilisés. Leur champs d'application va de l'analyse numérique à la théorie d'échantillonnage, passant par les problèmes test pour l'évaluation des performances des algorithmes. Quoiqu'abondants en littérature, la plupart des générateurs de nombres aléatoires rencontrés, en pratique, présentent une faible justification théorique [ECU-88].

Pour contourner ce problème, l'ECUYER [ECU-88] propose un générateur de nombres aléatoires issus de la combinaison d'un certain nombre de "Générateurs de nombres aléatoires" déjà existants.

The "COMBINED RANDOM NUMBER GENERATORS":

Comme son nom l'indique, ce "générateur" est la combinaison d'un certain nombre de générateurs, communément connus sous le vocable de:

Lehmer Linear Congruential Generator (LLCG)

Multiplicative Linear Congruential Generator (MLCG)

dont les algorithmes respectifs sont:

Algorithme de Lehmer Linear Congruential Generator

PAS 0 Fixer p et m

PAS 1 $k := 0$.

Fixer le premier terme a_k , impair et non nul.

PAS 2 $a_{k+1} := \left(m \cdot a_k + c \right) \bmod (p)$.

PAS 3 $k := k+1$.

Aller au PAS 2.

Algorithme de Multiplicative Linear Congruential Generator

PAS 1 Fixer p et m.

PAS 2 Fixer le premier terme a_k , impair et non nul.

$a_k := \left(m \cdot a_k \right) \bmod (p)$.

PAS 3 $k := k+1$. Aller au PAS 2.

où: "m" est appelé le *multiplicateur*,

"p" le *module*,

"a" le *seed*.

"c" est une constante inférieure à "p".

"mod p" signifie le reste de la division entière d'un nombre par "p".

Tous ces paramètres sont des entiers non négatifs.

La combinaison de ces deux "générateurs" n'a été possible que grâce aux deux lemmes proposés et démontrés par l'ECUYER [ECU-88].

Pour conclure de la validité de ce nouveau "générateur", l'auteur l'a soumis à 21 tests statistiques usuels.

Algorithme du générateur de l'ECUYER:

Le générateur de l'ECUYER [ECU-88], transcrit en langage PASCAL et présenté ci-dessus, est destiné à la génération d'un nombre pseudo-aléatoire que nous avons noté "uni".

Les nombres 32363, 31727 et 31657 sont les "seed" respectifs de s1, s2 et s3.

Ces derniers sont choisis dans les intervalles I1, I2 et I3 respectivement, tels que:

$$I1 = [1, 32362].$$

$$I2 = [1, 31726].$$

$$I3 = [1, 31656].$$

```
begin
t1 := t * 10000 + (1-t) * 3000;
s1 := round (t1);
v1 := v * 26547 + (1-v) * 31600;
s3 := round (v1);
a:=206;b:=217;c:=222;
k := trunc (s1/a);
s1 := 157 * (s1 - k * 206) - k * 21;
if (s1<0) then s1 := s1 + 32363;
      k := trunc (s2/b);
      s2 := 146 * (s2 - k * 217) - k * 45;
if (s2<0) then s2 := s2 + 31727;
      k := trunc(s3/c);
      s3 := 142 * (s3 -k * 222) - k * 133;
if (s3<0) then s3 := s3 + 31657;
      z := s1 - s2;
if (z>706) then z := z - 32362;
      z := z + s3;
if (z<1) then z := z + 32362;
      uni := z * 3.0899E-5;
```

Annexe .D.

I. CARACTERISTIQUES DES COMMANDES DE PRODUITS LONGS:

La longueur de la barre utilisée est $L=800\text{cm}$ pour les commandes de 1 à 10. En revanche, les commande 11 et 12 sont tirées de l'application de SINUANY-STERN et WEINER [SIN-94], pour laquelle ils ont utilisé une barre de longueur $L=600\text{cm}$.

La demande maximale, tous types de pièces confondus, est:

$$N_{\text{max}}=100$$

La longueur maximale de la pièce est: $l_{\text{max}}=200\text{cm}$.

Commande N=°1:

Longueur de la pièce	178	98	171	165
Nombre d'unités	85	32	81	77

Commande N=°2:

Longueur de la pièce	148	146	135	187	155	114
Nombre d'unités	65	64	57	91	70	42

Commande N=°3:

Longueur de la pièce	100	158	131	142	129	156	134	175	96
Nombre d'unités	33	72	54	61	52	71	56	83	59

Commande N=°4:

Longueur de la pièce	97	181	87	198	115
Nombre d'unités	31	87	24	98	42

Commande N=°5:

Longueur de la pièce	138	129	88	158	120	151	178
Nombre d'unités	59	52	25	72	46	67	85

Commande N°6:

Longueur de la pièce	193	144	86	163	116	178	198	180	177	140
Nombre d'unités	95	62	24	75	44	85	98	86	85	60

Commande N°7:

Longueur de la pièce	254	372	155	495	182	98	140	282	181	392
Nombre d'unités	72	24	69	93	88	109	60	66	116	10

Commande N°8:

Longueur de la pièce	354	233	107	561	158
Nombre d'unités	79	121	17	52	28

Commande N°9:

Longueur de la pièce	481	323	405	166	175
Nombre d'unités	76	70	25	71	88

Commande N°10:

Longueur de la pièce	223	282	375	655	562	322	104
Nombre d'unités	111	41	46	39	26	16	86

Commande N°11:

Longueur de la pièce	123	103	30	17
Nombre d'unités	15	6	6	6

Commande N°12:

Longueur de la pièce	123	103	30	17
Nombre d'unités	150	60	60	60

II. CARACTERISTIQUES DES COMMANDES DE PRODUITS PLATS:

Le stock des tôles supposé homogène, les dimensions de chaque tôles sont: 3000 x 1500mm.

Le nombre maximal de rectangles de chaque type est: $N_{max}=100$.

La longueur maximale de chacune des dimensions du rectangle est $L_{max}=500mm$.

Commande N="1:

Longueur	Largeur	Demande
167	84	73
294	128	47
421	172	21
88	56	89
216	101	63
343	145	37
470	189	11
137	73	79
264	118	53
392	162	27

Commande N="2:

Longueur	Largeur	Demande
352	148	35
205	97	65
58	46	96
370	155	31
223	103	62
76	52	92
388	161	27
241	110	58
94	58	88
407	167	24

Commande N="3:

Longueur	Largeur	Demande
466	188	11
432	176	18
399	164	25
365	153	32
332	141	39
298	129	46
264	118	53
231	106	60
197	94	67
164	83	74

Commande N="4:

Longueur	Largeur	Demande
294	128	47
88	56	89
342	145	37
137	73	79
391	162	27
185	90	69
440	179	17
234	107	59
488	196	7
282	124	49

Commande N=*5:

Longueur	Largeur	Demande
480	193	9
461	186	13
441	179	16
422	173	20
403	166	24
383	159	28
364	152	32
345	146	36
325	139	40
306	132	44

Commande N=*6:

Longueur	Largeur	Demande
166	83	73
292	127	47
418	171	21
84	55	90
211	99	64
337	143	38
463	187	12
129	71	81
256	115	55
382	159	29

Commande N=*7:

Longueur	Largeur	Demande
324	138	41
148	77	77
432	176	18
257	115	55
81	54	91
365	153	32
189	92	69
474	191	10
298	129	46
122	68	82

Commande N=*8:

Longueur	Largeur	Demande
71	50	93
103	61	86
134	72	80
166	83	73
197	94	67
229	105	60
261	116	54
292	127	47
324	138	41
355	149	34

Commande N=°9:

Longueur	Largeur	Demande
218	101	63
396	163	26
114	65	84
292	127	47
470	189	11
188	91	69
366	153	32
84	55	90
262	117	53
440	179	17

Commande N=°10:

Longueur	Largeur	Demande
437	178	17
374	156	30
311	134	43
248	112	56
186	90	69
123	68	82
60	47	95
457	185	13
394	163	26
332	141	39

Remarque :

Toutes les dimensions sont données en centimètres (cm)

RESULTATS DES PROBLEMES TEST

Planification des stocks de barres

Commande n=°	PRH (%)	PHSCM (%)	PHSNCT(%)
1	8.152	13.804	13.804
2	2.444	7.337	7.322
3	1.045	6.078	3.393
4	4.500	4.500	4.500
5	2.643	6.340	5.139
6	2.988	8.585	5.585
7	2.114	9.238	5.039
8	6.174	17.649	6.937
9	16.830	33.255	31.088
10	4.417	18.812	10.144
11	8.500	8.500	8.500
12	2.659	15.278	2.659
Moyennes	5.205	12.448	8.676

Tableau n=°1.

Taux de chutes
moyen par commande

Commande n=°	PRH	PHSCM	PHSNCT
1	61	65	65
2	76	80	80
3	97	101	99
4	59	59	59
5	76	79	78
6	155	164	156
7	208	225	214
8	122	139	123
9	145	177	175
10	141	166	151
11	5	5	5
12	47	54	47
Moyennes	100	110	105

Tableau n=°2.

Stocks de barres
prévisionnels

Commande n=°	PRH	PHSCM	PHSNCT
1	7	5	7
2	8	8	9
3	15	14	18
4	8	7	8
5	13	11	11
6	17	16	18
7	13	12	12
8	7	10	7
9	6	5	7
10	11	9	9
11	3	5	5
12	8	6	6
Moyennes	10	9	10

Tableau n=°3.
Nombre de modèles
produits par chaque
algorithme

Commande n=°	PRH (cm)	PHSCM (cm)	PHSNCT (cm)
1	305	286	305
2	665	156	260
3	704	210	658
4	619	80	146
5	560	110	542
6	656	263	220
7	438	305	380
8	567	446	446
9	634	495	395
10	384	518	156
11	240	231	231
12	291	354	354
Moyennes	505.25	287.83	341.08

Tableau n=°4.
Longueur de chutes
cumulées sur la
dernière barre

Abréviations:

PRH: Procédure de Résolution Hybride.

PHSCM: Procédure Heuristique Séquentielle à Chute Minimale.

PHSNCT: Procédure Heuristique Séquentielle à Niveau de Chute
Tolérable.

Annexe F.
TEST U DE MANN-WHITNEY

SITUATIONS:

Ce test est destiné à évaluer si deux échantillons indépendants sont significativement différents.

Le test s'applique à des données métriques ou à des rangs (les premières sont transformées en rangs).

LIMITES DE VALIDITE:

Les deux échantillons doivent être indépendants.

Le test est valable même dans les cas où on ne peut pas appliquer le test de Student, et sa puissance pour des échantillons moyens est de l'ordre de 95% de celle du test t qui est le plus puissant des tests paramétriques.

On peut donc considérer que le test U est un excellent instrument de comparaison de deux échantillons indépendants. En particulier, le test U doit être préféré au test t lorsque les moyennes ne sont pas représentatives des groupes (par exemple, lorsque des données extrêmes pèsent exagérément sur la moyenne).

ALGORITHME DU TEST DE MANN-WHITNEY:

PAS 1 Déterminer le nombre de données dans chaque échantillon et appeler:

N1: nombre de données du plus petit échantillon.

N2: nombre de données du plus grand échantillon.

$N=N1+N2$.

PAS 2 Mélanger les données des deux échantillons et chercher le rang de chaque donnée dans le groupe total, en attribuant le rang 1 à la donnée la plus petite.

.Si plusieurs données sont égales, attribuer à chacune le rang moyen.

En pratique, on peut écrire les données sur des fiches de deux couleurs (une couleur par échantillon) et ranger les fiches sans se préoccuper de la couleur. On inscrit ensuite sur chaque fiche son rang.

PAS 3 Faire la somme des rangs ainsi attribués dans le premier échantillon (le plus petit). On trouve R1.

.Si les deux échantillons sont de même taille, on prend l'un ou l'autre.

En pratique, on extrait du tas de fiches celles qui ont la couleur attribuée au plus petit échantillon et on additionne les rangs qui y sont inscrits.

PAS 4 Facultatif: à titre de vérification, on peut:

1. Faire la somme des rangs attribués aux données du plus grand échantillon. On trouve R_2 .

2. Vérifier que $R_1 + R_2 = N(N+1)/2$.

PAS 5 Examiner l'effectif du plus grand échantillon.

.Si $N_2 > 20$, se reporter au PAS 9.

.Si $20 \geq N_2 > 8$ et si $N_1 > 8$ alors, se reporter au:

.PAS 9 lorsqu'on désire obtenir le niveau précis de probabilité de l'hypothèse nulle plutôt que le seuil de signification.

.PAS 6 si on ne désire obtenir que le seuil de signification et non le niveau précis.

.Si $N_1 \leq 8$, se reporter au PAS 6.

PAS 6 Chercher la statistique U.

A cet effet, calculer:

$$U^* = N_1 \times N_2 + N_1(N_1+1)/2 - R_1.$$

$$U^{**} = N_1 \times N_2 - U^*.$$

PAS 7 Si N_2 est inférieur ou égal à 8, consulter la table MW1 qui est une table pour un test à une issue pour trouver le niveau de probabilité "p" de l'hypothèse nulle.

7.1. Choisir la portion de table correspondant à N_2 .

7.2. Entrée "rangée": valeur de U trouvée.

Entrée "colonne": effectif du plus petit échantillon.

Image: niveau de probabilité de l'hypothèse nulle pour un test à une issue.

7.3. S'il n'y a pas de raison de penser a priori que l'un des groupes est nécessairement supérieur à l'autre, le test a deux issues et il faut doubler le niveau de probabilité indiqué par la table.

7.4. En principe,

si $p > 0.05$, la différence est non significative.

si $0.05 \geq p > 0.01$, la différence est significative.

si $p \leq 0.01$, la différence est très significative.

7.5. S'il y a des rangs égaux, il peut se produire que U n'ait pas une valeur entière mais égale à un entier augmenté de 5 dixième (par exemple, 41.5).

Dans ces cas, il faut interpoler:

.Prendre l'image de l'entrée immédiatement inférieure à U (i).

.Prendre l'image de l'entrée immédiatement supérieure à U (i').

. $p = (i+i') / 2$.

PAS 8 Si N2 est supérieure à 8,

8.1. Consulter la table MW3.

Entrée rangée: N1.

Entrée colonne: N2.

Image: seuil de U au niveau $p=0.01$ (1 issue)

ou $p=0.02$ (2 issues).

8.2. Si la valeur de U trouvée en (6) est inférieure ou égale à l'image trouvée ci-dessus (8.1), la différence est significative au niveau $p=0.01$ si le test est à une issue et au niveau $p=0.02$ si le test est à deux issues.

Si la valeur de U trouvée en (6) est supérieure, passer au (8.3).

8.3. Consulter la table MW4.

Entrée rangée: N1.

Entrée colonne: N2.

Image: seuil de U au niveau $p=0.025$ (1 issue)

ou $p=0.05$ (2 issues).

8.4. Si la valeur de U trouvée en (6) est inférieure ou égale à l'image trouvée ci-dessous (8.3), la différence est significative au niveau $p=0.025$ si le test est à une issue et au niveau $p=0.05$ si le test est à deux issues.

8.5. Consulter la table MW5.

Entrée "rangée": N1.

Entrée "colonne": N2.

Image: seuil de U au niveau $p=0.05$ (1 issue)ou $p=0.1$ (1 issues).

8.6. Si la valeur de U trouvée en (6) est inférieure ou égale à l'image trouvée ci-dessus (8.5), la différence est significative au niveau $p=0.05$ si le test est à une issue et au niveau $p=0.1$ si le test est à deux issues.

PAS9 Ce paragraphe fait suite au PAS 5, au cas où $N2 > 20$.

Calculer

$$z = \left[2R1 - N1(n+1) \right] / \sqrt{N1 \cdot N2(N+1) / 3}$$

R1: somme des rangs des données du plus petit échantillon.

N1: effectif du plus petit échantillon.

N2: effectif du plus grand échantillon.

 $N = N1 + N2$.

PAS 10 Consulter la table du z (Laplace-Gauss).

Image: p.

PAS 11 Si $p \leq 0.01$, la différence est très significative.

Si $0.01 < p \leq 0.05$, la différence est significative.Si $p > 0.05$, la différence est non significative.

Annege.G.

TEST DE WILCOXON

Situations:

Ce test permet de déterminer si deux échantillons appariés (paires) sont significativement différents. Il est très utile pour évaluer un changement chez les mêmes individus. Les mesures "avant" et "après" constituent, dans ce cas, les paires de données. Le test de WILCOXON s'applique à des données métriques ou à des rangs.

Limites de validité:

Le test est valable quand les échantillons sont pairés et peut être appliqué lorsque les distributions ne sont pas normales ainsi qu'avec de très petits échantillons ($n=6$ paires).

La puissance du test de WILCOXON est de l'ordre de 95% de celle du test t .

Supposons que nous disposions de deux échantillons de données pairés:

A	B	C	D	E	F
A'	B'	C'	D'	E'	F'

Nous pouvons calculer la différence dans chaque paire:

a	b	c	d	e	f
---	---	---	---	---	---

où $a = A - A'$, $b = B - B'$, etc...

Si les deux échantillons ne sont pas équivalents, le fait pourra se marquer de deux manières sur les différences:

*Un signe sera plus fréquent que l'autre (à la limite, les différences pourraient avoir toutes le même signe).

*Les différences du signe le moins fréquent seront plus petites. Nous devons donc mesurer l'écart des deux groupes par une statistique qui tient compte de la dissymétrie des signes et de la grandeur relative (donc du rang) des différences. La somme des rangs des différences de signe le moins fréquent (appelée T) satisfait à ces deux exigences.

Si les groupes sont très dissemblables, la plupart des différences ont le même signe et ce sont surtout les plus petites différences qui ont des sens opposés. Par conséquent, la somme des différences du signe le moins fréquent est petite (peu de différences de signe et ces différences ont un rang bas).

La différence entre les deux groupes est d'autant plus significative que la valeur de T est petite.

ALGORITHME:

(1) Constituer un tableau à six colonnes.

- (2) Inscrire dans la première colonne le numéro de chaque paire.
- (3) Inscrire dans la deuxième colonne les données du premier échantillon.
- (4) Inscrire dans la troisième colonne les données du second échantillon.
- (5) Inscrire dans la troisième colonne la différence algébrique entre les données.
- (6) Assigner à chaque différence un rang en ne tenant compte que des valeurs absolues des différences.
 Inscrire les rangs dans la cinquième colonne en leur attribuant le même signe que la différence.
 Si plusieurs différences ont le même rang, on attribue à chacune le rang moyen, les différences doivent être rangées à partir de la plus petite (rang 1).
- (7) Chercher quel est le signe le moins fréquent et recopier dans la sixième colonne les valeurs absolues des rangs des différences de signe le moins fréquent.
- (8) Faire la somme dans la dernière colonne (traitée en 7). On obtient la statistique T.
- (9) Compter, dans la colonne des différences, celles qui ne sont pas nulles: on obtient ainsi "n" qu'on inscrit au bas de la colonne.
- (10) Si $n < 25$, consulter la table de WILCOXON.
 Lorsque le T trouvé est inférieur (ou égal) à la valeur tabulaire, la différence entre les groupes est significative au niveau considéré pour un test à deux issues.
 S'il s'agit d'un test à une issue, il faut diviser par deux le niveau de probabilité placé en tête de la colonne.

Si $n > 25$, transformer le T en Z en appliquant la formule:

$$Z = \left[T - n(n+1) / 4 \right] / \sqrt{ \left[n(n+1)(2n+1) / 24 \right]}$$

ou

$$Z = \left[4.9 T - 1.22 n(n+1) \right] / \sqrt{ n(n+1)(2n+1)}$$

- (11) Si $50 \leq n \leq 25$ et si on ne désire pas le niveau de probabilité exact mais simplement le seuil de signification, on peut utiliser la table du T, ce qui évite une transformation en Z.

Annexe.H.

RÉSULTATS DE L'ALGORITHME DE GILMORE ET GOMORY "ADAPTE"

I.OBJECTIF: MINIMISATION DES CHUTES

Commande n=°1:

<i>Commande</i>	85	32	81	77
<i>Production</i>	86	43	88	78
<i>Stock</i>	1	11	7	1
<i>Chute théorique = 7.96%</i>				
<i>Chute réelle = 11.94%</i>				
<i>Nombre de barres = 62</i>				
<i>Nombre de modèles = 5</i>				

Commande n=°2:

<i>Commande</i>	65	64	57	91	70	42
<i>Production</i>	91	64	156	91	273	64
<i>Stock</i>	26	0	99	0	103	22
<i>Chute théorique = 0%</i>						
<i>Chute réelle = 20.47%</i>						
<i>Nombre de barres = 155</i>						
<i>Nombre de modèles = 2</i>						

Commande n=°3:

<i>Commande</i>	33	72	54	61	52	71	56	83	59
<i>Production</i>	61	75	54	61	72	72	57	84	61
<i>Stock</i>	28	3	0	0	20	1	1	1	2
<i>Chute théorique = 0%</i>									
<i>Chute réelle = 7.89%</i>									
<i>Nombre de barres = 103</i>									
<i>Nombre de modèles = 6</i>									

Commande n°4:

<i>Commande</i>	31	87	24	98	42
<i>Production</i>	35	88	269	98	104
<i>Stock</i>	4	1	245	0	62
<i>Chute théorique = 0.206%</i>					
<i>Chute réelle = 37.00%</i>					
<i>Nombre de barres = 98</i>					
<i>Nombre de modèles = 3</i>					

Commande n°5:

<i>Commande</i>	59	52	25	72	46	67	85
<i>Production</i>	60	52	48	104	206	68	88
<i>Stock</i>	1	0	23	32	160	1	3
<i>Chute théorique = 0.120%</i>							
<i>Chute réelle = 31.369%</i>							
<i>Nombre de barres = 108</i>							
<i>Nombre de modèles = 4</i>							

Commande n°6:

<i>Commande</i>	95	62	24	75	44	85	98	86	85	60
<i>Production</i>	101	62	27	75	248	86	98	160	101	60
<i>Stock</i>	6	0	3	0	204	1	0	74	16	0
<i>Chute théorique = 0.046%</i>										
<i>Chute réelle = 25.67%</i>										
<i>Nombre de barres = 202</i>										
<i>Nombre de modèles = 7</i>										

Commande n°7:

<i>Commande</i>	72	24	69	93	88	109	60	66	116	10
<i>Production</i>	81	24	112	93	89	110	61	66	116	10
<i>Stock</i>	9	0	43	0	1	1	1	0	0	0
<i>Chute théorique = 1.409%</i>										
<i>Chute réelle = 6.782%</i>										
<i>Nombre de barres = 218</i>										
<i>Nombre de modèles = 8</i>										

Commande n°8:

<i>Commande</i>	79	121	17	52	28
<i>Production</i>	79	121	274	121	28
<i>Stock</i>	0	0	257	69	0
<i>Chute théorique = 1.386%</i>					
<i>Chute réelle = 42.766%</i>					
<i>Nombre de barres = 200</i>					
<i>Nombre de modèles = 3</i>					

Commande n°9:

<i>Commande</i>	76	70	25	71	88
<i>Production</i>	76	70	42	71	89
<i>Stock</i>	0	0	7	0	1
<i>Chute théorique = 15.411%</i>					
<i>Chute réelle = 17.869%</i>					
<i>Nombre de barres = 153</i>					
<i>Nombre de modèles = 4</i>					

Commande n°10:

<i>Commande</i>	111	41	46	39	26	16	86
<i>Production</i>	111	42	46	39	26	16	87
<i>Stock</i>	0	1	0	0	0	0	1
<i>Chute théorique = 4.074%</i>							
<i>Chute réelle = 4.416%</i>							
<i>Nombre de barres = 141</i>							
<i>Nombre de modèles = 9</i>							

Commande n°11:

<i>Commande</i>	15	6	6	6
<i>Production</i>	30	6	12	6
<i>Stock</i>	15	0	6	0
<i>Chute théorique = 0.63%</i>				
<i>Chute réelle = 42.81%</i>				
<i>Nombre de barres = 8</i>				
<i>Nombre de modèles = 3</i>				

Commande n°12:

<i>Commande</i>	150	60	60	60
<i>Production</i>	150	120	60	2640
<i>Stock</i>	0	60	0	2580
<i>Chute théorique = 0%</i>				
<i>Chute réelle = 64.15%</i>				
<i>Nombre de barres = 130</i>				
<i>Nombre de modèles = 2</i>				

II.OBJECTIF: MINIMISATION DU STOCK DE BARRES

Commande n°1:

Commande	85	32	81	77
Production	85	32	81	78
Stock	0	0	0	1
Chute théorique = 7.81%				
Chute réelle = 8.15%				
Nombre de barres = 61				
Nombre de modèles = 5				

Commande n°2:

Commande	65	64	57	91	70	42
Production	65	65	60	91	70	43
Stock	0	1	3	0	0	1
Chute théorique = 1.30%						
Chute réelle = 2.38%						
Nombre de barres = 79						
Nombre de modèles = 7						

Commande n°3:

Commande	33	72	54	61	52	71	56	83	59
Production	33	72	54	61	52	71	56	83	59
Stock	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Chute théorique = 0.105%									
Chute réelle = 0.105%									
Nombre de barres = 94									
Nombre de modèles = 12									

Commande n°4:

<i>Commande</i>	31	87	24	98	42
<i>Production</i>	32	88	24	100	42
<i>Stock</i>	1	1	0	2	0
<i>Chute théorique = 3.070%</i>					
<i>Chute réelle = 4.500%</i>					
<i>Nombre de barres = 59</i>					
<i>Nombre de modèles = 5</i>					

Commande n°5:

<i>Commande</i>	59	52	25	72	46	67	85
<i>Production</i>	59	52	25	73	46	67	86
<i>Stock</i>	0	0	0	1	0	0	1
<i>Chute théorique = 0.785%</i>							
<i>Chute réelle = 1.345%</i>							
<i>Nombre de barres = 75</i>							
<i>Nombre de modèles = 10</i>							

Commande n°6:

<i>Commande</i>	95	62	24	75	44	85	98	86	85	60
<i>Production</i>	95	62	26	75	44	85	100	87	85	60
<i>Stock</i>	0	0	2	0	0	0	2	1	0	0
<i>Chute théorique = 1.775%</i>										
<i>Chute réelle = 2.382%</i>										
<i>Nombre de barres = 154</i>										
<i>Nombre de modèles = 12</i>										

Commande n°7:

<i>Commande</i>	72	24	69	93	88	109	60	66	116	10
<i>Production</i>	72	24	70	93	88	109	61	66	118	10
<i>Stock</i>	0	0	1	0	0	0	1	0	2	0
<i>Chute théorique = 1.906%</i>										
<i>Chute réelle = 2.192%</i>										
<i>Nombre de barres = 208</i>										
<i>Nombre de modèles = 10</i>										

Commande n°8:

<i>Commande</i>	79	121	17	52	28
<i>Production</i>	79	123	17	52	28
<i>Stock</i>	0	2	0	0	0
<i>Chute théorique = 5.696%</i>					
<i>Chute réelle = 6.174%</i>					
<i>Nombre de barres = 122</i>					
<i>Nombre de modèles = 6</i>					

Commande n°9:

<i>Commande</i>	76	70	25	71	88
<i>Production</i>	76	70	25	74	88
<i>Stock</i>	0	0	0	3	0
<i>Chute théorique = 16.400%</i>					
<i>Chute réelle = 16.830%</i>					
<i>Nombre de barres = 145</i>					
<i>Nombre de modèles = 5</i>					

Commande n°10:

<i>Commande</i>	111	41	46	39	26	16	86
<i>Production</i>	111	42	46	39	26	16	87
<i>Stock</i>	0	1	0	0	0	0	1
<i>Chute théorique = 4.074%</i>							
<i>Chute réelle = 4.416%</i>							
<i>Nombre de barres = 141</i>							
<i>Nombre de modèles = 9</i>							

Commande n°11:

<i>Commande</i>	15	6	6	6
<i>Production</i>	15	6	6	6
<i>Stock</i>	0	0	0	0
<i>Chute théorique = 8.500%</i>				
<i>Chute réelle = 8.500%</i>				
<i>Nombre de barres = 5</i>				
<i>Nombre de modèles = 3</i>				

Commande n°12:

<i>Commande</i>	150	60	60	60
<i>Production</i>	150	60	60	60
<i>Stock</i>	0	0	0	0
<i>Chute théorique = 0.543%</i>				
<i>Chute réelle = 0.543%</i>				
<i>Nombre de barres = 46</i>				
<i>Nombre de modèles = 3</i>				

Annexe I.

PROBLEME DU VOYAGEUR DE COMMERCE

I- FORMULATION DU PROBLEME DU VOYAGEUR DE COMMERCE:

Dantzig, Fulkerson et Johnson [DAN-59] ont été parmi les premiers à proposer une formulation du PVC symétrique sous forme de *programme linéaire en nombres entiers*. Pour le résoudre, ils ont élaboré un mécanisme par *relaxation de contraintes* dont le principe de base a été repris et perfectionné par de nombreux chercheurs par la suite. Cette méthode consiste à résoudre un premier problème relaxé contenant un nombre restreint de contraintes et à y ajouter graduellement les contraintes non explicitement présentes à mesure que l'on découvre qu'elles sont violées [LAP-83].

$$\text{Minimiser } Z = \sum_{i,j} C_{ij} X_{ij} \quad (1)$$

$$\text{Sujet à: } \sum_i X_{ik} + \sum_j X_{kj} = 2 \quad (k \in N) \quad (2)$$

$$\sum_i \sum_j X_{ij} \leq |S| - 1 \quad (S \subseteq N) \quad (3)$$

$$X_{ij} = 0 \text{ ou } 1 \quad (i, j \in N) \quad (4)$$

$N = \{1, 2, \dots, n\}$ désigne l'ensemble des villes à visiter.

$C = (C_{ij})$ représente la matrice des distances inter-villes.

X_{ij} est la variable de décision qui indique si l'arête (i, j) est utilisée ou non dans la solution optimale (X_{ij} est définie pour $i < j$ lorsque C est symétrique).

Les contraintes (2), *contraintes de degré*, indiquent qu'un seul et même véhicule rentre et sort de chaque ville.

Les contraintes (3), *contraintes d'élimination de sous-tours*, garantissent que la solution finale sera formée d'un seul tour passant par toutes les villes.

Les contraintes (4) sont des *contraintes d'intégrité*.

II- APPROCHES DE RESOLUTION DU PROBLEME DU VOYAGEUR DE COMMERCE:

II.1. APPROCHES EXACTES:

Le principe de l'approche de résolution exacte consiste à déterminer par une méthode donnée (relaxation lagrangienne, méthode des sous-gradients, etc...) des bornes inférieures qui seront utilisées par la suite dans une *procédure par séparation et évaluation* (branch and bound en anglais).

Les travaux de Held et Karp, de Christofides, de Hansen et Krarup ainsi que d'autres (Voir [BOD-83] pour références) s'inscrivent justement dans cette catégorie.

II.2. APPROCHES HEURISTIQUES:

Les méthodes heuristiques les plus connues se répartissent en trois classes:

*Les procédures de construction de tournées (*Tour Construction Procedures*).

*Les procédures d'affinage de tournées (*Tour Improvement Procedures*).

*Les procédures mixtes (*Composite Procedure*).

II.2.1. Procédures de construction de tournées:

On peut y retrouver:

a) *Nearest Neighbour Procedure*:

Dûe à Rosenkrantz, Stearns et Lewis [ROS-77], le principe de cette procédure peut être décrit comme suit:

Etape 1: Démarrer la tournée à partir d'un noeud quelconque.

Etape 2: Trouver le sommet le plus proche du dernier sommet de la tournée et l'ajouter à celle-ci.

Etape 3: Répéter l'Etape 2 jusqu'à épuisement des sommets, puis joindre le sommet initial au sommet final.

b) *Clark and Wright Savings*:

Basée sur le principe d'*économie*, cette procédure agit selon les étapes suivantes:

Étape 1: Retenir un sommet quelconque, noté 1;

Étape 2: Calculer les économies $S_{ij} = C_{ij} + C_{1i} - C_{1j}$ et les classer en ordre décroissant pour $i, j = 2, 3, \dots, n$.

Étape 3: Relier les sommets selon l'ordre ainsi établi.

c) *Insertion Procedures:*

Une procédure d'insertion considère une tournée formée de k sommets, à la $k^{\text{ème}}$ itération et détermine le prochain sommet à insérer (étape de sélection) ensuite l'endroit de l'insertion (étape d'insertion).

Il existe plusieurs manières de réaliser l'insertion:

****Nearest Insertion**

La procédure de l'insertion la "plus proche" opère ainsi:

Étape 1: Initialiser la tournée avec le sommet i .

Étape 2: Trouver le sommet k tel que C_{ik} soit minimal et former la tournée $i-k-1$.

Étape 3 (Sélection): Trouver le sommet k le plus proche de la tournée.

Étape 4 (Insertion): Trouver l'arc (i, j) de la tournée qui minimise $C_{ik} + C_{kj} - C_{ij}$ et insérer k entre i et j .

Étape 5: Aller à l'étape 3 s'il reste des sommets.

****Cheapest Insertion**

La procédure de l'insertion la "moins coûteuse" est identique à la précédente, à l'exception des étapes 3 et 4 qui sont remplacées par:

Étape 3: Trouver (i, j) dans la tournée et k à l'extérieur de la tournée tels que $C_{ik} + C_{kj} - C_{ij}$ soit minimal.

Étape 4: Insérer k entre i et j .

****Arbitrary Insertion**

La procédure de l'insertion "arbitraire" est identique à celle de l'insertion la "plus proche" avec comme seule différence que le sommet k est sélectionné arbitrairement avant d'être inséré dans la tournée.

****Farthest Insertion**

La procédure de l'insertion la "plus éloignée" adopte les mêmes étapes que celles de l'insertion la "plus proche" mais considère le sommet le plus éloigné à l'étape 3 et remplace "minimal" par "maximal" à l'étape 2.

La série des procédures d'insertion reste encore longue et il serait fastidieux de les énumérer toutes (*Quick Insertion* ou *Nearest Addition*, *Convex Hull Insertion*, *Greatest Angle Insertion*, *Difference x Ratio Insertion*, etc...).

Toutefois, des procédures utilisant des principes différents existent en aussi grand nombre dont: *Minimal Spanning Tree Approach*, *Nearest Merger*, etc...(voir [BOD-83] pour plus de détails).

II.2.2.Procédures d'affinage de tournées:

Les meilleures heuristiques pour la résolution du PVC sont probablement celles qui consistent à échanger (permuter) des branches ou arcs dans une tournée. Lin [LIN-65] a commencé par introduire les procédures *2-opt* et *3-opt* avant de définir, en collaboration avec Kernighan [LIN-73], une procédure plus générale *r-opt* pour $r \geq 3$.

Un voyage est r-optimal s'il n'est pas possible d'améliorer ce voyage en échangeant trois arcs quelconques avec trois autres.
Un voyage *r-optimal* est obtenu par des améliorations successives sur un voyage initial choisi arbitrairement.

Ces procédures se déroulent en trois étapes:

Etape 1: Trouver une tournée initiale (généralement de manière aléatoire).

Etape 2: Améliorer la tournée en substituant à un ensemble de r arcs, un autre ensemble de même nombre d'arcs.

Etape 3: Reprendre l'étape 2 jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de changement (la solution est alors dite *r-optimale*).

Pour une tournée donnée comprenant n clients, le nombre de combinaisons à considérer est de l'ordre de n^r puisqu'il y a C_n^r façons d'enlever r arcs et $r!$ manières de reconnecter les chaînes. Plus la valeur de r est élevée, meilleure est la solution mais, par la même occasion, l'effort de calcul augmente considérablement. Aussi, il est rare que r prenne des valeurs supérieures à trois dans la pratique.

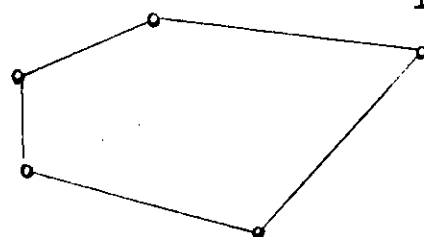
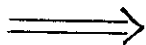
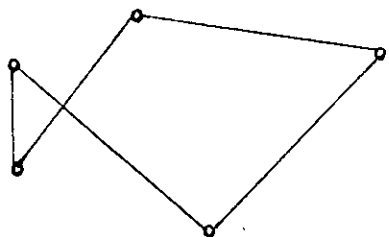


Illustration d'une opération 2-opt

La procédure *Or-opt* développée par Or [OR-76] est similaire par son principe, mais considère à la fois toutes les opérations d'échange portant sur deux arcs ou jonctions, et celles qui conduisent à insérer une chaîne d'au plus trois sommets adjacents entre deux autres sommets du graphe.

II.2.3. Procédures mixtes:

Le principe de base est le suivant:

Etape 1: Utiliser l'une des procédures de construction pour obtenir une tournée initiale.

Etape 2: Appliquer la procédure 2-opt.

Etape 3: Appliquer la procédure 3-opt.

Il existe plusieurs variantes qui consistent à ne pas passer par l'une des étapes 2 ou 3, ou encore à réitérer ces mêmes étapes un certain nombre de fois.

Remarque:

L'essentiel de cet ANNEXE a été extrait de la thèse de SARI [SAR-90].

Pour plus de détails, se reporter à l'ouvrage.

[SAR-90] M.SARI (1990) "*Investigation des modèles à coûts unitaires variables dans le cas d'un système à dépôt unique ou à plusieurs dépôts*"

Thèse de Magister en Génie-Industriel,
Ecole Nationale Polytechnique.

Annexe J.

ORDONNANCEMENT DE LA PRODUCTION PAR LA MINIMISATION DES EN-COURS

Gamme N=°1:

Modèle sélectionné	Niveau en-cours		Niveau rupture	
13	2		2	
6	4		2	
10	5		1	
6	8		10	
9	13		4	
12	24		16	
4	44		30	
3	52		43	
7	72		59	
2	64		130	
5	45		54	
8	40		66	
Totaux/Moy.	417	34	373	31

Gamme N=°2:

Modèle sélectionné	Niveau en-cours		Niveau rupture	
13	2		2	
6	3		1	
10	5		1	
1	9		8	
9	14		3	
12	24		12	
3	53		41	
4	48		36	
2	66		114	
5	54		59	
8	24		28	
7	33		45	
Totaux/Moy.	335	27	350	29

Gamme N=°4:

Modèle sélectionné	Niveau en-cours		Niveau rupture	
13	1		3	
6	3		2	
10	6		3	
1	8		9	
9	11		3	
12	24		13	
4	50		37	
3	48		30	
7	70		60	
2	59		121	
5	49		73	
8	34		54	
Totaux/Moy.	363	30	408	34

Gamme N=°5:

Modèle sélectionné	Niveau en-cours		Niveau rupture	
13	1		3	
6	3		2	
10	6		3	
1	9		9	
9	12		4	
12	24		13	
3	52		40	
4	48		38	
2	65		121	
5	50		58	
8	31		40	
7	39		60	
Totaux/Moy.	340	28	391	32

Gamme N°5:

Modèle sélectionné	Niveau en-cours		Niveau rupture	
13	2		2	
6	4		2	
10	5		1	
1	9		10	
9	14		3	
12	24		11	
4	43		33	
3	44		42	
7	60		50	
2	65		121	
5	55		70	
8	33		54	
Totaux/Moy.	358	29	399	33

Gamme N°6:

Modèle sélectionné	Niveau en-cours		Niveau rupture	
13	1		3	
6	4		3	
10	5		2	
1	8		10	
9	12		5	
12	24		13	
4	53		32	
3	51		26	
2	62		105	
5	44		43	
8	41		41	
7	40		59	
Totaux/Moy.	345	28	342	28

Gamme N°7:

Modèle sélectionné	Niveau en-cours		Niveau rupture	
13	2		4	
6	2		2	
10	5		1	
1	10		12	
9	13		4	
12	24		14	
3	46		32	
4	41		24	
7	70		54	
2	65		124	
5	51		70	
8	37		57	
Totaux/Moy.	366	30	398	33

Gamme N°8:

Modèle sélectionné	Niveau en-cours		Niveau rupture	
13	2		2	
6	4		2	
10	6		2	
1	8		10	
9	14		4	
12	24		14	
4	45		28	
3	45		30	
2	67		126	
5	55		60	
8	30		41	
7	42		62	
Totaux/Moy.	342	28	381	31

Annexe K.

ORDONNANCEMENT DE LA PRODUCTION PAR LA MINIMISATION DES TAUX
D'EN-COURS

Gamme N=°1:

Modèle sélectionné	En-cours		Niveau de rupture
	Niveau	Taux	
2	97	55.11	141
13	1	25.00	3
1	7	46.66	12
4	34	40.96	45
10	2	33.33	2
3	48	38.40	92
5	62	51.24	67
12	11	33.33	20
9	4	25.00	6
7	37	41.11	55
8	40	38.09	65
11	5	5.37	2
Totaux	348		510
Moyennes	29		42

Gamme N=°2:

Modèle sélectionné	En-cours		Niveau de rupture
	Niveau	Taux	
2	98	56.97	138
13	1	25.00	3
1	8	57.14	12
4	42	49.41	55
3	49	38.58	95
6	2	50.00	2
5	66	52.80	75
10	1	16.66	1
8	28	34.14	30
9	4	25.00	6
7	29	35.80	38
11	30	37.50	14
Totaux	358		469
Moyennes	29		39

Gamme N=°3:

Modèle sélectionné	En-cours		Niveau de rupture	
	Niveau	Taux		
13	1	25.00	3	
2	102	60.00	140	
1	7	50.00	11	
4	35	40.69	49	
3	47	36.43	95	
7	42	51.85	51	
5	55	38.19	83	
9	4	25.00	6	
8	30	31.57	45	
11	22	25.88	11	
12	3	12.50	3	
6	1	25.00	1	
Totaux/Moy.	349	29	498	41

Gamme N=°4:

Modèle sélectionné	En-cours		Niveau de rupture	
	Niveau	Taux		
13	1	25.11	3	
2	93	52.84	137	
1	8	61.53	11	
4	39	46.98	50	
3	48	38.40	92	
5	67	52.75	78	
10	1	20.00	0	
12	6	21.42	10	
9	4	26.66	5	
8	31	35.63	38	
7	40	44.44	58	
11	5	5.37	2	
Totaux/Moy.	343	28	484	40

Gamme N=°5:

Modèle sélectionné	En-cours		Niveau de rupture	
	Niveau	Taux		
2	107	57.52	161	
13	1	33.33	2	
4	44	61.97	43	
1	6	37.50	12	
3	54	42.85	99	
6	2	40.00	3	
12	13	46.42	17	
5	67	53.17	77	
9	4	25.00	6	
8	28	32.18	35	
10	3	37.50	5	
7	35	38.46	54	
Totaux/Moy.	364	30	51	42

Gamme N=°6:

Modèle sélectionné	En-cours		Niveau de rupture	
	Niveau	Taux		
13	1	25.00	3	
2	90	58.82	111	
1	8	42.10	17	
4	41	51.89	48	
3	49	40.16	90	
6	1	25.00	1	
5	60	49.18	66	
10	1	20.00	0	
12	10	31.25	18	
9	4	25.00	6	
7	44	50.00	60	
8	34	35.41	50	
Totaux/Moy.	343	28	470	390

Gamme N=*7:

Modèle sélectionné	En-cours		Niveau de rupture	
	Niveau	Taux		
13	2	50.00	4	
6	2	50.00	2	
2	96	61.14	121	
1	9	50.00	17	
4	35	41.17	48	
3	48	36.92	97	
7	43	54.43	50	
5	53	38.12	76	
9	4	26.66	5	
10	2	28.57	3	
8	35	36.45	51	
11	22	26.19	10	
Totaux/Moy.	351	29	484	40

Gamme N=*8:

Modèle sélectionné	En-cours		Niveau de rupture	
	Niveau	Taux		
2	100	59.88	135	
1	8	61.53	11	
4	37	48.05	42	
13	1	20.00	4	
3	54	42.51	100	
12	15	53.57	19	
5	57	43.18	73	
9	4	25.00	6	
8	32	35.16	43	
10	3	37.50	5	
7	41	45.55	59	
11	5	5.37	2	
Totaux/Moy.	357	29	499	41

Gamme N=*9:

Modèle sélectionné	En-cours		Niveau de rupture	
	Niveau	Taux		
13	0	00.00	2	
1	7	46.66	12	
2	100	56.17	146	
4	36	42.85	48	
3	60	48.38	103	
6	2	40.00	3	
12	14	50.00	18	
5	50	39.37	61	
9	4	25.00	6	
10	3	37.50	5	
7	40	41.23	65	
8	45	43.26	69	
Totaux/Moy.	361	30	538	44

Gamme N=*10:

Modèle sélectionné	En-cours		Niveau de rupture	
	Niveau	Taux		
13	2	50.00	4	
6	2	50.00	2	
2	99	57.89	138	
1	7	58.33	9	
4	33	41.25	41	
3	46	35.93	93	
7	42	51.85	51	
5	59	40.41	89	
9	4	25.00	6	
8	32	32.98	49	
11	17	19.54	8	
12	1	4.16	1	
Totaux/Moy.	344	28	491	40

Annexe L.

**ORDONNANCEMENT DE LA PRODUCTION
PAR
LA MINIMISATION DES RUPTURES DE STOCKS**

Gamme N=°1:

Modèle sélectionné	Niveau des en-cours	Niveau de rupture
10	5	1
13	2	2
6	4	2
9	13	4
1	7	7
12	24	16
4	44	30
11	96	34
8	72	35
5	89	39
3	63	27
2	32	25
Totaux	451	222
Moyennes	37	18

Gamme N=°2:

Modèle sélectionné	Niveau des en-cours	Niveau de rupture
6	3	1
10	5	1
13	2	1
9	14	3
1	9	7
12	24	12
11	96	30
8	72	32
7	66	29
5	95	35
4	60	26
3	58	22
Totaux	504	199
Moyennes	42	16

Gamme N=°3:

Modèle sélectionné	Niveau des en-cours	Niveau de rupture
6	2	2
13	2	3
10	6	3
9	11	3
1	8	8
12	24	13
11	96	26
8	72	27
4	55	28
3	61	33
5	83	40
2	29	24
Totaux	449	210
Moyennes	37	17

Gamme N=°4:

Modèle sélectionné	Niveau des en-cours	Niveau de rupture
6	2	2
13	2	3
10	6	3
9	12	4
1	9	8
12	24	13
11	96	27
8	70	31
7	67	31
5	98	37
3	65	23
4	57	30
Totaux	508	212
Moyennes	42	17

Gamme N=°5:

Modèle sélectionné	Niveau des en-cours	Niveau de rupture
4	5	1
13	2	2
6	4	2
9	14	4
1	9	9
12	24	11
11	96	25
8	71	28
4	45	26
5	92	35
3	55	19
7	72	32
Totaux	489	194
Moyennes	40	16

Gamme N=°6:

Modèle sélectionné	Niveau des en-cours	Niveau de rupture
10	4	2
13	2	3
6	4	3
9	12	4
1	8	10
12	24	13
11	96	23
8	74	27
7	64	26
3	66	28
4	55	35
5	91	43
Totaux	500	217
Moyennes	41	18

Gamme N°7:

Modèle sélectionné	Niveau des en-cours	Niveau de rupture
6	2	2
10	5	1
13	2	2
9	13	4
1	10	12
12	24	14
8	67	24
11	96	21
7	66	25
3	63	28
4	48	33
5	82	38
Totaux	478	204
Moyennes	39	17

Gamme N°8:

Modèle sélectionné	Niveau des en-cours	Niveau de rupture
13	2	2
10	6	2
6	4	2
9	14	4
1	8	9
12	24	14
11	96	27
8	74	28
4	46	22
7	72	32
3	62	32
5	87	41
Totaux	495	215
Moyennes	41	17

Gamme N°9:

Modèle sélectionné	Niveau des en-cours	Niveau de rupture
6	0	0
10	5	2
13	2	3
9	13	5
1	7	10
12	24	18
8	69	30
11	96	25
7	62	27
4	62	37
5	93	33
3	55	16
Totaux	488	206
Moyennes	40	17

Gamme N°10:

Modèle sélectionné	Niveau des en-cours	Niveau de rupture
6	2	2
10	5	1
13	2	2
9	13	3
1	8	8
12	24	12
8	70	23
11	96	21
4	50	25
7	72	38
3	62	38
5	80	42
Totaux	484	215
Moyennes	40	17

Annexe.Z.
 RESULTATS DES PROBLEMES TEST
 Planification des stocks de tôles

I. Procédure Heuristique Séquentielle à "deux phases":

Commande N=°1:

Modèle n=°	Structure du modèle										Chute (%)
1	0	45	0	85	0	10	0	60	0	27	3.2710
2	71	0	21	3	13	0	0	0	50	0	2.2429
3	2	2	0	1	50	27	11	19	3	0	3.3868
Totaux	3 tôles										

Commande N=°2:

Modèle n=°	Structure du modèle										Chute (%)
1	20	0	65	0	58	79	0	54	62	0	0.8821
2	10	62	31	28	0	13	9	0	25	3	3.4189
3	5	3	0	3	4	0	18	4	1	21	22.9699
Totaux	3 tôles										

Commande N=°3:

Modèle n=°	Structure du modèle										Chute (%)
1	0	0	0	4	0	45	0	56	7	72	1.4620
2	0	17	0	0	36	0	11	0	60	0	1.5212
3	3	0	18	28	3	1	36	0	0	2	3.7354
4	8	1	7	0	0	0	6	4	0	0	66.2277
Totaux	4 tôles										

Commande N=°4:

Modèle n=°	Structure du modèle										Chute (%)
1	0	85	0	0	0	56	0	56	0	48	1.5138
2	46	4	0	46	18	13	0	0	6	0	1.0890
3	1	0	37	33	9	0	17	3	1	1	10.9434
Totaux	3 tôles										

Commande N=°5:

Modèle n=°	Structure du modèle										Chute (%)
1	0	8	0	0	18	0	16	30	0	0	4.7451
2	9	0	8	0	0	0	16	4	0	44	3.7937
3	0	0	6	14	0	18	0	1	36	0	5.1436
4	0	5	2	6	6	10	0	1	4	0	49.6436
Totaux	4 tôles										

Commande N=°6:

Modèle n=°	Structure du modèle										Chute (%)
1	72	0	0	0	60	0	8	0	52	0	0.6912
2	0	45	0	90	0	0	0	74	0	27	2.1711
3	1	2	21	0	4	38	4	7	3	2	8.3559
Totaux	3 tôles										

Commande N=°7:

Modèle n=°	Structure du modèle										Chute (%)
1	0	0	17	52	91	0	0	0	30	0	2.6512
2	0	70	0	0	0	24	64	0	15	66	2.7771
3	41	7	1	3	0	8	5	10	1	16	18.0479
Totaux	3 tôles										

Commande N=°8:

Modèle n=°	Structure du modèle										Chute (%)
1	60	58	0	72	30	52	0	0	0	20	1.4841
2	33	28	80	1	30	6	12	45	0	10	3.5650
3	0	0	0	0	7	2	42	2	41	4	20.7065
Totaux	3 tôles										

Commande N=°9:

Modèle n=°	Structure du modèle										Chute (%)
1	0	18	69	15	0	0	32	81	0	0	2.3200
2	34	0	15	30	0	65	0	9	0	16	2.5318
3	29	8	0	2	11	4	0	0	53	1	11.5999
Totaux	3 tôles										

Commande N=°10:

Modèle n=°	Structure du modèle										Chute (%)
1	0	24	0	12	32	44	50	0	0	36	0.8111
2	0	4	34	42	32	38	33	8	0	0	1.3322
3	17	2	9	2	5	0	12	5	26	3	6.2243
Totaux	3 tôles										

II. Procédure Heuristique Séquentielle à "recherche arborescente"

II.1. Critère de performance "partiel": SURFACE DE CHUTE MINIMALE

Commande N=°1:

Modèle n=°	Structure du modèle										Chute (%)
1	4	46	0	86	52	8	0	74	0	0	0.3694
2	65	0	7	0	10	0	0	0	41	24	1.3730
3	4	1	14	3	1	29	11	5	12	3	7.1578
Totaux	3 tôles										

Commande N=°2:

Modèle n=°	Structure du modèle										Chute (%)
1	0	43	96	4	56	92	0	9	88	11	0.9676
2	23	22	0	22	6	0	0	49	0	0	3.6848
3	12	0	0	5	0	0	27	0	0	13	22.6192
Totaux	3 tôles										

Commande N=°3:

Modèle n=°	Structure du modèle										Chute (%)
1	0	0	0	0	0	45	7	56	9	54	0.7579
2	4	0	19	0	36	1	32	0	6	0	1.6586
3	0	18	5	22	0	0	14	3	52	2	1.6868
4	7	0	1	10	3	0	0	1	0	0	68.8430
Totaux	4 tôles										

Commande N=°4:

Modèle n=°	Structure du modèle										Chute (%)
1	46	89	30	46	0	8	0	0	0	0	0.6526
2	0	0	6	11	0	56	0	56	0	49	0.9896
3	1	0	1	0	27	5	17	3	7	0	11.9050
Totaux	3 tôles										

Commande N=°5:

Modèle n=°	Structure du modèle										Chute (%)
1	0	0	14	19	9	20	0	0	0	0	4.1715
2	0	10	0	0	9	0	20	15	12	14	1.5724
3	9	0	2	0	6	7	8	20	8	20	2.4965
4	0	3	0	1	0	1	2	1	15	14	55.0854
Totaux	4 tôles										

Commande N=°6:

Modèle n=°	Structure du modèle										Chute (%)
1	9	0	0	86	52	36	0	59	23	0	0.7036
2	64	21	12	4	12	2	0	32	31	6	1.0227
3	0	26	9	0	0	0	12	0	1	23	9.4917
Totaux	3 tôles										

Commande N=*7:

Modèle n=°	Structure du modèle										Chute (%)
1	6	75	0	25	91	0	69	0	10	73	1.1182
2	32	2	9	30	0	0	0	0	35	6	1.7831
3	3	0	9	0	0	32	0	10	1	3	20.5748
Totaux	3 tôles										

Commande N=*8:

Modèle n=°	Structure du modèle										Chute (%)
1	80	80	79	0	0	0	37	0	6	28	1.8139
2	13	6	1	31	34	58	15	7	27	0	0.7603
3	0	0	0	42	33	2	2	40	8	6	6.0110
Totaux	3 tôles										

Commande N=*9:

Modèle n=°	Structure du modèle										Chute (%)
1	13	0	77	12	0	67	16	90	22	0	0.6388
2	43	20	0	27	10	0	0	0	10	0	1.4702
3	7	6	2	8	1	2	16	0	21	17	14.3428
Totaux	3 tôles										

Commande N=*10:

Modèle n=°	Structure du modèle										Chute (%)
1	0	24	0	2	5	82	95	12	0	20	1.2436
2	0	4	19	53	62	0	0	1	0	18	0.8366
3	17	2	24	1	0	2	0	0	26	1	6.2874
Totaux	3 tôles										

II.1. Critère de performance "partiel": LONGUEUR DE CHÛTE MINIMALE
a) Choix non contraint (hasard):

Commande N=°1:

Modèle n=°	Structure du modèle										Chute (%)
1	4	46	0	86	52	8	0	74	0	0	0.3694
2	68	0	5	1	11	24	2	5	6	22	1.3519
3	1	1	16	2	0	5	9	0	47	7	7.1794
Totaux	3 tôles										

Commande N=°2:

Modèle n=°	Structure du modèle										Chute (%)
1	15	7	93	0	56	64	0	0	33	23	1.0855
2	0	12	0	31	0	27	27	15	49	0	0.5643
3	20	46	3	0	6	1	0	43	6	1	25.6220
Totaux	3 tôles										

Commande N=°3:

Modèle n=°	Structure du modèle										Chute (%)
1	0	0	10	0	0	0	48	60	0	60	1.4325
2	0	18	0	42	9	5	0	0	38	0	0.6040
3	9	0	9	0	20	35	0	0	29	14	2.5179
4	2	0	6	0	10	6	5	0	0	0	68.3919
Totaux	4 tôles										

Commande N=°4:

Modèle n=°	Structure du modèle										Chute (%)
1	42	89	0	58	0	0	3	42	0	17	0.4105
2	1	0	19	20	23	14	0	17	0	32	1.9011
3	4	0	18	1	4	55	14	0	7	0	11.2346
Totaux	3 tôles										

Commande N=°5:

Modèle n=°	Structure du modèle										Chute (%)
1	9	0	12	15	15	0	7	4	0	0	0.7030
2	0	8	0	0	9	18	14	24	0	0	2.9407
3	0	4	3	0	0	10	9	6	32	24	2.1344
4	0	1	1	5	0	0	2	2	8	20	57.5478
Totaux	4 tôles										

Commande N=°6:

Modèle n=°	Structure du modèle										Chute (%)
1	54	11	0	65	21	0	8	60	45	0	0.9254
2	18	2	12	9	42	10	0	21	8	24	0.7487
3	1	34	9	16	1	28	4	0	2	5	9.5336
Totaux	3 tôles										

Commande N=°7:

Modèle n=°	Structure du modèle										Chute (%)
1	4	77	6	0	91	0	68	0	18	82	0.7738
2	36	0	6	54	0	0	0	0	19	0	2.3957
3	1	0	6	1	0	32	1	10	9	0	20.3066
Totaux	3 tôles										

Commande N=°8:

Modèle n=°	Structure du modèle										Chute (%)
1	92	81	75	0	0	4	45	21	15	0	0.7296
2	0	0	4	65	39	0	7	23	25	12	0.5829
3	1	5	1	8	28	56	2	3	1	22	24.4430
Totaux	3 tôles										

Commande N=*9:

Modèle n°	Structure du modèle										Chute (%)
	3	0	79	29	1	61	5	83	31	0	
1	3	0	79	29	1	61	5	83	31	0	0.5995
2	26	9	0	16	6	0	25	7	20	0	1.6057
3	34	17	5	2	4	2	2	0	2	17	14.2465
Totaux	3 tôles										

Commande N=*10:

Modèle n°	Structure du modèle										Chute (%)
	0	8	0	32	21	0	59	11	0	36	
1	0	8	0	32	21	0	59	11	0	36	0.2504
2	10	0	22	24	46	82	36	0	8	0	1.5001
3	7	22	21	0	2	0	0	2	18	3	6.6172
Totaux	3 tôles										

b) Choix contraint (satisfaction de la commande au plus tôt):

Commande N°	Modèle 1	Modèle 2	Modèle 3	Modèle 4
1	1.1399	2.5580	5.2028	-
2	0.9692	1.5910	24.7116	-
3	1.7111	2.5402	1.8013	66.8937
4	0.4510	4.3890	8.7062	-
5	4.8228	2.9410	3.4704	52.0918
6	1.1905	3.5884	6.4393	-
7	0.3310	1.6004	21.5448	-
8	1.7312	2.6900	21.3344	-
9	2.9596	1.2506	12.2415	-
10	2.3221	2.7517	3.2938	-