

11/95

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT DE GENIE INDUSTRIEL



PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

**METHODE DE RESOLUTION DU PROBLEME DE MISE EN
LIGNE DU FLUX DANS UN ATELIER MULTI-PRODUITS,
BASEE SUR UN MODELE MATHEMATIQUE**
APPLICATION : ATELIER "ferrures"

Proposé par :

Mr A. MEKARNIA

Mr T.LAMRAOUI

Etudié par :

Mr Y. SAHRAOUI

Mr A. BENOSMAN

Dirigé par :

Mr. A. MEKARNIA

Mr T.LAMRAOUI

PROMOTION

JUN 1995

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT DE GENIE INDUSTRIEL

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

***METHODE DE RESOLUTION DU PROBLEME DE MISE EN
LIGNE DU FLUX DANS UN ATELIER MULTI-PRODUITS,
BASEE SUR UN MODELE MATHEMATIQUE***

APPLICATION : ATELIER "ferrures"

Proposé par :

Mr A. MEKARNIA

Mr T.LAMRAOUI

Etudié par :

Mr Y. SAHRAOUI

Mr A. BENOSMAN

Dirigé par :

Mr. A. MEKARNIA

Mr T.LAMRAOUI

PROMOTION

JUIN 1995

ملخص :

هذا العمل موجه لدراسة مختلف أشكال التدفق الإنتاجي وبالخصوص الشكل على الخط ، الهدف من هذه الدراسة هو تقديم طريقة حل بواسطة الوضع على الخط للتدفق في الورشات المتعددة المنتوجات اعتمادا على نموذج رياضي .

Résumé :

Ce travail est consacré à l'étude des différentes formes de flux de production , notamment les formes en lignes. Notre objectif est de proposer une démarche de résolution pour la mise en ligne des ateliers MULTI-PRODUITS, basée sur une modélisation mathématique.

Abstract :

The aim of this work is the study of different production flow layouts, specially flows-lines. We present an approach to the MULTI-PRODUCTS flow-line problem based on a mathematical model.

Dédicaces

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

À la mémoire de mon oncle Omar Khiam, je resterai toute ma vie marqué par sa bonté et sa sagesse,

À la mémoire de mon cousin, mon grand frère et mon meilleur ami Salim, je ne t'oublierai jamais,

À mon oncle Fouzi à qui je souhaite un prompt rétablissement,

À ma chère grand-mère,

À mes chers parents,

À mon neveu Omar, ma soeur Amel et son mari Krime,

À ma soeur Ittissem et mon frère Riad,

À mes oncles et tantes en particulier à Benali et Amine,

À mes cousins et cousines,

À tous mes amis.

Abdou

Je dedie ce mémoire

A mes chers parents,

A ma soeur et mes frères,

A tous mes proches et

A tous mes amis.

Younes

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à Monsieur LAMRAOUI, chargé de cours au département Génie industriel, et à Monsieur MEKARNIA, chargé de cours au département Génie industriel, pour nous avoir proposé le sujet de cette présente étude et pour le soutien et la confiance qu'ils nous ont accordés.

Monsieur BOUZIANE, chargé de cours au département Génie industriel, a accepté de s'intéresser à notre travail et d'être président du jury de ce mémoire, nous l'en remercions sincèrement. Que Mademoiselle ABOUN, directrice du département Génie industriel, soit assurée de notre reconnaissance pour avoir examiné ce travail.

Nous remercions Mademoiselle BENHALA, ingénieur à la Société Nationale des Véhicules Industriels, pour nous avoir honoré de sa présence au jury de ce mémoire.

Nos remerciements sincères aux responsables de l'atelier "Ferrures" du Complexe des Véhicules Industriels pour leur précieuse aide, en particulier à Monsieur TOUMI et Monsieur OUALI.

Enfin, que tous ceux qui ont aidé à réaliser ce modeste travail trouvent ici l'expression de notre gratitude.

SOMMAIRE



. INTRODUCTION

1. ANALYSE DES DIFFERENTES STRUCTURES ORGANISATIONNELLES DES ATELIERS MULTI-PRODUITS

- 1.1 Les différents types d'implantations
- 1.2 Décomposition en îlots de fabrication
- 1.3 Synthèse

2. ANALYSE DU FLUX DE PRODUCTION

- 2.1 Généralités sur l'analyse du flux
- 2.2 Application de l'analyse statique

3. FORMULATION DU PROBLEME

- 3.1 Agencement en ligne
- 3.2 Décomposition en sous-lignes de production

4. EXEMPLE INDUSTRIEL (le cas de l'atelier "ferrures")

- 4.1 Analyse de la situation actuelle
- 4.2 Application

. CONCLUSION

. BIBLIOGRAPHIE

. ANNEXES

. FIGURES

. TABLE DES MATIERES.

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

INTRODUCTION

INTRODUCTION :

Face à une concurrence ardue, les entreprises sont amenées à évoluer dans un contexte versatile leur imposant une production diversifiée, de qualité, dans un délai court tout en réduisant les coûts.

L'évolution d'une entreprise ne se place plus seulement sur des plans technologiques, mais aussi humains, organisationnels et économiques. De nombreuses solutions existent pour rendre l'entreprise apte à réagir à des marchés fluctuants, un de ces moyens est la réorganisation des ateliers de production.

La réorganisation d'ateliers de production passe par la modification des paramètres de production tel que :

- l'effectif de production,
- le niveau de formation des personnes,
- le nombre de postes de charge,
- le poids et le volume des outillages,
- la zone de stockage des produits finis,
- les distances et les coûts de manutentions.....

L'apport de la réorganisation des ateliers est considérable ; en effet en plus de la réduction des délais de production elle s'intéresse aux objectifs suivants :

- améliorer la qualité en éliminant les mauvaises manutentions qui nuisent à la qualité des produits ;
- améliorer les temps de manutention en rapprochant les machines ou encore en automatisant totalement ou partiellement les moyens de manutention.

Afin de réaliser ces objectifs, la réorganisation des ateliers fait appel à un ensemble de projets complémentaires :

- l'analyse du flux qui s'intéresse aux problèmes de flux et de charge ;
- l'analyse liée aux conditions de travail qui répond aux problèmes de l'intégration de l'homme dans la production ;
- l'analyse financière qui juge de la rentabilité des solutions proposées par les projets précédents.

Cependant, seule une approche globale intégrant tous les projets cités ci-dessus permet une réussite de la réorganisation de l'atelier.

De nombreuses entreprises ont réorganisé leurs ateliers en mettant en oeuvre différentes structures organisationnelles des flux physiques de production.

Dans ce mémoire, nous nous intéresserons à ces formes de flux appliquées à des ateliers destinés à une production diversifiée dits ateliers **multi-produits**, et plus particulièrement aux **formes de flux en ligne** qui sont certainement les formes les plus recherchées par les concepteurs d'ateliers.

Notre mémoire comprend quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré à une analyse des différentes structures organisationnelles des ateliers multi-produits, nous étudions les différentes implantations ainsi que le concept de décomposition d'ateliers. Enfin, une synthèse de ce chapitre précise l'intérêt considérable de l'implantation en ligne par rapport aux autres implantations et cerne la position de la décomposition d'ateliers dans un processus de réimplantation d'ateliers, ce qui nous permettra de situer notre contribution.

Dans le deuxième chapitre, nous proposons un enchaînement des différents concepts d'analyse statique du flux pour la résolution de notre modèle. Ainsi, d'une part nous présentons les différentes analyses du flux, entre autres l'analyse statique et l'analyse dynamique du flux ; d'autre part, nous étudions l'apport de l'analyse statique du flux, les différents concepts de celle-ci et leurs enchaînements possibles.

Le troisième chapitre que nous avons appelé " Formulation du problème " présente une approche globale de résolution de notre problème ; nous proposons ainsi une modélisation mathématique et plusieurs algorithmes de résolution traitant à la fois les problèmes de flux et de charges.

Le quatrième chapitre est consacré à l'application de notre approche de résolution sur un cas industriel " atelier ferrures de la C.V.I de Rouiba ".

En conclusion, nous présenterons les différentes perspectives de développement du travail présenté dans ce mémoire.

ANALYSE DES DIFFERENTES STRUCTURES ORGANISATIONNELLES DES ATELIERS MULTI-PRODUITS

Résumé

Dans ce chapitre, nous présenterons les différents types d'implantations, leurs définitions et leurs caractéristiques, ainsi que la notion de décomposition des ateliers de production. Nous montrerons les avantages de la forme de flux en ligne objet de notre étude.

1- Les différents types d'implantations:

L'analyse du flux de production montre deux grands types de flux [5], [10] :

- l'implantation en sections homogènes ou technologiques rassemblant dans un même lieu géographique les machines pouvant réaliser le même type d'opérations ;
- l'implantation en ligne souvent imagée par le travail à la chaîne de **H.Ford** .

Ces deux types d'organisations peuvent être combinés, par exemple un usinage de pièces en sections homogènes et un montage final en ligne. Ce type d'implantation est appelé implantation hybride[5].

1.1 L'implantation en sections homogènes :

1.1.1 Définition :

L'implantation en sections homogènes (sections opérations) consiste à regrouper les ressources disponibles par technologie[5]. Dans un atelier mécanique par exemple, les tours sont placés dans la section tournage, les fraiseuses dans la section fraissage...

Pour fabriquer un produit, il faut donc que celui ci traverse plusieurs sections. La figure ci-dessous présente une organisation en sections homogènes d'un atelier mécanique :

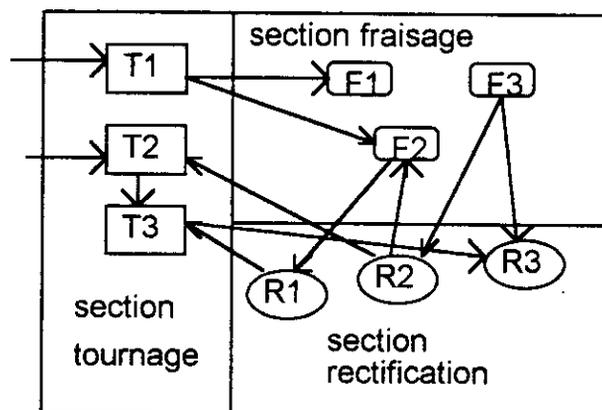


figure1: organisation par technologie.

1.1.2 Caractéristiques :

Dans ce système de production, les flux sont discontinus. Cette organisation s'impose lorsque l'entreprise doit gérer un large éventail de produits différents et fabriqués en quantités limitées ; l'investissement dans un équipement de production spécifique à chacun d'entre eux ne s'avérant pas rentable[5].

Cette implantation permet un maximum de flexibilité, en effet, les machines ainsi disposées peuvent fabriquer une vaste gamme de produits et s'adapter facilement aux produits futurs de l'entreprise[5]. En contre partie, le choix de cette implantation est pénalisé par :

- la complexité de l'ordonnement ;
- les cycles de production sont longs ;
- les en-cours sont importants.

a- L'ordonnement :

L'organisation en sections homogènes n'engendre aucune relation stricte entre produits et machines ; ceci rend l'ordonnement complexe[5].

b- Le cycle de production :

Le cycle de production d'un produit se compose :

- d'une part, des temps de transformation et de contrôle ;
- d'autre part, des temps d'attentes et de transport.

Les temps de transformation et de contrôle sont relativement fixes. Ce qui n'est pas le cas pour les temps de transport et d'attentes qui dépendent dans une large mesure de l'organisation de l'atelier[10].

Dans un atelier organisé en sections homogènes, les postes voisins dans le processus de fabrication du produit sont éloignés, ceci augmente les temps de transport et donc les coûts de manutention. Afin de réduire le coût total de manutention, l'augmentation de la taille des lots de transfert est nécessaire(les manutentions inter-postes sont difficilement automatisables).Ce qui était une ébauche de solutions devient un handicap ; en effet, l'importance de la taille des lots engendre des temps d'attentes très élevés ; chaque pièce fabriquée attend l'achèvement de l'ensemble du lot auquel elle appartient avant d'aller sur la machine suivante. Ces temps d'attentes importants causent ainsi une augmentation des en-cours et donc l'allongement des délais de production[4], [5].

c- Les en-cours :

Les principaux inconvénients des en-cours sont les suivant :

- les pièces en attente constituent un capital immobilisé, dont l'entreprise en perd l'intérêt[4] ;
- les pièces en attente ont déjà subis des opérations, des contrôles et des transports pour lesquels des salaires ont été payés. L'entreprise perd l'intérêt de ces salaires[4] ;
- augmentation du coût de stockage[10].

En définitive, les en-cours de fabrication contribuent à l'augmentation du besoin en fonds de roulement. Un projet de réorganisation doit permettre par une accélération des temps de cycle une diminution du besoin en fonds de roulement ; c'est pourquoi, la justification d'un projet de réorganisation d'un atelier se limite souvent aux gains escomptés par la diminution des en-cours[10].

1.2 L'implantation en ligne :

1.2.1 Définition :

L'implantation en ligne consiste à regrouper les machines d'après l'enchaînement des opérations du processus de fabrication d'un ou plusieurs produits[5]. Elle est dite aussi organisation en sections produits. La figure suivante présente un atelier organisé en ligne :



figure2 : organisation en ligne

Cette implantation ne signifie pas que le circuit de production est rectiligne depuis le début de la fabrication jusqu'à la fin. En effet, ce circuit peut présenter des sinuosités en U ou en S ou être plus complexe[4].

1.2.2 Caractéristiques :

La production en ligne est souvent comparée avec la production à la chaîne de **H.Ford**, cette dernière est caractérisée par des flux de production quasi-continus, la régulation de circulation entre les postes repose sur l'égalité des cadences de chaque opération. Elle est dite aussi production de masse (fabrication de grande série). Pour la ligne spécialisée dans les fabrications de petites et moyennes séries, il existe une certaine souplesse créée volontairement par des petits stocks d'équilibre entre les postes successifs. Ainsi les débits sont équilibrés en moyenne, pas nécessairement à chaque instant alors qu'ils doivent l'être absolument sur une chaîne[5].

L'organisation en ligne présente les avantages suivants :

- les distances parcourues par les pièces sont courtes, ce qui permet l'utilisation de lots de transfert (transport) de petite taille, d'où un niveau d'en-cours faible et un délai de production court[10] ;
- une automatisation des moyens de manutention est possible[4], [5].

L'inconvénient principal que présente cette organisation est sa rigidité pour la fabrication de nouveaux produits dont l'ordre des opérations contenues dans les gammes de fabrication n'est pas conforme à l'enchaînement des opérations dans la ligne[5].

Dans une organisation en ligne, on peut observer et distinguer quatre types de mouvements des produits[23] :

- l'opération répétée (**R**),
- le passage en succession (**P.S**),
- le saut en avant (**S.A**),
- le retour en arrière (**R.A**).

La figure ci-dessous représente ces différents mouvements :

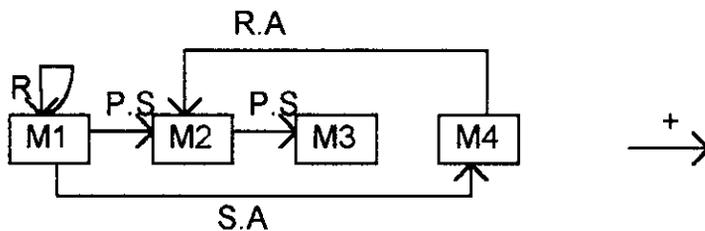
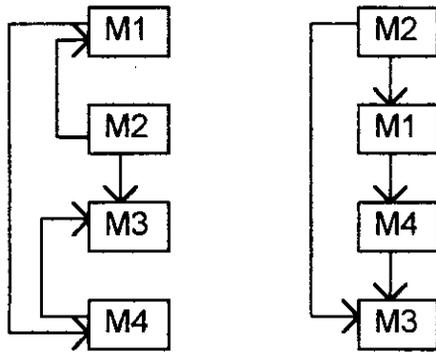


figure3 : les différents mouvements dans une ligne.

Pour les quatre types de mouvements, celui en succession est le meilleur car il est unidirectionnel et les distances parcourues par les produits sont courtes ; le retour en arrière est le mouvement le moins désirable puisqu'il viole la direction unique de l'écoulement du flux et le complique considérablement. L'opération répétée est généralement ignorée dans l'analyse du flux car elle se passe à l'intérieur du poste ; le saut en avant ne viole pas la direction mais il complique le flux et éventuellement la manutention.

Dans une étude d'implantation en ligne, l'amélioration des distances de manutention quantitativement en mètres en rapprochant les postes n'est pas le seul critère de performance. Ce qu'il faut rechercher aussi, c'est la clarté visuelle du flux en minimisant les anti-flux (les retours en premier et les sauts)(voir figure4). Ceci pour un suivi de production efficace[10].



avant réorganisation après réorganisation

figure4 : réorganisation de la ligne.

Des études d'implantations montrent qu'il est parfois intéressant d'éloigner les machines à forte relation quantitative afin de ne pas provoquer de retours en arrière pour d'autres produits. En effet, les retours en arrière pénalisent le sens d'écoulement unique du flux, et rend ainsi la maîtrise visuelle de l'en-cours difficile[4], [10], [23].

Ceci est illustré dans l'exemple suivant :

Soit un atelier disposant de quatre machines notées de **M1** à **M4**, cet atelier fabrique deux types de produits (voir figure5) :

| Produit | Quantité à fabriquer | Processus de fabrication |
|---------|----------------------|--------------------------|
| P1 | 100 | M1 M3 M2 M4 |
| P2 | 500 | M1 M2 |

figure5 : les données relatives à l'exemple.

La forte relation quantitative reliant M1 à M2 (**500**) justifie dans un premier temps la ligne suivante :

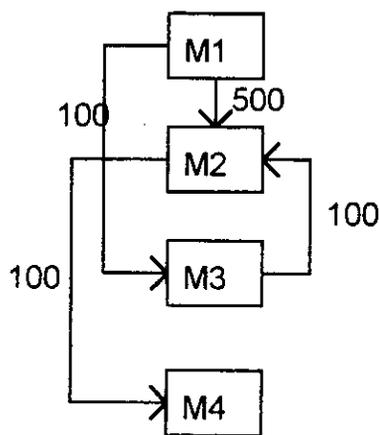


figure6 : la première ligne obtenue.

Supposant que pour le produit P1, il y a un seul lot de production donc de taille 100 unités ; ce lot est divisé en quatre lots de transferts contenant chacun 25 unités .

La figure suivante illustre le fonctionnement de l'atelier et la situation de l'en-cours pour le produit P1 à différentes périodes :

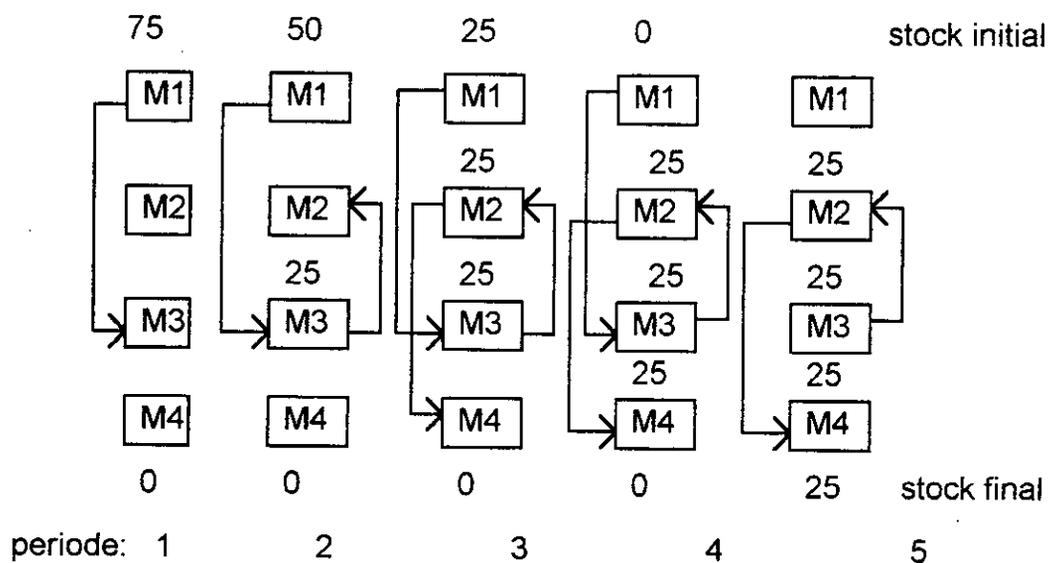


figure7 : l'écoulement du flux et situation de l'en-cours pour la première ligne.

Pour la première période, la situation de l'en-cours est facilement maîtrisable, le saut en avant ne perturbe en rien cette situation. Au-delà de la période 1, la maîtrise de l'en-cours est loin d'être évidente, ceci malgré l'émission de deux hypothèses simplificatrices :

- le temps alloué à la production d'une unité "P1" est le même pour toutes les machines ;
- la présence d'un seul produit "P1" dans la ligne de production.

L'élimination du retour en arrière en éloignant la machine M2 de la machine M1 (voir figure8) permet une maîtrise visuelle meilleure des en-cours.

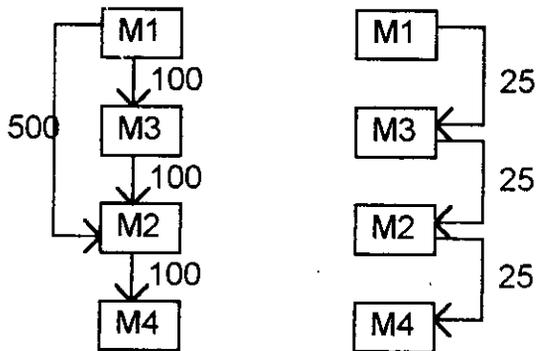


figure8 : l'écoulement du flux et situation de l'en-cours pour la deuxième ligne.

La maîtrise visuelle de l'en-cours de production donne l'occasion au responsable de production de mieux maîtriser la file devant chaque poste de production. Pour le cas de mise en ligne, cette situation ne peut être atteinte que par la minimisation des retours en arrière. C'est pourquoi, lors de la mise en ligne d'un atelier, on se limite souvent à la minimisation des retours en arrière[4], [10], [23].

2- Décomposition en îlots de fabrication :

La décomposition d'un atelier consiste à le diviser en plusieurs sous-ateliers spécialisés chacun dans l'exécution d'un ensemble de tâches prédéterminées. La formation d'îlots de fabrication est une application de la décomposition des ateliers ; elle repose sur la recherche d'une partition de l'ensemble des **produits** en sous ensembles appelés "**familles de produits**" et une partition de l'ensemble des **tâches** à accomplir sur les produits en "**sous systèmes de production**". La condition fondamentale sur cette double structure de partitions cherchées, étant que le nombre de familles de produits et le nombre de sous systèmes de production soient égaux et qu'il y ait une correspondance biunivoque entre chaque famille de produits et chaque sous système de production[18]. Ce partitionnement se fait suivant une logique de technologie de groupe en recherchant les **analogies** entre les gammes de fabrication.

Le critère retenu lors de la formation d'îlots est la minimisation du nombre de tâches à effectuer dans un sous système différent de celui correspondant à la famille de produits directement associés à ces tâches[10], [11], [18]. En terme de flux, ceci revient à minimiser les flux inter-îlots (les mouvements des produits s'effectuant entre les îlots).

Ce partitionnement permet de :

- réduire la taille des problèmes de planification des tâches (faciliter l'ordonnancement) ;
- faciliter la gestion de l'atelier.

Ceci en affectant à chaque îlot un centre d'activités et de décisions capable d'intégrer certains nombres de fonctions de conduites (lancement-ordonnancement) et d'assurer certaines responsabilités, avec une gestion harmonieuse des échanges inter-îlots[10], [14], [18].

3- Synthèse :

A la lumière des différents concepts de l'organisation des ateliers de production ; nous pouvons cerner la position de la formation d'îlots par rapport aux différents types d'implantation dans un processus de réorganisation d'ateliers. En effet la formation d'îlots consiste en une approche fonctionnelle de la réorganisation de l'atelier et non en une approche opérationnelle d'agencement des moyens de production. Ceci dit une fois les îlots de fabrication formés, une implantation de l'îlot en sections homogènes, en ligne ou quelconque sera nécessaire. Ainsi, la problématique consiste à rechercher l'implantation idéale que ça soit pour un îlot ou un atelier d'une manière générale.

Nous pouvons obtenir différentes formes de flux lors de la conception d'un atelier de production. Il est par contre difficile de dire quelle est la forme la plus appropriée pour un cas d'étude[3], [10]. Cependant, on peut remarquer une plus grande clarté visuelle du flux en ce qui concerne l'implantation en ligne, c'est certainement la forme qui permet par sa simplicité de maîtriser plus facilement le délai de production. C'est pourquoi de nombreuses entreprises recherchent ces formes de flux ; les formes de flux en sections homogènes sont parfois la seule solution restant au concepteur par manque de similitude de produits ou de processus. Bien que ces formes souffrent d'une mauvaise réputation, elles sont parfois indispensables[4], [10], [23].

Ainsi, l'objectif de notre étude se résume dans la recherche d'une approche rigoureuse nous permettant d'avoir une réponse technique à la possibilité de réorganiser un atelier multi-produits en ligne de production. L'analyse du flux est tout indiquée pour ce type de problème. Cependant, il est à préciser que cette étude ne sera qu'une contribution à la réorganisation d'un atelier ; une analyse financière et une autre liée aux conditions de travail seront nécessaires afin de juger de la pertinence de la solution proposée.

ANALYSE

DU FLUX DE PRODUCTION

Résumé :

Dans ce chapitre, nous rappellerons les différentes analyses de flux ; nous insisterons sur l'analyse statique du flux, nous étudierons les concepts de l'analyse statique, leurs enchaînements et enfin l'approche de résolution retenue.

1- Généralités sur l'analyse du flux : [10], [14]

Dans une étude de réorganisation d'ateliers, l'analyse du flux joue un rôle capital. Ce rôle consiste à rechercher les différentes formes de flux de production en ayant pour objectif la recherche de la clarté visuelle du flux et la minimisation des délais de fabrication.

L'analyse du flux se fait en deux étapes :

- la première étape est l'analyse statique du flux, elle globalise la charge de production sur un horizon donné et représente ainsi les flux statiquement sans prendre en considération leurs évolutions temporels ;
- la deuxième étape est l'analyse dynamique du flux, elle prend en compte l'aspect temporel du fonctionnement productif de l'atelier, elle évalue ainsi les en-cours de production, les délais de fabrication, les taux d'occupations des machines et juge de l'efficacité des règles de pilotage.

1.1 Analyse statique du flux :

L'analyse statique des flux de production est définie par "Les méthodologies de recherche d'une organisation fonctionnelle ou spatiale des moyens de productions". Ces méthodes permettent d'envisager des partitions de produits-machines où de rechercher un agencement des moyens de productions, à l'aide d'algorithmes, d'heuristiques ou de modèles mathématiques. Cependant, il est à noter que ces méthodes ne constituent qu'une aide à la réorganisation car les paramètres d'implantation d'un atelier sont trop nombreux et complexes pour être traités entièrement.

1.2 L'analyse dynamique du flux :

Dans un projet de réorganisation d'un atelier de production on est tenu de prendre en compte les différents paramètres d'implantation tels que :

- les indicateurs de performance (délais de fabrication, en-cours, temps de file d'attente, taux d'occupation des machines...) et les interactions dynamiques entre eux ;
- les phénomènes aléatoires ;
- les règles de pilotage.

L'analyse statique ne nous renseigne pas sur ces différents paramètres vu leurs comportements dynamiques. Cependant, l'analyse dynamique des flux simule le comportement global de l'atelier de production en mettant en avant les principaux indicateurs de performance. La simulation utilise le modèle de représentation de l'atelier et consiste à le transcrire dans un langage de programmation où la variable "**temps**" permet de voir évoluer le système. Les résultats de cette simulation sont d'autant plus pertinents que le modèle est proche de la réalité.

1.3 Conclusion :

Dans la mesure où l'analyse statique du flux propose une ou plusieurs solutions d'organisation de flux, l'analyse dynamique simule le système et permet ainsi d'affiner ces solutions et de les comparer entre elles.

L'objectif de notre étude étant de rechercher une approche de résolution pour la mise en ligne des ateliers multi-produits. De ce fait, l'analyse retenue est bien l'analyse statique puisqu'elle répond parfaitement à l'objectif de notre étude. Cependant une analyse dynamique sera nécessaire afin de juger de la pertinence des résultats obtenus pour un cas d'étude.

2- Application de l'analyse statique :

Il est à rappeler que notre cas d'étude consiste à rechercher une approche générale de résolution pour la mise en ligne des ateliers multi-produits. Nous définirons ainsi l'apport de l'analyse statique en ce sens, nous étudierons les concepts de l'analyse statique adéquats, leurs enchaînements et enfin l'approche de résolution retenue.

2.1 L'apport de l'analyse statique :

L'application d'une approche intuitive pour la mise en ligne des ateliers de production multi-produits débouchera sûrement sur de mauvaises solutions, car les retours en arrière seront nombreux ; ceci est dû au fait que ces ateliers gèrent un nombre important de produits dont les processus de fabrication sont totalement différents. Mais avec l'apport des différentes techniques d'analyse statique relatives à ce type de problème, on pourra envisager une mise en ligne totale ou partielle d'un atelier, en recherchant des similarités de processus de fabrication et en regardant la possibilité de décomposer l'atelier en plusieurs sous systèmes de production (îlots de fabrication).

En plus des avantages que présente une organisation fonctionnelle des ateliers en îlots de fabrication, cette approche a un double intérêt :

- la mise en ligne de tous les îlots de fabrication ou seulement de quelques uns ;
- remédier au problème de rigidité que présente la ligne unique de production, ceci lors de la définition de nouveaux produits dont les séquences d'opérations sont différentes à celle de la ligne (la standardisation de leurs processus est souvent difficile parfois impossible). L'existence de plusieurs lignes donc de plusieurs processus de fabrication donne de multiple choix aux concepteurs des nouveaux produits, le but sera alors d'établir un enchaînement des opérations d'une gamme nouvelle similaire à celui d'un des processus existants.

2.2 Les concepts de l'analyse statique :

Les concepts de l'analyse statique relatifs à ce cas d'étude se présentent en deux approches complémentaires :

- la première consiste en un partitionnement des produits et des machines ;
- la deuxième approche consiste en un agencement spatial en ligne des moyens de production.

2.2.1 Le partitionnement des produits et des machines :

Le partitionnement se fait en recherchant des similitudes de processus ou de produits[10] :

1- Le partitionnement basé sur la recherche des similitudes de produits regroupe dans une même partition des produits, destinés à un client privilégié, justifiant un chiffre d'affaires important ou monopolisant une charge suffisante sur un horizon donné. Les groupes de machines seront formés selon les familles de produits obtenues. Ce partitionnement est souvent utilisé dans les ateliers destinés à la sous-traitance.

2- Le partitionnement basé sur la recherche des similitudes de processus regroupe dans une même famille les produits dont les processus sont similaires. Ceci suivant trois critères différents :

- le critère d'opération ;
- le critère de charge ;
- le critère d'échange.

a)- Le critère d'opération :

Le critère d'opération regroupe dans une même famille les produits sollicitant un nombre maximum de machines identiques, ces dernières forment à leurs tours un groupe de machines.

Ce partitionnement se fait en minimisant le nombre de fois où les produits sollicitent d'autres îlots de fabrication, ceci est illustré dans l'exemple suivant :

| | M1 | M2 | M3 | M4 |
|----|----|----|----|----|
| P1 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| P2 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| P3 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| P4 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| P5 | 0 | 1 | 0 | 1 |

figure9 : matrice binaire de représentation des produits-machines

"1" indique que le produit i sollicite la machine j (P1 sollicite M1 par exemple) ;

Le partitionnement se fait comme suit :

| | M1 | M3 | M2 | M4 |
|----|----|----|----|----|
| P1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| P3 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| P4 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| P2 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| P5 | 0 | 0 | 1 | 1 |

figure 10 : partition par similitudes d'opérations.

b)- Le critère de charge :

Ce critère est analogue à celui d'opérations ; les partitions sont obtenues à partir de la même matrice "produits-machines", mais en remplaçant les "1" par le nombre de lots de production annuels pour chaque produit ou par les charges des produits sur les machines concernées . Ce partitionnement se fait en minimisant les charges ou le nombre de lots à l'extérieur des îlot formés.

| | M1 | M2 | M3 | M4 |
|----|----|----|----|----|
| P1 | 10 | 0 | 50 | 0 |
| P2 | 0 | 20 | 0 | 0 |
| P3 | 5 | 0 | 0 | 0 |
| P4 | 12 | 0 | 9 | 0 |
| P5 | 0 | 20 | 0 | 10 |

figure 11 : matrice de représentation des produits-machines

| | M1 | M3 | M2 | M4 |
|----|----|----|----|----|
| P1 | 10 | 50 | 0 | 0 |
| P3 | 5 | 0 | 0 | 0 |
| P4 | 12 | 9 | 0 | 0 |
| P2 | 0 | 0 | 20 | 0 |
| P5 | 0 | 0 | 20 | 10 |

figure 12 : partition par similitude de charge.

c)- Le critère d'échange :

Le critère d'échange recherche des partitions de machines, ce partitionnement est obtenu à partir d'une matrice "machines-machines". L'échange entre deux machines différentes peut être représenté d'une manière binaire, par le volume de pièces qui passe par ces deux machines ou par des lots de production.

| | M1 | M2 | M3 | M4 | M5 |
|----|----|----|----|----|----|
| M1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| M2 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| M3 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| M4 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| M5 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |

figure 13 : matrice binaire de représentation machines-machines.

("1" indique l'existence d'un lien entre deux machines).

le partitionnement se fait en minimisant les "1" en dehors des partitions :

| | M1 | M4 | M2 | M3 | M5 |
|----|----|----|----|----|----|
| M1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| M4 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| M2 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| M3 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| M5 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |

figure 14 : partition par similitude d'échange .

Les produits seront ultérieurement affectés aux groupes de machines adéquats, ainsi on affectera un produit au groupe de machines où il effectuera le maximum d'opérations d'usinage.

Remarque :

La différence des données utilisées par ces trois critères peut engendrer des partitions totalement différentes. La décision portant sur le choix d'un de ces critères sera prise en tenant compte de l'objectif à atteindre par ce partitionnement.

2.2.2 L'agencement spatial en ligne des moyens de production :

Cette approche a pour but de rechercher un agencement spatial des machines sans effectuer de partitionnement, la recherche de la ligne place les postes l'un après l'autre en minimisant les retours en arrière en premier lieu et les sauts en deuxième.

2.3 L'enchaînement des concepts de l'analyse statique :

L'existence de deux concepts différents mais complémentaires de l'analyse statique pour le processus de mise en ligne de l'atelier, nous renseigne sur deux approches de résolution distinctes :

1- Décomposition-Agencement :

Dans cette approche, on décompose l'atelier dans un premier temps en îlots de fabrication puis on voit la possibilité de mise en ligne de chaque îlot pris séparément (voir figure 15).

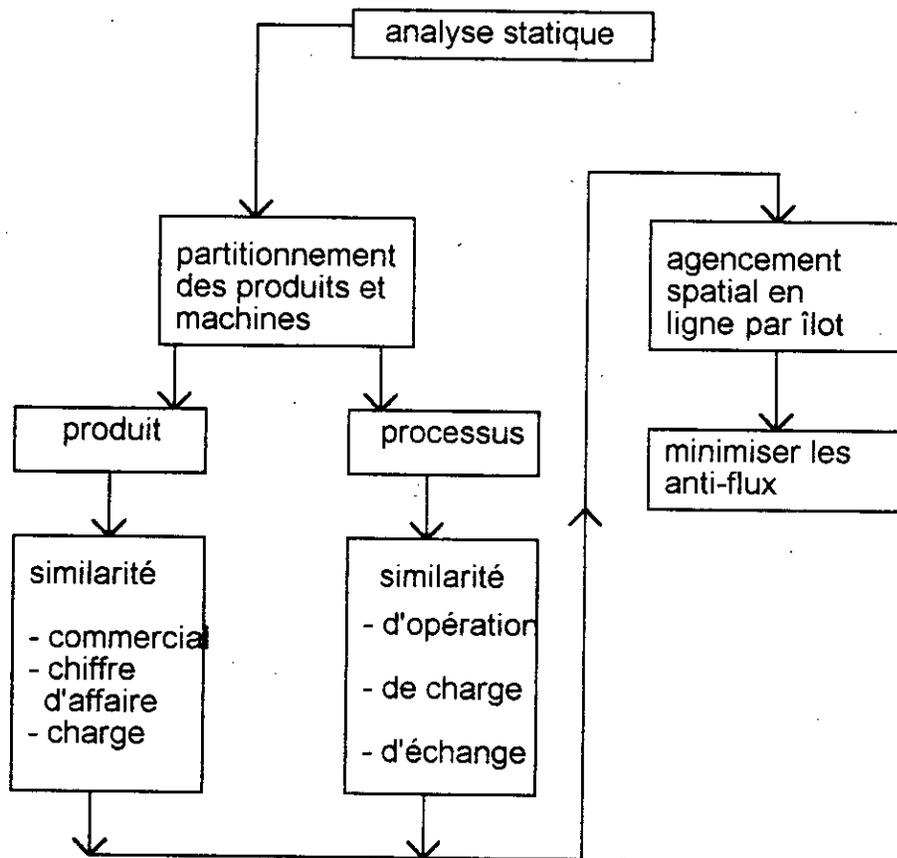


figure 15 : l'enchaînement décomposition - agencement

2- Agencement-Décomposition :

Dans un premier temps , on procède à une mise en ligne de tout l'atelier puis on décompose la ligne globale en sous-lignes de production tout en minimisant les inter-flux entre groupe de machines.

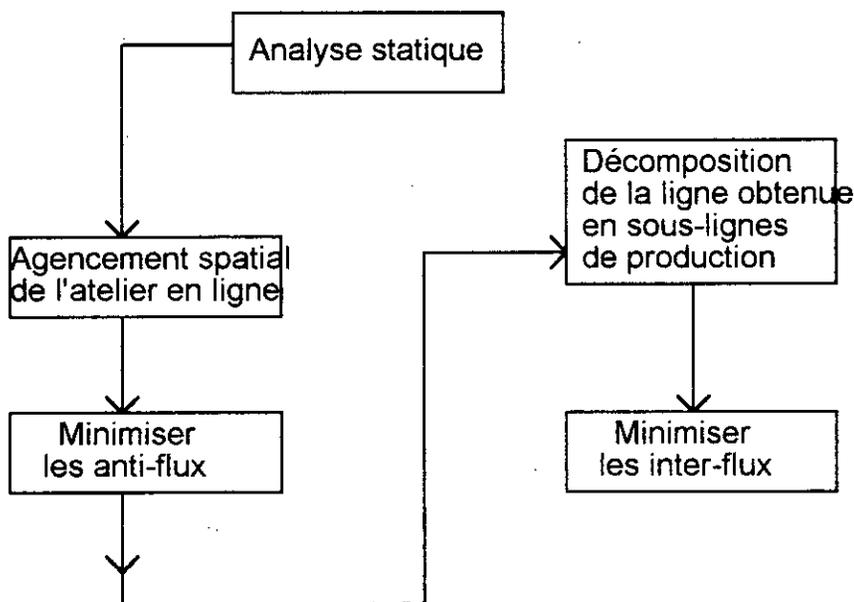


figure 16 : l'enchaînement agencement - décomposition

2.4 L'approche retenue :

Notre choix s'est porté sur la deuxième approche, ce choix a été motivé par les raisons suivantes :

- la démarche de résolution basée sur la deuxième approche est plus rapide que celle basée sur la première. En effet, pour la première approche, après la formation d'îlots de fabrication, ces derniers seront pris un par un pour regarder la possibilité de les implanter en ligne. Cette démarche est d'autant plus longue que le nombre d'îlots est grand. Par contre pour la deuxième approche, la disposition des machines en ligne pour chaque groupe de machines ne sera pas nécessaire puisqu'elle est déjà faite ;

- la deuxième approche nous renseigne sur la possibilité d'implanter l'atelier en une seule ligne et sur les décisions à prendre pour l'obtention de la ligne idéale (achat de nouvelles machines par exemple).

FORMULATION DU PROBLEME

Résumé :

Dans ce chapitre nous présenterons tout d'abord l'état de l'art des différentes méthodes d'agencement en ligne des moyens de production. Puis nous nous consacrerons à la formulation du problème, ainsi nous proposerons une modélisation mathématique et plusieurs algorithmes.

1- Agencement en ligne :

1.1 L'état de l'art :

Le passage en revue des différentes lectures, nous a été d'un grand apport. En effet à travers ces lectures nous avons eu connaissance en plus des différentes approches de mise en ligne des ateliers de production, des méthodes visant à résoudre des problèmes particuliers notamment pour le problème de la formation des îlots virtuels et celui de mise en réseau du flux de production.

La formation d'îlots virtuels consiste à déterminer une arborescence descendante où chaque branche de cette arborescence représente un îlot de production. Ainsi un îlot virtuel ne rassemble pas spatialement les ressources de production, c'est la gestion de production qui réalise le lien entre les ressources d'un même îlot [17].

La mise en réseau du flux consiste à effectuer les branchements entre les machines, à la différence des îlots virtuels où le degré intérieur de chaque machine est égal à un, dans un réseau les machines peuvent avoir plusieurs prédécesseurs immédiats, ceci dans le but de réduire les distances de manutentions [23].

L'objet de cette partie est de fournir un état de l'art des différentes approches de mise en lignes des ateliers de production. Plusieurs méthodes existent pour la résolution de ce type de problème, nous présentons ci-dessous quelques unes de ces méthodes.

1.1.1 La méthode matricielle : [13], [4]

L'objectif de cette méthode est de concevoir une ligne de production en minimisant les retours en arrière ; elle consiste dans un premier temps à construire une matrice binaire P (dite matrice de précedence) définie par la relation de permissibilité ou d'exigibilité qui existent entre les machines :

$$P_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{si } i \text{ permet } j \text{ ou } j \text{ exige } i \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Une fois la matrice P obtenue, on construit la ligne en déterminant la colonne qui ne présente aucun élément égal à 1, ceci signifiera que la machine correspondante n'exige aucune autre machine d'où sa position en début de ligne. La deuxième machine est sélectionnée en appliquant la même technique à la nouvelle matrice P, obtenue par l'élimination de la machine sélectionnée précédemment, en effaçant la ligne et la colonne correspondantes dans la matrice P. Ainsi, la ligne de production sera construite en respectant la même démarche précédente jusqu'à l'insertion de toutes les machines.

La méthode matricielle se voit intéressante lorsque l'application se fait sur des ateliers qui ne gèrent pas un grand nombre de produits. En effet, la matrice P est facile à traiter et la ligne obtenue sera intéressante à considérer. Toutefois, lorsque l'application se fait sur des ateliers multi-produits, la matrice P aura une forte densité de 1, le processus adopté risque d'être interrompu car il sera difficile de trouver des colonnes qui ne présentent aucun élément égal à 1. Pour débloquer ce processus, il est nécessaire d'éliminer plusieurs de ces colonnes ; et finalement engendrer une ligne quelconque.

1.1.2 Méthode basée sur les similarités des séquences :[23]

Cette méthode construit la ligne en se basant sur l'étude des similarités des processus de fabrication des différents produits ; elle comporte deux étapes principales :

- la première consiste à sélectionner le premier produit, la séquence d'opérations de ce produit est utilisée pour construire la ligne initiale ;

- la deuxième est la construction de la nouvelle ligne en modifiant la structure de la ligne précédente par l'inclusion de la séquence du nouveau produit sélectionné. Ce dernier est déterminé à partir d'une étude des similarités de l'ordre des opérations des séquences des différents produits et de celui de la ligne précédente. Ainsi, le produit qui possède la plus grande similitude est sélectionné, cette démarche est répétée jusqu'à ce que tous les produits soient sélectionnés. Cependant pour l'inclusion de la séquence du produit sélectionné, il faudra vérifier la contrainte de disponibilité des machines. En effet, lors de l'inclusion de nouvelles séquences il est parfois nécessaire d'ajouter une nouvelle machine qui existe déjà dans la ligne précédente.

Enfin, il est à remarquer l'importance de la ligne initiale ; cette dernière conditionne le processus de détermination de la ligne recherchée, ainsi pour différentes lignes initiales nous pouvons obtenir des lignes totalement différentes.

1.1.3 Détermination de la séquence globale minimale "S.G.M" :[21]

Comme pour les deux autres méthodes, l'algorithme proposé est constitué de deux étapes principales :

- la première est le traitement des données en éliminant toutes les séquences contenues dans des séquences plus grandes, afin de minimiser le nombre de séquences à traiter ;
- la deuxième est la détermination de la S.G.M proprement dite ; pour cela, on détermine pour chaque machine i , le nombre de séquences dans lesquelles i est la dernière machine sollicitée NF_i , et le nombre d'occurrences de i dans l'ensemble des séquences NT_i . A chaque itération, on place juste avant le dernier placement effectué la machine ayant la plus grande valeur de NF/NT . On supprime ensuite la machine retenue de toutes les fins de séquences, puis on passe à l'itération suivante, on s'arrête lorsque toutes les séquences sont vides.

Cette heuristique est basée sur le fait que les machines peuvent être dupliquées sans limites, chose qui n'est pas vraie dans une démarche de réorganisation d'ateliers où on est conditionné par le nombre d'équipements existants.

1.1.4 Conclusion :

Enfin, nous pouvons nous rendre compte du caractère approximatif de ces méthodes et de l'absence d'une approche générale intégrant à la fois la notion de flux (pas de traitement pour les sauts en avant) et de charge. Cependant, de nombreuses questions restent ouvertes, l'une des plus importantes consiste à savoir s'il est possible d'approcher ce problème par une modélisation mathématique. C'est pourquoi nous nous proposons dans la suite de ce travail l'adoption d'un modèle de programmation mathématique.

1.2 Méthodes proposées :

L'approche de résolution que nous proposons, pour l'agencement des moyens de production en ligne se décompose en deux phases :

- la première est la détermination de la ligne fonctionnelle, basée sur un regroupement des moyens de production en pools ; ceci en recherchant des similarités techniques entre ces moyens. Nous désignons par "similarité technique" des machines, leurs possibilités d'effectuer le même type d'opérations d'usinage ;
- la deuxième phase est la détermination de la ligne opérationnelle, en tenant compte de la distribution des machines dans la ligne et des gammes variantes pour une éventuelle amélioration de la configuration du flux total de production.

Cette décomposition en deux phases s'impose du fait que pour un type d'opération d'usinage donné, les produits ne sont pas affectés à une machine déterminée à priori mais à l'ensemble des machines constituant le pool adéquat. En effet, si on agence les moyens de production sans effectuer de regroupements préalables, on sera contraint d'affecter un produit pour une opération d'usinage donnée à une machine quelconque parmi d'autres sans savoir quelle est la machine qui présente la meilleure affectation. Ainsi, on risque d'engendrer une mauvaise qualité de la ligne en la conditionnant par ces contraintes d'affectations.

1.2.1 La conception de la ligne fonctionnelle :

Pour l'obtention de la ligne fonctionnelle, nous proposons une approche exacte de résolution ; cette approche se présente sous forme d'une modélisation mathématique qui répond en général au problème de " mise en ligne fonctionnelle des ateliers de production ". Le but recherché par cette formulation est de trouver la ligne optimale ; nous entendons par ligne optimale, la ligne qui présente le moins de retours en arrière et de sauts en avant.

1.2.1.1 Formulation de base :

Dans cette première formulation, notre objectif est de rechercher la ligne fonctionnelle reliant tous les pools de façon à maximiser le flux principal (la somme des échanges entre chaque paire de pools consécutifs dans la ligne). Ainsi notre premier modèle se présente comme suit :

$$\text{MAX } F = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N A_{i,j} X_{i,j}$$

sous les contraintes suivantes :

$$\sum_{i=0}^N X_{i,j} = 1 \quad \forall j \in H \quad \text{tq : } j \neq 0 \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^{N+1} X_{i,j} = 1 \quad \forall i \in H \quad \text{tq : } i \neq N+1 \quad (2)$$

$$X_{i,j} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in H \quad (3)$$

$H = \{0, 1, 2, \dots, N, N+1\}$ désigne l'ensemble des pools à implanter, avec 0 et N+1 des noeuds fictifs représentant le début et la fin de la ligne.

$A_{i,j}$: L'échange total du pool i vers le pool j ; cet échange peut être représenté d'une manière binaire (relation de permissibilité), par un volume de pièces circulant de i vers j ou par le nombre de lots de production.

$X_{i,j}$: indique si le pool i est immédiatement avant le pool j dans la ligne optimale obtenue.

- (1) et (2) : c'est des contraintes de degrés ; elles ont été formulées en deux types de contraintes pour la simple raison que ce problème n'est pas symétrique ($A_{i,j} \neq A_{j,i}$) et que le sens est respecté ;
 (3) : contraintes d'intégrité.

Après avoir testé ce modèle sur quelques exemples, nous avons remarqué qu'il ne répondait pas à notre objectif, en effet cette formulation ne nous assure pas que la solution obtenue sera formée d'une seule ligne intégrant tout les moyens de productions. L'exemple suivant illustre cette situation :

Soit 5 pools, les échanges entre ces pools sont représentés dans la matrice suivante :

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 5 | 0 |
| 2 | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7 |
| 5 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 |

figure 17 : matrice d'échange

Après résolution de cet exemple sur le logiciel **STORM**, nous avons obtenus les résultats suivants :

$X_{1,4}=1$, $X_{4,5}=1$, $X_{5,1}=1$, $X_{2,3}=1$, $X_{3,2}=1$, les autres variables sont nulles ; la solution est schématisée ainsi :

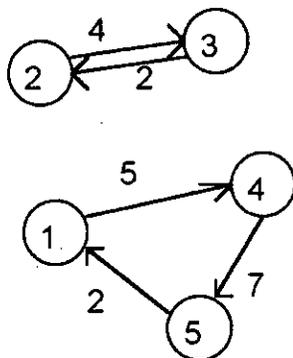


figure 18 : solution obtenue après exécution de la première formulation

Effectivement la solution obtenue n'est pas formée d'une seule ligne, malgré qu'elle vérifie le critère d'optimalité et les contraintes de degrés.

Nous avons ainsi établi le lien existant entre notre problème et le problème classique connu sous le nom de **T.S.P (Travelling salesman problem - problème de voyageur de commerce)**. Le T.S.P consiste à rechercher un chemin de longueur minimal reliant toutes les villes ; dans ce problème on veille à ce que la solution obtenue ne soit pas formée de plusieurs sous-tours mais d'une seule tournée passant par toutes les villes. Pour remédier à ce problème, les formulations du T.S.P proposent des contraintes d'élimination de sous-tours[6], [15]. Pour notre cas, nous avons eu recours à ces contraintes qui se présentent comme suit :

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} X_{i,j} \leq |S| - 1 \quad \forall S \subset H, S \neq \emptyset \quad (4)$$

1.2.1.2 Première transformation :

Le critère retenu dans la formulation de base est la maximisation du flux principal dans la ligne ; comme la somme des échanges entre les pools est une somme finie, ce critère est équivalent à minimiser les retours en arrière et les sauts. Donc, dans cette formulation on traite d'une manière identique un retour en arrière et un saut en avant, ce qui pose un problème sérieux puisque comme nous l'avons mentionné précédemment les retours sont moins désirables que les sauts, et la ligne recherchée doit contenir a priori le moins de retours en arrière. La présente transformation répond à ce problème, ceci en définissant une nouvelle variable notée :

$Z_{i,j}$ qui nous indiquera l'existence de sauts du pool i vers le pool j dans la ligne optimale. Ainsi les nouvelles variables du modèle sont :

$X_{i,j}$: indique si le pool i est immédiatement avant le pool j dans la ligne optimale, ceci sera significatif de l'existence de $A_{i,j}$ passages successifs de i vers j .

$Z_{i,j}$: indique si le pool i est avant le pool j mais pas immédiatement dans la ligne optimale, ceci sera significatif de l'existence de $A_{i,j}$ sauts en avant de i vers j .

$1 - X_{i,j} - Z_{i,j}$: indique si le pool i est après le pool j dans la ligne optimale, ceci sera significatif de l'existence de $A_{i,j}$ retours en arrière de i vers j .

Le nouveau critère est donc la maximisation du flux principal tout en minimisant les sauts et les retours en arrière avec des poids différents ; nous obtenons ainsi le modèle suivant :

$$\text{MAX } F = \alpha \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N A_{i,j} X_{i,j} - \beta \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N A_{i,j} Z_{i,j} - \delta \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N A_{i,j} (1 - X_{i,j} - Z_{i,j})$$

-a-
-b-
-c-

sous les contraintes suivantes :

$$\sum_{i=0}^N X_{i,j} = 1 \quad \forall j \in H \quad \text{tq : } j \neq 0 \quad (1)$$

=0
=0

$$\sum_{j=1}^{N+1} X_{i,j} = 1 \quad \forall i \in H \quad \text{tq : } i \neq N+1 \quad (2)$$

=0
i=N+1

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} X_{i,j} \leq |S| - 1 \quad \forall S \subset H, S \neq \emptyset \quad (3)$$

$$X_{i,j} + Z_{i,j} + X_{j,i} + Z_{j,i} = 1 \quad \forall i, j = 1, \dots, N; \text{ tq } i \neq j \quad (4)$$

$$X_{i,k} (X_{k,j} + Z_{k,j}) = X_{i,k} Z_{i,j} \quad \forall i, j, k = 1, \dots, N; \text{ tq } i \neq j \neq k \quad (5)$$

$$\alpha + \beta + \delta = 1 \quad (6)$$

$$X_{i,j} = 0, 1 \quad \forall i, j \in H \quad (7)$$

α : coefficient de pondération pour le premier critère a (maximisation du flux principal) ;

β : coefficient de pondération pour le deuxième critère b (minimisation des sauts en avant) ;

δ : coefficient de pondération pour le troisième critère c (minimisation des retours en arrière) ;

Comme les retours en arrière sont les moins désirables; nous pourrions affecté à δ une valeur plus grande que β .

(1),(2) : les contraintes de degrés.

(3) : les contraintes d'élimination de sous-tours.

(4) : spécifie qu'il existe une seule relation entre le pool i et le pool j dans la ligne optimale, donc soit :

- i est immédiatement avant j ($X_{i,j} = 1$) ;
- i est avant j mais non immédiatement ($Z_{i,j} = 1$) ;
- j est immédiatement avant i ($X_{j,i} = 1$) ;
- j est avant i mais non immédiatement ($Z_{j,i} = 1$).

(5) : les contraintes de transitivité, assurant que si i est avant k dans la ligne obtenue ($X_{i,k} + Z_{i,k} = 1$) et k est avant j ($X_{k,j} + Z_{k,j} = 1$), i sera forcément avant j mais non immédiatement dans la ligne obtenue $Z_{i,j} = 1$.

(6) : permet d'équilibrer l'influence des trois termes utilisant les pondérations α, β, δ .

(7) : contraintes d'intégrité.

1.2.1.3 Deuxième transformation :

Dans cette transformation, nous avons affiné le modèle précédant ; ceci en tenant compte :

- de la redondance d'un critère par rapport aux deux autres critères, en effet maximiser le flux principal revient à minimiser les retours en arrière et les sauts en avant ; ce qui nous a amené à éliminer le critère de la maximisation du flux principal et de retenir les deux autres comme critères d'optimalités définitifs du nouveau modèle ;

-de la possibilité d'écrire d'une autre manière les contraintes de transitivité(5), et ceci non pas quadratiques mais linéaires, ce qui est très important pour la réduction de la complexité du modèle

- de la redondance des contraintes (3) ; en effet les contraintes (4) et (5) associées ensemble éliminent les sous-tours et rendent ainsi les contraintes (3) redondantes.

1.2.1.4 Etude des cas particuliers :

Nous entendons par cas particuliers les cas où une simplification du modèle est possible.

a)- le cas $\gamma = 1$:

C'est le cas où l'on veut minimiser exclusivement les retours en arrière ; pour ce cas bien particulier des modifications sont possibles afin de réduire la taille de notre modèle, ceci en regroupant les variables **X** et **Z** en une seule variable **W** tel que :

$W_{i,j}$: indique si le pool **i** est avant le pool **j** dans la ligne optimale et en éliminant les contraintes de degrés qui ne seront pas nécessaires. Le modèle se présente comme suit :

$$\text{MIN } F = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N A_{i,j} (1 - W_{i,j})$$

sous les contraintes suivantes :

$$W_{i,j} + W_{j,i} = 1 \quad \forall i, j = 1, \dots, N; \text{ tq } i \neq j \quad (1)$$

$$W_{i,k} + W_{k,j} - 1 \leq W_{i,j} \quad \forall i, j, k = 1, \dots, N; \text{ tq } i \neq j \neq k \quad (2)$$

$$W_{i,j} = 0, 1 \quad \forall i, j \in H \quad (3)$$

Une fois ce modèle résolu, la détection de la ligne se fait de la manière suivante :

$\sum_{j=1}^N W_{i,j} = N-1$: indique que le pool **i** est le **premier** pool de la ligne obtenue, puisque **i** est avant tous les autres pools.

$\sum_{j=1}^N W_{i,j} = N- K$: indique que le pool **i** est le **K^{ème}** pool de la ligne obtenue.

$\sum_{j=1}^N W_{i,j} = 0$: indique que le pool **i** est le **dernier** pool de la ligne obtenue.

Ce modèle est similaire au modèle général avec toutefois une réduction de la moitié du nombre de variables, ce qui permet donc de réduire considérablement la taille de notre modèle.

b)- le cas $\gamma = 1/2$:

C'est le cas où on minimise les retours et les sauts avec le même poids ; le modèle est identique à la formulation de base, où nous remplaçons les contraintes d'élimination de sous-tours par d'autres contraintes de même fonction mais avec une réduction considérable du nombre de contraintes.

Ceci en faisant appel à la formule de **MILLER, TUCKER** et **ZEMLIN** [15] ; cette formule introduit une nouvelle variable de décision **Y** qui repérera la position de chaque pool par rapport aux autres dans la ligne, si le pool **i** est avant le pool **j** dans la ligne alors la valeur prise par **Y_i** serait inférieure à celle prise par **Y_j**. Ainsi d'une manière générale **X_{k, l}** serait égale à **0** si **Y_l** est inférieure à **Y_k**.

Le modèle se présente comme suit :

$$\text{MAX } F = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N A_{i,j} X_{i,j}$$

sous les contraintes suivantes :

$$\sum_{i=0}^N X_{i,j} = 1 \quad \forall j \in H \quad \text{tq : } j \neq 0 \quad (1)$$

$$= 0 \quad j=0$$

$$\sum_{j=1}^{N+1} X_{i,j} = 1 \quad \forall i \in H \quad \text{tq : } i \neq N+1 \quad (2)$$

$$= 0 \quad i=N+1$$

$$Y_i - Y_j + N X_{i,j} \leq N-1 \quad \forall i, j = 1, \dots, N \quad (3)$$

$$X_{i,j} = 0, 1 \quad \forall i, j \in H \quad (4)$$

$$Y_i \in \mathfrak{R} \quad \forall i \in H$$

Ce modèle est un modèle de programmation linéaire à variables mixtes avec un nombre de contraintes et de variables de l'ordre de N^2 chacun.

Remarque :

Le problème correspondant à $\gamma = 1/2$ est similaire au problème de voyageur de commerce, en effet en remplaçant dans notre formulation les pools par les villes, les échanges existant entre les pools par les distances reliant les villes et en retenant au lieu de la maximisation du flux total principal la minimisation de la longueur de la tournée, comme critère d'optimalité ; nous obtenons une modélisation connue du problème T.S.P [15].

1-2-2 la conception de la ligne opérationnelle :

Cette phase vise à déterminer une ligne opérationnelle de l'atelier, pour ce faire nous avons eu recours à deux études :

- la première consiste à distribuer les machines appartenant aux pools dans différentes positions de la ligne fonctionnelle, comme le montre l'exemple suivant :

Soit une ligne fonctionnelle formée de trois pools P1, P2, P3 disposés :

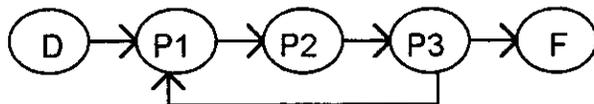


figure 19 : la ligne avant distribution

Avec D : début de la ligne, F : fin de la ligne.

Cette ligne présente un retour en arrière, ce retour correspond à un produit i dont la séquence est la suivante : $s[i] : 3 - 1$; ce retour peut être éliminé de deux manières :

- soit en distribuant une machine du pool 1 :

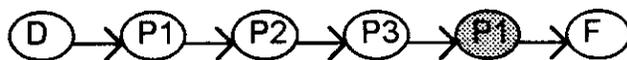


figure 20 : ligne après première distribution

- soit en distribuant une machine du pool 3 :

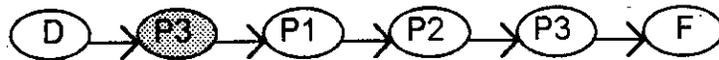


figure 21 : ligne après deuxième distribution

il est à noter que la distribution n'est possible que si le pool a un nombre de machines supérieur à 1.

- la deuxième est l'utilisation des gammes variantes, ceci en tenant compte des possibilités de certaines machines à manufacturer des produits affectés à d'autres machines et la possibilité inter changer certaines opérations dans la gamme d'usinage.

exemple :

soit la ligne suivante :



figure 22 : ligne avant utilisation des gammes variantes

Cette ligne présente un retour en arrière, ce retour correspond à un produit dont la séquence est la suivante : $S[i] : 2-1$. Ce produit présente une gamme variante, l'opération effectuée dans le pool 1 peut être effectuée dans le pool 3, la deuxième séquence est donc $S[i] : 2-3$. Cette séquence ne provoque pas de retours en arrière c'est pourquoi on affecte la dernière opération du produit au pool 3 et non pas au pool 1.

Le choix porté sur l'application de la distribution avant l'application des gammes variantes a été motivé par le fait que lors de la distribution, il est possible de distribuer les pools destinataires des gammes variantes et ainsi offrir une multitude de positions de réaffectation des produits possédant des gammes variantes. Toutefois, l'enchaînement contraire de ces études n'est pas à écarter et il sera peut être intéressant de le considérer.

Les études présentées ci-dessus sont régies par les critères suivants :

- L'amélioration de la configuration du flux de la ligne fonctionnelle en regardant la possibilité d'éliminer certains retours et sauts en avant ;
- L'adéquation charge/capacité en vérifiant dans le cas d'éventuelles réaffectations de certains produits, que les nouvelles charges des moyens de production correspondent aux capacités de ces moyens.

1.2.2.1 Algorithme de distribution :

Dans ce paragraphe nous proposons pour la distribution des machines dans la ligne, un algorithme de nature constructive et améliorative. En effet à partir de la ligne fonctionnelle l'algorithme construit la ligne opérationnelle tout en l'améliorant pas à pas. La nature de cet algorithme est similaire à celle des heuristiques proposées pour le problème de voyageur de commerce.

Pour l'application de l'algorithme, nous déterminons en premier lieu les pools distribuables ; nous entendons par pool distribuable, le pool qui possède un nombre de machines supérieur à un. A partir de ces pools, on construit une matrice de contribution, les éléments de cette matrice représentent chacun l'amélioration de la configuration du flux résultant de l'insertion d'une ou de plusieurs machines du pool distribuable dans une position d'insertion dans la ligne.

Les positions d'insertions sont établies de la manière suivante :
soit une ligne de N pools :

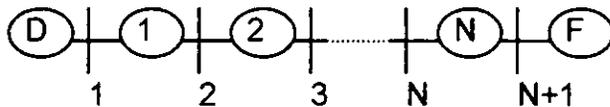


figure 23 : les différentes positions d'insertions dans une ligne de N pools

On a ainsi N+1 positions d'insertion possibles.

D'où la matrice de contribution suivante :

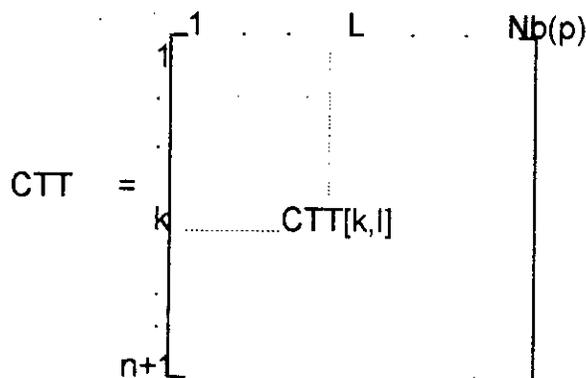


figure 24 : la matrice de contribution

$ctt[k,l]$ représente la contribution obtenue par l'insertion d'une ou de plusieurs machines du pool L dans la position k. La contribution est analogue à la fonction objective retenue dans la modélisation mathématique de la ligne fonctionnelle.

$ctt[k,l] = (1-\gamma) \text{ nbre de sauts} + \gamma \text{ nbre de retours}$ avec :

- nbre de sauts = nbre de sauts éliminés - nbre de sauts provoqués (en distribuant L dans k) ;
- nbre de retours = nbre de retours éliminés - nbre de retours provoqués(en distribuant L dans k) ;
- γ : le poids affecté à la minimisation des retours en arrière.

$ctt[k,l]$ est calculé en consultant toutes les séquences des produits présentant des retours en arrière et sauts en avant engendrés par la position actuelle du pool L. Une fois la matrice CTT obtenue on retient l'élément qui maximise la contribution, c.à.d le pool à distribuer et sa position d'insertion. Cet élément représente l'élimination des sauts et des retours en arrière pour certains produits, toutefois l'insertion du pool L dans la position k n'est possible que si ces produits justifient une charge adéquate sur une ou plusieurs machines du pool L.

L'algorithme se présente comme suit :

(0) initialiser la ligne :

- déterminer les pools distribuables ;
- déterminer les positions d'insertions.

(1) établir la matrice CTT.

(2) sélectionner le $ctt[k,l]$ maximum.

Si $ctt[k,l] > 0$

Alors

(0') identifier les produits à réaffecter à la nouvelle position.

(1') calculer la charge correspondante notée $ch[k,l]$.

Si $ch[k,l]$ est adéquate* **Alors** :

- distribuer L dans K.
- $N=N+1$.
- réaffecter les produits identifiés.

Sinon $ctt[k,l]=0$, aller à (2) .

Fin alors.

Sinon Stop.

(3) Fin.

Interprétation du test* :

La réponse au test " **si $ch[k,l]$ est adéquate** " nécessite une étude de charges tenant en compte de la considération suivante :

- quand la charge totale d'un pool dépasse un taux déterminé $T\%$ (80% pour la C.V.I) de la capacité totale du pool, l'entreprise opte pour l'achat de nouvelles machines, diminuer la charge totale en ayant recours à la sous-traitance ou de programmer des heures supplémentaires. Ainsi une machine qui présente une charge supérieure à $T\%$ de sa capacité est chargée réellement que de $T\%$, ce qui nous amène à distinguer deux cas possibles :

1er cas : c'est le cas où la charge totale du pool L dépasse T% de sa capacité totale ($\text{cht}[l] / \text{capt}[l] > T\%$), alors $\text{ch}[k,l]$ est adéquate si :

$$- (\text{ch}[k,l] / \text{cap}[nl]) > T\% \text{ et } (\text{cht}[l] - \text{ch}[k,l]) / (\text{capt}[l] - \text{cap}[nl]) > T\%.$$

tel que :

$\text{cap}[nl]$: capacité du nouveau pool distribué à partir des machines du pool L.

Ce cas est illustré dans l'exemples suivant :

soit un pool L disposant de deux machines tel que :

$$\text{cht}[l] = 800 \text{ heures ;}$$

$$\text{capt}[l] = 800 \text{ heures ;}$$

$$T\% = 80 \% ;$$

$$\text{ch}[k,l] = 200 \text{ heures;}$$

$$\text{ch}[k,l] \text{ est adéquate si : } (200 / 400) > 80\% \text{ et } (800 - 200) / 400 > 80\% ,$$

"400" : la capacité d'une seule machine.

Ainsi $\text{ch}[k,l]$ n'est pas adéquate puisque à partir d'un pool initial L, nous obtenons deux pools tel que le premier a un taux d'occupation de 150% et que le deuxième est occupé seulement d'un taux de 50%, ce qui viole le principe de l'adéquation charge\capacité. Le cas où par exemple les deux pools ont des taux d'occupations de 110% et 90%, le principe est respecté puisqu'en réalité ces deux pools sont chargés avec le même taux (80%). En d'autre termes le principe revient à éviter qu'un pool soit sous-chargé ($< T\%$).

2ème cas : c'est le cas où la charge totale du pool L est inférieure à T% de sa capacité totale.

($\text{cht}[l] / \text{capt}[l] < T\%$), alors $\text{ch}[k,l]$ est adéquate si :

$$(\text{ch}[k,l] / \text{cap}[nl]) < T\% \text{ et } (\text{cht}[l] - \text{ch}[k,l]) / (\text{capt}[l] - \text{cap}[nl]) < T\% .$$

En reprenant le même exemple avec :

$$\text{capt}[l] = 1600 \text{ heures,}$$

$\text{ch}[k,l]$ est adéquate si :

$$(200/800) < 80\% \text{ et } (800-200)/800 < 80\%;$$

"800" : capacité d'une seule machine ; ainsi $\text{ch}[k,l]$ est adéquate.

Le principe retenue dans ce cas revient donc à éviter qu'un pool soit surchargé ($> T\%$).

Proposition :

Dans le but de rendre plus flexible et plus représentatif de la réalité le test de l'adéquation charge/capacité, nous avons pris en considération la possibilité de réaffectation des opérations de certaines séquences s'effectuant sur le pool distribuable et ceci de ce dernier vers le pool à distribuer. Toutefois, ces réaffectations ne sont possibles que si la configuration du flux de ces séquences ne change pas. Ainsi, à partir de ces réaffectations nous pourrions augmenter les charges des pools à distribuer afin de les rendre adéquates.

Nous avons reconnu deux types de réaffectations :

- réaffectation des opérations unique (séquences contenant une opération) ;
- réaffectation pour les séquences contenant plus de deux opérations.

A la différence du 1^{er} type de réaffectations, les réaffectations du 2^{ème} type ne peuvent être déterminées au cours de l'exécution du programme. En effet, soit une opération d'une séquence qu'on peut réaffecter du pool distribuable au pool à distribuer sans changement de la configuration du flux de cette séquence. Toutefois, cette réaffectation n'est pas possible car il se peut que dans une étape ultérieure du programme, pour une nouvelle redistribution de ce pool, ou en appliquant les gammes variantes, la configuration du flux de la séquence soit améliorée.

C'est pourquoi, nous avons défini une marge notée **MG** qui représente l'écart qu'on tolère entre la charge réelle du pool à distribuer et la charge au delà de laquelle le principe de l'adéquation charge/capacité est vérifié.

Le programme sera exécuté pour différentes valeurs de **MG**, la solution retenue correspond à la valeur maximale de **MG**, dont les réaffectations à faire justifient réellement cette marge. Il est à noter que nous avons quantifié **MG** de chaque pool distribuable par le pourcentage de la charge totale du pool considéré relative aux séquences contenant plus de deux opérations.

Remarque :

le calcul des charges et des capacités fera l'objet d'une étude détaillée dans le chapitre suivant.

1.2.2.2 Algorithme des gammes variantes :

L'étude des gammes variantes s'intéresse aux produits dont certaines opérations d'usinage peuvent être effectuées par des pools (destinataires) autres que le pool (originaire) où les produits sont affectés initialement. L'algorithme que nous proposons permet de voir la contribution à l'amélioration de la ligne, engendrée par la réaffectation de ces produits aux pools destinataires.

Cependant la réaffectation n'est faite que si la charge du pool originaire et celle du pool destinataire restent toujours adéquates.

A la différence de l'algorithme de distribution, cet algorithme est seulement amélioratif. Il se présente comme suit :

(0) relever les produits possédant des gammes variantes, soit n_p le nombre de ces produits,

(1) sélectionner le i ème produit

Si ($i > n_p$) **Alors** aller à (5),

Sinon aller à (2).

(2) relever le pool originaire et les pools destinataires du produit i ;

(3) établir le vecteur contribution pour le produit i en le réaffectant aux différents pools destinataires ;

(4) sélectionner le $ctt[des]$ maximum

Si ($ctt[des] > 0$) **Alors**

Si $ch[des]$ et $ch[orig]$ sont adéquates **Alors**

- réaffecter i au pool destinataire "des"

- $i = i+1$

- aller à (1)

Sinon $ctt[des] = 0$, aller à (4)

Fin Alors

Sinon $i = i+1$, aller à (1)

(5) Stop, FIN.

Remarque :

les tests de l'adéquation charge/capacité sont similaires à celui de l'algorithme de distribution.

2- Décomposition en sous lignes de production :

D'après l'enchaînement retenu des concepts d'analyse statique, la décomposition de l'atelier en sous lignes de production constitue la dernière étape. En effet, à partir des résultats obtenus en agençant les moyens de production en ligne ; donc à partir de la ligne opérationnelle, nous procédons au partitionnement de cette ligne en sous-lignes de production.

Le principe de ce partitionnement est le suivant :

soit une ligne opérationnelle composée de N postes de travail, représentées ainsi :

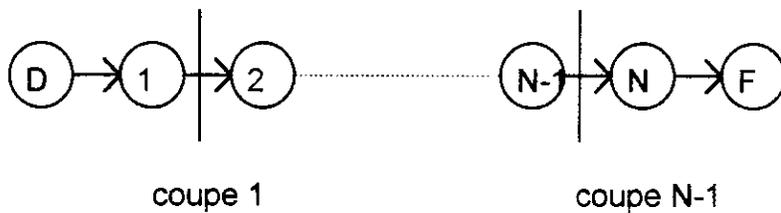


figure 25 : les différentes coupes possibles dans une ligne de N pools

On établit des coupes adéquates comme c'est représenté ci-dessus et on associe à ces coupes des valeurs représentant l'échange total qui existe entre la partie avant coupe et la partie après coupe, afin de relever les liaisons non significatives (celles dont la valeur de la coupe est petite ou négligeable). Ainsi nous pouvons effectuer cette décomposition en séparant les tranches qui présente des liaisons non significatives.

Les produits seront ultérieurement affectés aux sous-lignes adéquates, nous affecterons un produit à la sous-ligne où il effectuera le maximum d'opérations d'usinage.

exemple illustratif :

soit la ligne opérationnelle suivante :

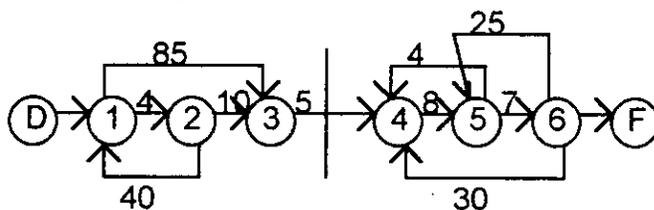


figure 26 : décomposition de la ligne opérationnelle.

Nous remarquons que la coupe entre le pool 3 et le pool 4 a une valeur négligeable par rapport aux autres coupes, ainsi nous pouvons décomposer cette ligne en deux sous-lignes de production ; le nombre d'inter-flux est égal à 5.

EXEMPLE INDUSTRIEL

Résumé :

Le chapitre quatre portera sur l'application de notre approche de résolution sur un cas industriel atelier " Ferrures". Nous analyserons la situation actuelle de l'atelier, puis nous retiendrons un cas d'étude. Enfin nous présenterons pour chaque étape de résolution les données nécessaires et les résultats obtenus.

1- Analyse de la situation actuelle :

1.1 Présentation de l'atelier "ferrures" :

L'atelier "ferrures" se situe au centre du bâtiment mécanique du C.V.I de Rouiba. Il occupe une superficie de 1487m². Cet atelier est spécialisé dans la fabrication de pièces destinées à être montées sur des châssis de camions ou de bus.

Pour une simple description de l'atelier "ferrures", nous présenterons les quatre paramètres qui nous paraissent les plus représentatifs :

- effectif,
- machine,
- produit,
- processus.

1- Effectif :

L'atelier "ferrures" est composé de 71 travailleurs dont :

- 01 chef d'atelier ;
- 02 contremaîtres ;
- 04 chefs d'équipes ;
- 13 régleurs ;
- 51 opérateurs.

2- Machine :

Le parc machine de l'atelier se compose de 46 machines (voir annexe B) réparties comme suit :

- 04 tours,
- 13 fraiseuses,
- 26 perceuses,
- 01 machine à dresser,
- 01 touret mape meule,
- 01 perceuse aléseuse à commande numérique.

Les machines sont regroupées en sections homogènes et disposées en trois lignes parallèles séparées par 2 allées pour les manutentions.

Chaque machine est :

- immatriculée par 2 numéros,
- codifiée.

Le premier numéro du matricule est composé de 4 chiffres (matricule Berliet), le second d'une lettre suivie de six chiffres (matricule Sonacome). Le code machine, utilisé pour regrouper les machines identiques est composé de cinq chiffres, dont les deux premiers désignent la nature de la machine (voir figure 27).

| code machine | signification |
|--------------|---------------|
| 11 | tour |
| 31 | fraiseuse |
| 32 | perceuse |
| 43 | meule |

figure 27 : : La signification des deux premiers chiffres du code machine .

3- Produit :

Les pièces usinées dans l'atelier "**ferrures**" sont de deux types :

les pièces appartenant à la famille "**ferrures**" et gérées par l'atelier qui sont au nombre de 378 et les pièces extérieures, gérées par d'autres ateliers au nombre de 76.

Ces pièces sont classifiées de la manière suivante :

- la classe **A** : regroupe les pièces dont le lancement s'effectue une fois par mois (11/an) ;
- la classe **B** : regroupe les pièces dont le lancement s'effectue une fois par deux mois (6/an) ;
- la classe **C** : regroupe les pièces dont le lancement s'effectue qu'une seule fois par an.

Cette classification a été établie en tenant en compte du volume de production de chaque produit et de leurs valeurs monétaires.

Enfin, chaque pièce est immatriculée par un numéro de plusieurs chiffres (voir annexe **B**).

4- Processus :

Gilbreth définit quatre étapes nécessaires pour la fabrication des pièces ; ces étapes sont les suivantes :

- opération (usinage sur la machine),
- attente,
- transport,
- contrôle.

L'ordre des étapes d'usinage est déterminé par la gamme de fabrication qui comporte :

- toutes les opérations par lesquelles doit passer la pièce lors de sa fabrication ;
- le type de chaque opération (tournage, fraisage,...) ;
- la partie à usiner (désignée par un croquis de la pièce) ;
- la machine à utiliser pour cette opération ;
- les temps nécessaires à l'opération et au réglage de la machine.

Sur demande du centre de montage, le service ordonnancement lance la fabrication des pièces commandées selon le schéma suivant :

- 1- un lot de pièces est réceptionné sous forme de brut dans une ou plusieurs caisses-palettes ;
- 2- conformément à la gamme d'usinage, la première opération de ce lot se déroule comme suit :
 - un chariot élévateur transporte la caisse-palette de l'endroit de stockage jusqu'à la machine pour un usinage du lot ;
 - une fois la pièce usinée, elle est mise dans une deuxième caisse-palette, cette opération est répétée jusqu'à l'usinage de toutes les pièces.
- 3- un chariot élévateur transporte cette deuxième caisse-palette jusqu'à la deuxième machine, où le lot de pièces subira l'opération suivante en répétant les mêmes étapes précédentes.

Le procédé est répété jusqu'au traitement final du lot entier qui sera contrôlé ensuite transporté vers les magasins de stockage.

1.2- Dysfonctionnements dus à l'organisation actuelle de l'atelier :

Suite à nos discussions avec les responsables de l'atelier et à nos propres observations relevées lors de notre stage dans l'atelier "ferrures", nous avons identifié certains problèmes, essentiellement dus à l'organisation actuelle de l'atelier ; à savoir :

- les attentes longues ;
- le suivi de production pénible ;
- les accidents de travail fréquents ;
- l'espace de stockage étroit ;
- la qualité médiocre ;
- la perte de productivité.

1- Les attentes :

Une des causes de formation de files d'attentes dans l'atelier est l'indisponibilité immédiate des moyens de manutention (deux chariots élévateurs pour tout le bâtiment mécanique) ; les durées d'attentes des lots devant le poste sont très longues, souvent supérieures à 24 heures. Ce qui provoque un allongement des cycles de fabrication.

2- Le suivi de production :

La clarté visuelle du flux permet un suivi de production réaliste. Afin d'avoir une idée sur le flux engendré par l'implantation actuelle, nous avons représenté sur une carte de flux, les flux engendrés par les opérations contenues dans les gammes de fabrication, de quelques pièces (voir annexe D). Nous avons remarqué une grande complexité des flux ainsi représentés, d'où un manque de clarté visuelle du flux. Ceci explique les difficultés rencontrées par les responsables de l'atelier lors des présences simultanées de plusieurs produits ; ces derniers engendrent un stock d'en-cours important et de nombreuses manutentions, qui rendent ainsi le suivi de production pénible.

3- Les accidents de travail :

L'importance du flux de pièces circulant entre les postes de travail implique une forte utilisation des moyens de manutention, ceci provoque et engendre les accidents de travail entraînant à leurs tours une augmentation du taux d'absentéisme (15% en 1994).

4- L'espace de stockage :

L'atelier "ferrures" souffre d'un manque d'espace de stockage engendré par la présence de stocks importants d'en-cours. Ces stocks provoquent des encombrements au niveau des postes entraînant des difficultés de circulation des opérateurs.

5- La qualité :

Le taux de rebuts enregistré au cours de l'année 1994 a été d'environ 8%. Ce taux a été qualifié d'inquiétant par le responsable de la qualité au niveau du centre mécanique puisqu'il dépassait de loin la qualité limite tolérée par le service de qualité (3%).

Un nombre non négligeable de causes de cette non qualité est dû :

- aux mauvaises manutentions (les distances parcourues par les pièces sont longues et les chutes sont fréquentes) ;
- à la détection tardive des défauts dans le processus. En effet, à cause de la complexité du flux dans l'atelier, le contrôle des pièces durant le processus de fabrication est quasiment impossible (le contrôle s'effectue seulement à la fin du processus).

Ces défauts engendrent :

- des coûts supplémentaires pour entretenir des stocks de sécurité liés aux rebuts ;
- une re planification des pièces rebutées engendrant des surcharges locales pénalisantes pour les délais ;
- des coûts de retouche toujours élevés car ces retouches se font hors processus.

Toutefois, une étude plus approfondie confirmera sûrement que l'organisation actuelle de l'atelier est un facteur de non qualité.

6- La productivité : [10]

En 1994, 103791 heures ont été prévues ; dans cette somme nous retrouvons :

- 15847 heures d'absence ;
- 657 heures reçues des autres ateliers ;
- 2444 heures prêtées aux autres ateliers.

Le nombre d'heures de fabrication est ainsi de 86157 heures (103791-15847+657-2444) sur ces heures de fabrication, 26448 heures seulement ont été allouées à la fabrication des produits, les heures d'écarts sont de 59709 heures. Ces écarts sont dus essentiellement à la fiabilité des machines, aux attentes dues à la manutention, aux réglages et aux mauvaises conditions de travail. Les opérateurs estiment que les temps unitaires de production sont en général suffisants.

Sachant que l'atelier compte en moyenne 254 jours ouvrables et une cinquantaine d'opérateurs, nous pouvons estimer la perte de productivité de chaque opérateur à environ 4 heures et demie par jour ($59709/254/51=4.61$).

Conclusion :

La multitude des problèmes rencontrés dans l'atelier "ferrures" impose une réorganisation. Toutefois, il est à rappeler que nous ne pouvons pas à ce stade de l'étude affirmer si cette organisation est inadéquate pour l'atelier ou pas, "la meilleure façon, voir la seule de démontrer qu'une implantation est mauvaise, est d'en proposer une autre qui soit meilleure" [3].

2- Application :

2.1 Le cas retenu :

La formulation du problème de mise en ligne évoquée dans le chapitre précédent, nous offre une multitude de cas d'études possibles. En effet, chaque valeur de γ correspond à un cas. Nous rappelons que γ et $1-\gamma$ représentent les poids affectés aux critères de minimisation des retours en arrière et des sauts consécutivement, ils définissent la relation existante entre les retours en arrière et les sauts. Nous définissons un taux μ qui identifie cette relation comme suit : $\mu = \gamma / 1-\gamma$.

- $0 < \gamma < 1$: dans ce cas, on élimine **un** retour en arrière pour μ sauts en avant, en d'autres termes un retour est équivalent ou engendre le même effet que μ sauts.

- $\gamma = 0$: dans ce cas on minimise exclusivement les sauts en avant.

- $\gamma = 1$: dans ce cas on minimise exclusivement les retours en arrière.

Exemple :

Min 0.8 nbre de retours + 0.2 nbre de sauts

$\gamma = 0.8$ $\mu = 4$.

Pour ce critère d'optimalité, **un** retour en arrière est équivalent à **quatre** sauts en avant.

La valeur de μ dépend étroitement des paramètres de la ligne recherchée (suivi de production, manutentions).

Dans la suite de notre travail, nous nous intéressons au cas le plus important où on minimise exclusivement les retours en arrière ($\gamma = 1$). Toutefois, des études similaires pour d'autres valeurs de γ restent intéressantes à considérer dans la mesure où elles offrent un choix réel aux concepteurs d'ateliers.

2.2 Démarche de résolution :

2.2.1 Formation de la ligne de production :

2.2.1.1 La recherche de la ligne fonctionnelle :

1- Présentation et organisation des données :

Les données nécessaires à la conception de la ligne fonctionnelle sont celles relatives à la construction de la matrice **A** ; cette matrice représente les échanges entre les pools. Pour notre application, nous avons choisi les données représentant le nombre de lots de production, car à notre sens ces données sont les plus représentatives des échanges. Les éléments de **A** sont définis comme suit :

$A_{i,j}$: la somme des mouvements des produits circulant du pool **i** vers le pool **j**.

Les données que nous avons recueillies sont :

a)- les données relatives aux pools (le nombre et caractéristiques techniques des machines).

b)- les données relatives au calcul des échanges :

- la séquence d'opérations pour chaque pièce ;
- le nombre de lancement annuel pour chaque pièce.

a)- Données relatives aux pools :

Comme déjà mentionné précédemment, l'atelier "ferrures" est équipé de 46 machines ; après avoir relevé les caractéristiques techniques de chaque machine et ayant constaté avec l'aide des responsables de l'atelier qu'il existe parmi elles des machines pouvant effectuer le même type d'opérations d'usinage et avec les mêmes performances, nous les avons regroupés en 20 pools (voir annexe **B**).

b)- Données relatives au calcul des échanges :

- Les séquences d'opérations :

Après consultation des séquences d'usinages des 450 pièces usinées dans l'atelier "ferrures", nous avons regroupé les données dans une matrice **B**, où les lignes représentent les pièces et les colonnes représentent les pools. Les éléments de cette matrice sont définis comme suit :

$$B_{i,j} = \begin{cases} k & \text{si le pool } j \text{ effectue la } k^{\text{ème}} \text{ opération du produit } i \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

1)- Cheminement des pièces :

Afin d'avoir un aperçu sur le flux ou le cheminement des pièces, nous avons identifié pour chaque pièce **i**, le nombre d'opérations dans sa gamme de fabrication, et avons constaté que sur les 450 pièces fabriquées dans l'atelier :

- 178 pièces soit **39.56%** n'utilisent qu'un seul pool dans leurs gammes d'usinage, elles représentent la **catégorie 1** ;

- 272 pièces soit **60.44%** passent au moins par 2 pools, elles représentent la **catégorie 2**.

Les pièces de la catégorie 1 ont été éliminées du traitement du fait qu'elles ne participent pas aux échanges entre les pools (une seule opération dans leurs gammes d'usinage).

Nous avons constaté par la suite que pour les 272 pièces (catégorie 2), le nombre de pools utilisés dans leurs gammes d'usinage était compris entre 2 et 10, soit une répartition en huit classes (voir figure 28). Il apparaît que la majorité des pièces soit 95.6% utilisent dans leurs gammes d'usinage un nombre de pools ≤ 6 .

2)- Degrés de sollicitation des pools :

Pour définir les pools les plus sollicités dans le processus de fabrication, nous avons calculé pour chaque pool le nombre de pièces qui y passent (voir figure 29).

Il apparaît qu'une grande partie des pièces passent par les pools 3,9,11,12 et 13. En effet, cela est dû aux caractéristiques techniques de ces pools (voir annexe **B**).

D'autres part et pour ces mêmes raisons certains pools ne sont utilisés que par un nombre réduit de produits soit les pools 2,16,17,18,19 et 20.

- Le nombre de lancement annuel :

Les pièces usinées dans l'atelier "ferrures" peuvent être lancées pour la production 1 fois/an, 6 fois/an ou bien 11 fois/an, les résultats obtenus par la classification des pièces de la catégorie 2 sont expliqués dans la figure 30.

Une fois les données recueillies, la construction de la matrice d'échanges A se fait en identifiant pour chaque deux pools i et j les pièces les sollicitant consécutivement ; l'échange $A_{i,j}$ est calculé en sommant les nombres de lancements de ces pièces ($A_{i,j} = \sum \text{classe}[k]$).

Exemple :

calculer l'échange entre les pools 2 et 4 pour les données suivantes :

P1 : 1-2-4-6 classe A
 P2 : 2-4 classe B
 P3 : 1-6 classe C.

Les produits circulants entre le pool 2 et le pool 4 sont :

P1 et P2 $A_{2,4} = 11 + 6 = 17$.

De la même manière nous avons obtenu la matrice A pour l'atelier "ferrures" ; dans le but d'étudier ces échanges nous avons analysé les flux entrants et sortants pour chaque pool, le calcul de ces flux se fait de la manière suivante : Soit un pool i , son flux sortant représente la somme de tout les échanges du pool i vers les autres pools, ainsi le flux sortant du pool i est calculé par la somme de tout les éléments de la ligne i de la matrice A. Le flux entrant du pool i est calculé par la somme de tout les éléments de la colonne i de la même matrice. Les résultats obtenus après calcul sont représentés dans la figure 31.

Cette analyse nous permet d'avoir une idée à priori sur l'emplacement des pools dans la ligne, par exemple pour le pool 14, le flux entrant = 285 et le flux sortant = 62, nous pouvons prévoir que ce pool sera placé dans la ligne parmi les derniers. Nous pouvons aussi détecter des pools qui ont un flux d'échange négligeable par rapport au flux total c'est le cas des pools 17,18,19,20 leurs flux présentent 3.8% du flux total. Ces pools peuvent être écartés de la résolution actuelle, ce qui nous permet de réduire la taille de notre problème (16 pools) ; après l'obtention de la ligne fonctionnelle on les réintègre dans la ligne en tenant compte toujours du critère d'optimalité.

Remarque :

Pour simplifier le traitement des données, nous avons adopté des codes différents de ceux du C.V.I, les pools sont notés par pool j ($j = 1, \dots, 20$) ; les pièces sont notées par P_i ($i = 1, \dots, 450$).

2- Présentation de l'outil de résolution : [2], [9]

Le choix de l'outil de résolution pour notre problème s'est porté sur le logiciel **GAMS** ; ce choix a été motivé par les raisons suivantes :

- la disponibilité du logiciel et de la documentation ;
- l'efficience-temps ;
- la flexibilité et la puissance du logiciel ;
- la facilité de compréhension du modèle.

a)- Présentation de GAMS :

GAMS (General algebraic modeling system) est conçu pour la construction et la résolution de modèles de programmation mathématique larges et complexes. GAMS est la combinaison d'une part du langage de modélisation GAMS et d'autre part d'un ensemble de solvers associés à différents types de problèmes. Les types de problèmes pouvant être résolus par le logiciel GAMS, ainsi que les solvers correspondants sont donnés en annexe E.

b)- Avantages :

- GAMS peut manipuler un maximum de 32767 lignes, 32767 colonnes, 32767 éléments non linéaires non nuls ;
- production d'un rapport détaillé contenant le modèle initial et les valeurs de départ pour les variables de décision ;
- utilisation d'un éditeur extérieur et séparé pour créer le modèle ;
- il présente des options qui permettent le contrôle de l'exécution ;
- possibilité d'activer ou de désactiver une ou plusieurs contraintes ;

c)- Caractéristiques d'utilisation du langage de modélisation :

GAMS présente le modèle sous forme compacte ; les données peuvent être représentées sous forme de tableaux (vecteur ou matrice de coefficients) ; la fonction objective et les contraintes peuvent être aisément formulées en utilisant les notations de sommation et de produit (la structure générale d'un programme GAMS est présentée en annexe E).

Notre modèle est un problème de programmation linéaire en nombre entier à variables bivalentes, ceci étant nous avons choisi l'utilisation du solveur **OSL** qui correspond parfaitement à ce type de problème.

d)- Présentation de GAMS/OSL :

GAMS/OSL est un progiciel réalisé en langage de programmation **FORTRAN** pour la résolution des problèmes de programmation en nombres entiers mixte (Mixed integer programming-Mip), et en variables binaires. Il commence la résolution du problème comme un problème linéaire, ensuite il utilise la méthode de **BRANCH and BOUND** pour retrouver la solution optimale.

GAMS/OSL présente des options qui permettent de mieux contrôler l'exécution, parmi ces options et celles que nous avons jugées utiles pour notre programme sont :

- **RESLIM** et **ITERLIM** permettent de contrôler les ressources allouées ;
 RESLIM : permet de spécifier le temps maximal d'exécution,
 ITERLIM : permet de spécifier le nombre maximum d'itérations.
- **BRANCH='YES'** ou **'NO'** indique si la procédure Branch and Bound est exécutée ou non ;
- **HEURISTIC='YES'** ou **'NO'** indique si l'heuristique est exécutée ou non ;
- **OPTCA** et **OPTCR** contrôlent la fin de l'exécution ;
- **DISPLAY** : permet d'organiser le résultat final, en spécifiant les résultats à renvoyer dans un fichier défini par l'utilisateur (fichier.LST par défaut), ce fichier contient en plus, les temps d'exécution et de compilation du programme.

3- Résultats et interprétations :

Nous rappelons que notre modèle est un problème NP-complet de nature combinatoire, ce type de problèmes nécessitent énormément d'espace mémoire vive (RAM) pour de grandes valeurs de N (nombre de noeuds) ; il sera plus intéressant de faire la résolution sur de grands système tel que le VAX , chose que nous n'avons pas pu faire car nous ne disposons pas de version GAMS pour ce type d'ordinateur.

Pour notre application, nous avons regroupé les machines de l'atelier " ferrures " en 20 pools (N=20), et compte tenu de la capacité limitée du PC que nous avons utilisé (4 Mo de RAM) qui ne répondait pas à la taille de notre modèle nous avons écarté les pools 17, 18, 19, 20 (comme mentionné dans le paragraphe "analyse du flux entrant et sortant" précédemment). Ceci nous a permis de réduire la taille de notre modèle à 16 pools et de le rendre ainsi accessible au micro-ordinateur mis à notre disposition.

En effet, après avoir transcrit notre modèle à l'aide du modeleur GAMS (voir annexe F) ; et après organisation des sorties nous avons obtenu la ligne fonctionnelle, la configuration du flux de la ligne obtenue est donnée dans le tableau suivant :

| | Retours | Sauts | P. successifs | Total |
|-----------|---------|-------|---------------|-------|
| Nombre | 1633 | 3704 | 737 | 6074 |
| % / total | 26.88 | 61.00 | 12.12 | 100 |

figure 32 : la configuration du flux de la ligne fonctionnelle avant insertion des 4 machines.

La ligne fonctionnelle obtenue ne présente que **26.88 %** de retours en arrière du flux total, nous pouvons juger ces résultats comme positifs d'autant plus qu'une diminution de ces retours dans l'étape suivante reste envisageable.

Insertion des pools écartés initialement :

Dans cette partie nous allons intégrer les pools 17,18,19,20 dans la ligne fonctionnelle. Pour cela, nous avons établi un algorithme qui a fait l'objet d'un programme informatique en langage **Turbo Pascal version 7.0**. Dans ce programme on insère le pool à intégrer dans les différentes positions de la ligne, on calcule le nombre de retours engendrés par chaque position d'insertion et on intègre le pool dans la position qui engendre le minimum de retours en arrière. Après application de ce programme pour les pools 17,18,19,20 nous avons obtenu la ligne fonctionnelle finale pour l'atelier "ferrures" (voir annexe F).

La configuration du flux de la ligne finale est représentée dans le tableau suivant :

| | Retours | Sauts | P. successifs | Total |
|-----------|---------|-------|---------------|-------|
| Nombre | 1.724 | 3.923 | 676 | 6.323 |
| % / total | 27.26 | 62.04 | 10.7 | 100 |

figure 33 : la configuration du flux de la ligne fonctionnelle finale

2.2.1.2 La recherche de la ligne opérationnelle :

1- Présentation des données :

Dans le but de rechercher la ligne opérationnelle, nous avons proposé dans le chapitre précédent deux algorithmes complémentaires. La structure de ces algorithmes appropriée à ce cas d'application est identique à celle du cas général avec toutefois une adaptation de la contribution qui représentera dans ce cas le nombre total de retours en arrière éliminés.

Ces algorithmes utilisent les données suivantes :

- données nécessaires au calcul des contributions ;
- données nécessaires à la vérification de l'adéquation charge/capacité.

a- **Données nécessaires au calcul des contributions** :

Pour le calcul des contributions, nous avons retenu les données suivantes :

- les pools distribuables ;
- les gammes variantes ;
- la séquence de fabrication de chaque pièce ;
- le nombre annuel de lancement pour chaque pièce.

Ces deux dernières données sont identiques à celles utilisées dans le calcul des échanges, cependant une nouvelle réorganisation de ces mêmes données a été nécessaire, ceci en prévision d'une éventuelle programmation des algorithmes de distribution et des gammes variantes.

Nous avons regroupé les séquences des pièces dans une matrice $S[1..p,1..10]$ tel que :

$S_{i,j}$: le pool où la $j^{\text{ème}}$ opération de la séquence i est effectuée.

p : le nombre total des séquences.

10 : le nombre maximum d'opérations d'usinage contenues dans une séquence de fabrication.

Pour le nombre de lancements annuels, nous les avons regroupés dans un vecteur $CL[1..p]$ tel que :

CL_i : le nombre de lancement annuel du produit associé à la séquence i .

Il est à noter que "p" n'est pas égal au nombre de pièces, ceci est dû au fait que pour la fabrication de certains produits, ces derniers sortent de l'atelier "ferrures" pour effectuer des opérations dans d'autres ateliers puis reviennent dans l'atelier "ferrures" pour terminer leurs fabrications, ce qui nous a amené à diviser leurs séquences de fabrications en plusieurs séquences ; à titre d'exemple la séquence de fabrication du produit 36 est : 13 - 11 (*) 11 - 13. Donc en terminant sa 2^{ème} opération sur le pool 11, ce produit sort de l'atelier pour revenir effectuer les deux dernières opérations sur le pool 11 et le pool 13, ainsi la séquence de ce produit a été divisée en deux séquences :

- séquence 1 : 13 - 11

- séquence 2 : 11 - 13

Le nombre total des séquences de fabrication relevées est de 273, ce nombre n'intègre pas le nombre de séquences qui présentent une seule opération d'usinage puisque ces dernières n'interviennent pas dans le calcul des contributions.

b- Données nécessaires à la vérification de l'adéquation charge / capacité :

Afin de déterminer les données nécessaires à cette étape, nous présenterons en premier lieu les méthodes de calculs des charges et des capacités.

b.1 Données sur les charges :

Le calcul de la charge totale annuelle d'un pool j se fait de la manière suivante :

$$CHT_j = \sum_{i=1}^M TA_{ji} Q_i \quad \text{tel que :}$$

TA_{ji} : temps alloué à la fabrication d'une pièce i sur une machine du pool j ;

Q_i : quantité annuelle à fabriquer du produit i ;

M : le nombre de produit sollicitant le pool j .

Ainsi les données nécessaires à la détermination des charges sont :

- les temps alloués de chaque opération de chaque produit ;
- la quantité annuelle à fabriquer pour chaque produit.

les temps alloués ont été regroupés dans une matrice **CH [1..p,1..10]** similaire à la matrice **S** ; tel que :

$CH_{i,j}$: représente le temps alloué à l'exécution de la **j^{ème}** opération de la séquence i , il est à remarquer la correspondance biunivoque entre les éléments de la matrice **S** et **CH**, en effet $S_{i,j}$ est le pool correspondant à la **j^{ème}** opération de la séquence i .

Les quantités annuelles à fabriquer ont été regroupées dans un vecteur **Q[1..p]**.

Pour les séquences présentant une seule opération ; nous avons calculé la charge correspondante à chaque pool ; ces charges sont très importantes dans l'équilibrage charge / capacité ; de ce fait nous les avons regroupées dans un vecteur **CH1[1..20]** (20 est le nombre de pools).

remarque : les données utilisées sont représentées en annexe **C**.

b.2 Données sur les capacités :

Le calcul de la capacité annuelle ou du potentiel net d'un pool j se fait de la manière suivante :

$$CAP_j = PB_j - TP_j \quad \text{tel que :}$$

- **PB_j** : le potentiel brut du pool j , il est calculé comme suit :

$$PB_j = NJ \times NH \times NB_j \times 60 \quad \text{avec :}$$

- NJ** : nombre de jours ouvrables par an ;
- NH** : nombre d'heures de travail par jour ;
- NB_j** : nombre de machines regroupées dans le pool **j** ;
- 60** : conversion heure / minutes.

- **TP_j** : le total des pertes du pool **j**, ces pertes sont dues aux paramètres suivants :

- les pannes,
- les réglages,
- les nettoyages.

- les pertes pannes sont calculées à partir des taux prévisionnels de panne établit par le service maintenance, ainsi :

$$PP_j = TP_j \times PB_j \text{ tel que :}$$

- PP_j** : pertes pannes de la machine **j** ;
- TP_j** : taux de panne prévisionnel pour la machine **j** ;
- PB_j** : potentiel brut de la machine **j**.

Les pertes pannes du pool **j** sont obtenues en sommant celles de ses machines.

- Les pertes réglages sont calculées comme suit :

$$PR_j = \sum_{i=1}^M TR_{ji} \times CL_i \text{ tel que :}$$

- PR_j** : pertes réglages du pool **j** ;
- TR_{ji}** : temps de réglage d'une machine du pool **j** pour la fabrication d'un lot de pièces de type **i** ;
- CL_i** : le nombre annuel de lancement pour la pièce **i**.

Ainsi, après application de ces méthodes de calcul, nous avons obtenu les résultats suivants :

| Pool | Charge totale | Capacité totale | Taux (%) d'occupation |
|------|---------------|-----------------|-----------------------|
| 1 | 340.678 | 560.012 | 60.83 |
| 2 | 273.182 | 216.722 | 126.05 |
| 3 | 1.156.611 | 1.360.235 | 85.03 |
| 4 | 290.680 | 433.775 | 67.01 |
| 5 | 105.498 | 191.462 | 55.10 |
| 6 | 296.720 | 452.761 | 65.53 |
| 7 | 667.677 | 895.494 | 74.56 |
| 8 | 397.968 | 455.564 | 87.35 |
| 9 | 856.320 | 871.130 | 98.30 |
| 10 | 498.890 | 422.360 | 118.12 |
| 11 | 788.470 | 894.967 | 88.21 |
| 12 | 670.292 | 735.026 | 91.20 |
| 13 | 970.422 | 1.020.644 | 95.08 |
| 14 | 174.634 | 179.072 | 82.44 |
| 15 | 378.452 | 433.775 | 87.24 |
| 16 | 8.374 | 231.072 | 3.62 |
| 17 | 52.090 | 221.014 | 23.56 |
| 18 | 93.150 | 154.234 | 60.39 |
| 19 | 5.440 | 231.072 | 2.35 |
| 20 | 15.042 | 220.072 | 6.80 |

figure 34 : les données sur les charges et les capacités des pools.

Ces résultats montrent l'ampleur du problème de charge dont souffre l'atelier "ferrures", en effet après identification de ces taux pour les différentes machines nous avons remarqué que sur 46 machines 29 présentent un taux > 80%.

2- Présentation de l'outil de résolution :

Les algorithmes de distribution et des gammes variantes ont fait l'objet chacun d'un programme informatique ; ces programmes sont réalisés avec le langage de programmation Turbo Pascal version 7.0.

a)- Présentation du programme de distribution :

Le programme principal fait appel aux procédures suivantes :

1- procédure de lecture des données :

Cette procédure nous permet de lire les données contenues dans les fichiers "séquence", "charge", "classe" et "quantité" relatifs aux matrices "S", "CH" et aux vecteurs "CL", "Q" consécutivement.

2- procédure pour la détermination de la matrice "CTT" et celle des charges "CHA" :

Il est à rappeler que pour le calcul des contributions et des charges, on fixe un pool distribuable et une position d'insertion notés L et K consécutivement, puis on fait passer toutes les séquences pour le calcul de $CTT_{k,l}$ et $CHA_{k,l}$.

3- Procédure pour la vérification de l'adéquation charge/capacité :

Cette procédure repère l'élément le plus grand de la matrice CTT, et vérifie si la charge correspondante à cet élément est adéquate ou pas.

4- Procédure de réaffectation des produits :

Cette procédure est utilisée lorsque le test de l'adéquation charge/capacité est vérifié pour un élément de la matrice CTT ; c.à.d lorsqu'on prend la décision de distribuer une ou plusieurs machines d'un pool distribuable dans une position d'insertion donnée. En effet cette procédure recherche les séquences dont certains retours ont été éliminés par cette nouvelle distribution, et réaffecte les opérations de ces séquences, affectées initialement au pool distribuable, au nouveau pool noté "N+1".

5- Procédure d'initialisation :

Cette procédure réinitialise la ligne obtenue après distribution d'un pool.

b)- Présentation du programme des gammes variantes :

En plus de la procédure de lecture, le programme principal fait appel aux procédures suivantes :

1- Procédure des gammes variantes :

Cette procédure vérifie pour chaque produit possédant une ou plusieurs gammes variantes, la possibilité d'éliminer certains retours en utilisant ces gammes ; dans le cas affirmatif, elle retient la gamme variante présentant le moins de retours en arrière.

2- Procédure adéquation charge/capacité :

Cette procédure est utilisée dans le cas où la procédure des gammes variantes retient une nouvelle gamme pour un produit i , elle vérifie si la nouvelle charge du pool destinataire obtenue en ajoutant la charge que présente le produit i sur ce pool à la charge initiale de ce dernier, est adéquate ou pas ; de même pour le pool originaire dont la nouvelle charge est obtenue en soustrayant la charge que présente le produit i , de la charge initiale de ce pool.

Remarque : Afin d'alléger ces programmes, nous les avons organisés en différentes unités.

3- Résultats et interprétations :

Ayant programmé les algorithmes de distribution et des gammes variantes ; nous avons exécuté les programmes correspondant pour différentes valeurs de MG (voir chapitre 3 page 39) ; les résultats obtenus sont consignés dans le tableau suivant :

| MG | 0 | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 1 |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| Nbre de retours éliminés par la distribution | 971 | 1.006 | 1.103 | 1.215 | 1.254 |
| Nbre de retours éliminés par les gammes variantes | 51 | 29 | 51 | 29 | 34 |
| Total des retours éliminés | 1.022 | 1.035 | 1.154 | 1.244 | 1.288 |
| Nbre de pools créés | 14 | 15 | 18 | 22 | 25 |

figure 35 : résultats obtenus pour différentes valeurs de MG.

A partir de ces résultats, nous pouvons faire certaines remarques à savoir :

a)- le nombre de retours en arrière éliminés par la distribution est proportionnel à MG ; ceci est dû à l'évolution similaire du nombre de pools distribués.

b)- le nombre de retours en arrière éliminés par l'application des gammes variantes est faible par rapport à celui obtenu par la distribution, cela peut être expliqué par les raisons suivantes :

- un nombre important de retours en arrière a été éliminé par l'algorithme de distribution,
- les produits présentant des retours en arrière après distribution ont un nombre réduit de gammes variantes.

c)- l'évolution du nombre total des retours en arrière éliminés a tendance à se stabiliser au-delà de $MG=0.3$, car un nombre important de pools a été déjà distribué (22 sur 26 possibles).

Pour les valeurs de $MG > 0.3$, il ne nous a pas été possible de vérifier l'adéquation charge/capacité pour tous les pools notamment pour les pools 3,11,8,15,1. Ainsi nous avons retenu la solution correspondante à $MG=0.2$ pour laquelle nous avons pu résoudre le problème d'adéquation. La solution se présente comme suit :

| Position dans la ligne | Le pool correspondant | Le nombre de machines | Taux (%) d'occupation | Notation |
|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------|
| 1 | 13 | 1 | 81.00 | 23 |
| 2 | 2 | 1 | 126.05 | 2 |
| 3 | 15 | 2 | 87.24 | 15 |
| 4 | 12 | 1 | 112.00 | 12 |
| 5 | 6 | 2 | 92.50 | 6 |
| 6 | 11 | 1 | 105.00 | 24 |
| 7 | 9 | 1 | 84.60 | 25 |
| 8 | 3 | 1 | 65.00 | 27 |
| 9 | 1 | 2 | 70.00 | 1 |
| 10 | 7 | 1 | 2.35 | 34 |
| 11 | 19 | 1 | 3.62 | 19 |
| 12 | 16 | 1 | 6.80 | 16 |
| 13 | 17 | 1 | 23.56 | 17 |

| | | | | |
|----|----|---|--------|----|
| 14 | 20 | 1 | 6.80 | 20 |
| 15 | 10 | 1 | 110.00 | 35 |
| 16 | 13 | 1 | 138.00 | 13 |
| 17 | 4 | 1 | 67.17 | 4 |
| 18 | 5 | 1 | 55.10 | 5 |
| 19 | 8 | 2 | 86.56 | 8 |
| 20 | 12 | 1 | 81.00 | 28 |
| 21 | 3 | 4 | 86.70 | 3 |
| 22 | 9 | 1 | 101.00 | 38 |
| 23 | 18 | 1 | 60.39 | 18 |
| 24 | 9 | 1 | 86.00 | 9 |
| 25 | 12 | 1 | 81.00 | 21 |
| 26 | 10 | 1 | 126.24 | 10 |
| 27 | 13 | 1 | 80.63 | 33 |
| 28 | 7 | 1 | 74.50 | 37 |
| 29 | 11 | 2 | 84.75 | 11 |
| 30 | 7 | 1 | 76.74 | 7 |
| 31 | 1 | 1 | 52.30 | 22 |
| 32 | 13 | 1 | 80.50 | 26 |
| 33 | 3 | 1 | 86.20 | 30 |
| 34 | 14 | 1 | 82.44 | 14 |
| 35 | 11 | 1 | 90.00 | 29 |
| 36 | 9 | 1 | 100.00 | 31 |
| 37 | 4 | 1 | 67.00 | 32 |
| 38 | 7 | 1 | 77.00 | 36 |

figure 36 : les données sur la ligne opérationnelle obtenue.

Il est à remarquer que les pools 7, 9, 13 ont été distribués trois fois ; à cause des retours important générés par ces pools et à l'importance des charges relatives aux séquences contenant une seule opération (545.907, 380.764, 410.514) ; les séquences définitives contenant plus de deux opérations sont représentées dans l'annexe H.

La configuration du flux de la ligne opérationnelle est la suivante :

| | Retours | Sauts | P. successifs | Total |
|-----------|---------|-------|---------------|-------|
| Nombre | 570 | 4987 | 766 | 6323 |
| % / total | 9.00 | 78.87 | 12.13 | 100 |

figure 37 : la configuration du flux de la ligne opérationnelle.

Nous avons donc éliminés 1724-570 des retours en arrière existant soit 66.93% des retours en arrière de la ligne fonctionnelle

Conclusion :

A ce stade, l'étude consistait à déterminer une ligne opérationnelle pour l'atelier " ferrures" ; cette dernière génère un taux de retours en arrière de 9% du flux total, ce qui signifie que pour cent échanges entre machines nous avons seulement 9 échanges s'effectuant en arrière, ce qui constitue un résultat satisfaisant. Ce résultat peut être justifié par :

- l'existence d'un nombre important de séquences à une seule opération d'usinage absorbant en même temps des charges importantes sur chaque pool ;
- l'étude rigoureuse des caractéristiques techniques des machines, menée en étroite collaboration avec les responsables de l'atelier "ferrures" et ceux du bureau méthodes.

Toutefois, le taux de retours en arrière peut être diminué par une étude approfondie visant à dégager de nouvelles gammes variantes.

2.2.2 Décomposition en sous-lignes de production :

Il est important de rappeler que le but principal de cette démarche de résolution est de répondre à la possibilité de mise en ligne de l'atelier "ferrures". Les résultats obtenus s'avèrent intéressants ; en effet, la ligne opérationnelle obtenue génère des retours en arrière qui représentent seulement 9% du flux total. Ce résultat peut contribuer considérablement à la maîtrise des délais de fabrication. La décomposition de la ligne opérationnelle en sous-lignes de production constitue la deuxième et dernière étape de l'enchaînement retenu ; le but à atteindre par cette décomposition est de détecter les sous-lignes de production qui sont indépendantes les unes des autres.

Comme nous l'avons déjà mentionné précédemment, la décomposition présente des avantages considérables dans la gestion de l'atelier et permet aussi dans le cas où la ligne opérationnelle présente un nombre important de retours en arrière d'extraire d'éventuelles sous-lignes qui répondent à l'objectif recherché (minimisation des retours en arrière).

Pour l'application sur l'atelier "ferrures", nous avons calculé toutes les coupes possibles (Voir annexe G) et nous avons retenu la coupe 29 entre le pool 11 et le pool 7 dont les caractéristiques sont les suivantes :

- le nombre d'échanges entre sous-lignes est de 1205 soit 19.05% du flux total ;
- le nombre de machines dans chaque sous-ligne nous semble être satisfaisant (en fait il appartient aux responsables de l'atelier de décider sur le seuil au-delà duquel une gestion distincte de la sous- ligne est envisageable).

Ainsi nous proposons en plus de la solution précédente (la ligne opérationnelle) une deuxième solution qui se présente comme suit :

| | Sous-ligne1 | Sous-ligne2 |
|---------------------------------|-------------|-------------|
| Nombre de machines | 37 | 9 |
| Nombre de retours | 441 | 0 |
| % / flux total de la sous-ligne | 8.82 | 0 |

figure 38 : résultats obtenus par la décomposition

Nous pouvons remarquer que la deuxième sous-ligne est idéale (aucuns retours en arrière) ; le nombre total de retours en arrière pour les deux sous-lignes de production est de 441 soit 6.97% du flux total.

Enfin, il est à signaler qu'à partir de cette décomposition ; nous pouvons générer d'autres solutions susceptibles de trouver l'approbation des différentes personnes concernées par la réorganisation technique de l'atelier.

CONCLUSION

CONCLUSION :

La maîtrise des délais de production constitue l'une des préoccupations primordiales de tout système évoluant dans un contexte versatile. On considère que pour rendre un atelier plus réactif, la diminution des stocks, l'augmentation du niveau de qualité et l'optimisation des flux ne font que contribuer à la diminution des délais de production. C'est dans ce cadre que s'insère la réorganisation d'ateliers en mettant en oeuvre différentes formes de flux de production.

Cette étude apporte un ensemble d'éléments nouveaux dans ce domaine notamment dans le processus de mise en ligne des ateliers multi-produits.

L'analyse des différentes structures organisationnelles des ateliers, nous a permis de mettre en évidence l'importance des formes de flux en ligne dans la maîtrise des délais de production.

A partir de l'objectif tracé qui est la recherche d'une approche de résolution pour la mise en ligne du flux de production, nous avons orienté notre travail vers l'étude des différents concepts de l'analyse statique du flux. Nous avons opté par la suite pour une démarche de résolution qui consiste à agencer les moyens de production ensuite de procéder à une décomposition de la ligne obtenue.

L'enchaînement agencement - décomposition, nous permet de répondre à la possibilité de mise en ligne totale de l'atelier et de détecter les sous-lignes indépendantes les unes des autres.

Dans le cas où la décomposition n'est pas possible pour une ligne opérationnelle non satisfaisante ; nous pouvons orienter notre réflexion vers l'implantation hybride, en réseau ou en îlots virtuels.

Nous avons élaboré une approche de résolution basée sur une modélisation mathématique, cette modélisation pourra faire l'objet d'un développement ceci en intégrant de nouvelles contraintes telles les contraintes d'adjacences ou de non adjacences des machines.

Nous avons testé et résolu notre modèle pour l'atelier "ferrures" avec une taille de 16 pools. Cependant ce modèle peut être résolu pour des tailles supérieures ceci en moyennant des outils informatiques plus puissants.

Pour l'amélioration de la configuration du flux de la ligne fonctionnelle, nous avons proposé deux algorithmes. Notre souci lors de l'établissement de ces algorithmes a été de proposer des heuristiques qui peuvent être incorporées sans peine dans des programmes informatiques.

Il est à noter qu'un raffinement de la solution obtenue est possible en tenant en compte non pas d'une seule réaffectation mais d'une double réaffectations lors de l'application des gammes variantes.

L'application de notre approche de résolution sur un cas industriel ("atelier ferrures") a permis d'obtenir des résultats satisfaisants. Toutefois cette étude ne constitue réellement qu'une première étape du processus de réorganisation de l'atelier "ferrures", nous suggérons pour la suite de ce travail:

- d'étudier les solutions générées par les différentes coupes de la deuxième phase de notre approche ;
- de procéder à une évaluation par une analyse dynamique des différentes solutions proposées.

Cependant, seule une étude économique nous confirmera la pertinence des solutions proposées.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Norme française " concepts fondamentaux de la gestion de production"
AFNOR 1991

Ouvrages :

- [2] Brooke A, Kendrick D, Meeraus "GAMS a user's guider "
the scientific press, 1987
- [3] Cantegreil " Les treize points clés de la production"
BORDAS, Paris 1986
- [4] Delfosse N. "Organisation industrielle" volume 2 " les implantations et les
manutentions" Entreprise moderne d'édition
- [5] Greif M, Baglin G, Bruel O, Garreau A "Management industriel et logistique"
Edition, Economica 1990
- [6] Lawler E.L, Lenstra J.K, Rinnooykan A.H " The Travelling Salesman Problèm"
J.WILEY and SONS 1985
- [7] Syslo M, Narsingh DEO, Kowalik J.S "Discrete Optimisation Algorithms"
Prentice-HALL, INC.Englewood Cliffs, New Jersey 07632, 1983
- [8] Tompkins J.A, White J.A " Facilities Planning"
J.WILEY and SONS, INC, 1984

Thésés :

- [9] Allam M, Laribi A " Optimisation des accès au réseau de transmission de données DZ
PAC " P.F.E soutenu à l'ENP d'Alger Juin 1994
- [10] Barth M " Contribution méthodologique à la réorganisation des ateliers de production
mécanique"
Thèse de doctorat de l'UFR en génie des systèmes industriels de l'institut Normal
Polytechnique de Lorraine dec 1991
- [11] DE Guio "Contribution à l'organisation d'ateliers en îlots de fabrication"
Thèse de doctorat soutenue à l'université Louis Pasteur de Strasbourg 1991
- [12] Kerboua "Mise en ligne de flux de l'atelier ferrures"
Thèse Magistère soutenue à l'école nationale Politechnique d'Alger 1992
- [13] Menia F, Berrached " Mise en ligne du flux de production dans l'atelier ferrures"
P.F.E soutenu à l'ENP d'Alger Juin 1988
- [14] Mokhtari S, Tiabi M "Contribution à la réorganisation de l'atelier ferrures en îlots de
fabrication" P.F.E soutenu à l'ENP d'Alger Juin 1994

- [15] SARI M " Investigation des modèles à coûts unitaire variables dans le cas d'un système de distribution à dépôt unique ou à plusieurs dépôts "
Thèse Magistère soutenue à l'école nationale Polytechnique d'Alger 1990

Publications :

- [16] Chen C.Y, Irani S.A "Cluster first-sequence last heuristics for generating block diagonal forms for a machine-part matrix" vol.31, no.11, 2623-2647, 1993
- [17] Irani S.A, Cavalier T.M, Cohen P.H "Virtual manufacturing cells : exploiting layout design and intercell flows for the machine sharing problem" vol.31, no.4, 791-810, 1993
- [18] Marcotorchino F "Une approche unifiée des problèmes de décomposition en production" centre scientifique IBM Paris
- [19] NAIQI W , Salvendy G "A modified network approach for the design of cellular manufacturing systems" vol.31, no.6, 1409-1421, 1993
- [20] Song S, Hitomi K "GT cell formation for minimising the intercell parts flow" vol.30, no.12, 2737-2753, 1992
- [21] Souilah A "La séquence globale minimale"
Rapport de recherche no.1328 de l'unité de recherche de l'INRIA Lorraine octobre 1990
- [22] Wainwright C.E.R, Harrison D.K, Leonard R
"Production control strategies within multi-product batch manufacturing companies"
vol.31, no.2, 365-380, 1993
- [23] Ho Y.C, Lee C.G , Moodie L.C
"Two sequence pattern, matching-based, flow analysis methods for multi-flowlines layout design" vol.31, no.7, 1557-1578, 1993

ANNEXES

ANNEXE A : Glossaire

ANNEXE B : Données sur les machines

B1 : Listes des machines

B2 : Caractéristiques techniques

B3 : Les gammes variantes

ANNEXE C : Données sur les pièces

C1 : Liste des pièces

C2 : Les Séquences, Classes, Temps alloués Ch, Quantités

C3 : Les charges relatives aux séquences d'une seule opération CH1

ANNEXE D : La carte de flux

ANNEXE E : Présentation du logiciel GAMS

E1 : Les solvers correspondants aux différents problèmes

E2 : Structure d'un programme GAMS

ANNEXE F : Programme GAMS et résultats

F1 : Programme GAMS

F2 : La ligne fonctionnelle obtenue

ANNEXE G : Les différentes coupes possibles

ANNEXE H : Les séquences définitives et les sous-lignes correspondantes

GLOSSAIRE

- **Attente** : se produit à chaque fois que le produit, la personne sont immobilisés et ne passent pas immédiatement à l'activité suivante.
- **Capacité d'un moyen de production** : quantité d'unités d'oeuvre susceptibles d'être réalisées par un moyen de production dans une période déterminée, la capacité disponible d'un moyen correspond à la capacité non encore affectée à une tâche précise pour la période considérée.
- **Charge d'un moyen de production** : quantité d'unités d'oeuvre correspondant à une demande que l'on décide de réaliser sur un moyen de production donné.
- **Circulation du personnel** : c'est l'ensemble des types de déplacements des personnes travaillant sur le site de production, ils comportent les déplacements entre poste de production amont et aval lors de la manutention, entre zone de stockage de l'outillage et le poste de charge concerné, entre les magasins de stockage des produits et les postes de charges.
- **Conditions de travail** : l'hygiène, la sécurité et plus largement l'érgonomie des postes de charges.
- **Contrôle** : l'activité qui vérifie un ou plusieurs produits pour identification, en qualité, en quantité ou qui s'assure qu'une autre activité a été exécutée correctement.
- **Coûts de manutention** : somme des coûts dépensés pour assurer le transport des produits, outillages et tous les intervenants du site de production.
- **Cycle de production** : temps total s'écoulant entre la sortie matière d'un magasin et l'entrée en magasin du produit fini ; plus simplement, c'est le temps de séjour du produit sur le site de production, il comprend les temps de fabrication, de contrôle, de transport et les temps de files d'attente.
- **Distances de manutentions** : les distances parcourues par les produits entre les machines, par les outillages de leur lieu de stockage à leur lieu d'utilisation, les distances entre les ateliers amont et aval.
- **Effectif de production** : c'est le nombre de personnes affectés au site de production et plus particulièrement les opérateurs, les régleurs qui participent directement à la valeur ajoutée.

- **En-cours**: les pièces en attente entre les postes d'opérations ou de contrôle.
- **Flexibilité** : aptitude d'un système de production à s'adapter, dans un temps déterminé, à une diversité de produits ou de tâches.
- **Flux** : un flux correspondant à une relation entre une origine et une destination, il traduit un mouvement.
- **Gamme de production d'un produit** : énumération de la succession des actions et autres événements nécessaires à la réalisation d'un produit.
- **Implantation** : la disposition rationnelle permanente des matériels sur le terrain. L'implantation des machines d'un atelier fixe la localisation de chaque machine par rapport aux autres.
- **Lancement** : ensemble des actions consistant à différer au service de réalisation, les données relatives aux ordres à exécuter.
- **Lot** : quantité de pièces concernées par une même action ou un même ensemble d'actions (opération ou transfert) dans un moment donné.
- **Moyens de production** : on entend par les moyens de production, les machines que l'entreprise dispose pour produire.
- **Opération** : l'activité qui modifie une ou plusieurs caractéristiques du produit.
- **ordonnancement** : la fonction qui consiste à déterminer l'ordre de passage des différents produits sur les machines.
- **Pilotage de l'atelier** : système de gestion utilisé dans l'atelier permettant de gérer les flux de production .
- **Poste de charge** : unité opérationnelle de base que l'entreprise a décidé de gérer, un poste de charge peut résulter de la combinaison de machines, opérateurs, régleur..., associés dans le but de réaliser une opération de production déterminée.
- **Poste de travail** : emplacement définit sur lequel un ou plusieurs ouvriers exécutent un travail, avec ou sans machines.

- **Processus** : la chronologie opératoire de production : transformation, contrôle, transport et stockage.
- **Produit** : l'ensemble des produits transformés sur le site de production, il s'agit des matières premières, des sous-ensembles, des produits finis.
- **Rebut** : dans un processus de production, produit rejeté au cours d'opérations de fabrication, de transfert ou de stockage pour cause de non qualité.
- **situation de l'en-cours** : lieu de stockage des produits au cours de leur transformation sur le site de production. Il s'agit des en-cours et de la position des produits devant le poste de transformation.
- **Suivi de production** : ensemble d'opérations de mesure, de contrôle et de traitement des informations réalisées dans le but d'obtenir une connaissance utile de l'état d'exécution des ordres de fabrications et de l'accomplissement des tâches.
- **Taux d'aléas de production** : le nombre d'heures d'arrêts de production diverses tel que panne, rebuts, absentéisme, défauts d'approvisionnement du poste.
- **Taux d'occupation** : caractérisé par le rapport entre la charge d'un poste pour un horizon de planification donné, sur la capacité du poste sur le même horizon.
- **Temps alloué** : temps attribué à un moyen de production pour la réalisation d'une opération ; il est généralement porté sur la gamme, il est en général supérieur au temps d'exécution, c'est souvent une durée conventionnelle qui sert à la mesure du rendement, à l'établissement de la paie, au calcul des coûts de revient standard, à la planification de charge en personnel et en machines.
- **Temps d'attente** : interval de temps pendant lequel un lot d'articles attend d'être pris en charge pour subir une opération ou un transfert.
- **Temps de fabrication** : durée nécessaire aux opérations de fabrication d'un lot d'articles sur un poste de travail. Ce temps est obtenu en multipliant le temps unitaire de fabrication par la quantité d'articles du lot.

- **Temps opératoire** : somme du temps de préparation d'un poste de travail et du temps de fabrication d'un lot d'articles sur ce poste.

- **Temps de préparation** : temps nécessaire à la préparation d'un poste de travail en vue de la production d'une série d'articles différents de ceux produits sur ce même poste, ce temps concerne l'installation d'un outillage et son réglage, le nettoyage d'une machine en vue d'un changement de coloris....

- **Temps de transfert** : temps total nécessaire pour réaliser le changement de localisation d'un lot d'articles.

Le code des différentes machines et les pools correspondants :

| Nouveau code pool | Matricule SONACOME | Désignation | Nouveau code pool | Matricule SONACOME | Désignation |
|-------------------|--|--|-------------------|---|---|
| P1 (3) | C006251 C006401 C008101 | Tour // a-m-c p240 " " " " " " Gazeneuve | P11(4) | C006271 C006281 C011071 C0098611 | Perceuse GSP 25 " " " " " " " " " " " " |
| P2 (1) | C009601 | Tour vle Graffenstaden | P12(3) | C003151 C006321 C008781 | Fraiseuse forest V " Rouchaud Fv80 " " " |
| P3 (6) | C000721 C007641 C011091 C008631 C011101 C003111 | Perceuse GSP 405 K150 " | P13(4) | C006341 C009731 C006331 C006351 | " Rouch aud fh80 " " " " " " " " " " " " |
| P4(2) | C008111 C011111 | Perceuse GSP rie407q17 " " " " | P14(1) | C003261 | Fraiseuse à levier FH 40 |
| P5(1) | C008121 | Fraiseuse unv GAMBIN | P15(2) | C003531 C003131 | " Forest h500do " " " " |
| P6(2) | C003161 C015951 | Perceuse trosseille " " | P16(1) | C006361 | Touret mape meule huard |
| P7(4) | C0063301 C0103411 C007771 C0097721 | Perceuse R ochelet 4 Br " " 4 Br " " 2 Br " " 3 Br | P17(1) | C015141 | Fraiseuse almo FH80 |
| P8(2) | C006261 C0011061 | Perceuse GSP 2407s " " | P18(1) | C3141 | Fraiseuse aleseuse CNC Wotan |
| P9(4) | C006291 C011081 C009801 C000931 | Perceuse GSP 250R " " " " " " " " " | P19(1) | C006371 | Machine à dresser |
| P10 (2) | C003251 C003241 | Perceuse GSP 25RB " " " | P20(1) | C030111 | Fraiseuse almo FV 80 |

CARACTERISTIQUES TECHNIQUES

Pool 1 : Ces tours étaient auparavant universels ; ils sont devenus par la suite des machines de production, ce qui a augmenté leurs taux d'occupation.

Pool 2 : Ce tour est spécialisé dans la fabrication des pièces qui nécessitent une très grande précision concernant les dimensions de leurs côtes.

Pool 3 : Son chariot porte-fôret peut faire une rotation ainsi qu'une translation autour de la table. Cette caractéristique technique lui permet d'effectuer plusieurs opérations de perçage en même temps (plusieurs trous à la fois) et dans des plans différents.

Pool 4 : Ce pool possède les mêmes caractéristiques que le pool 3 sauf qu'il est spécialisé dans l'usinage de pièces de grande taille (peut usiner les autres pièces).

Pool 5 : Le caractère universel de cette fraiseuse l'a rendu peu utilisée ; en effet, elle est équipée d'une tête et d'une table se déplaçant dans n'importe quelle direction.

Pool 6 : Ce pool est constitué de deux perceuses trosseille identiques.

Pool 7 : Ces perceuses multi-broches peuvent effectuer plusieurs opérations de perçage mais dans un même plan horizontal car le fôret (outil de coupe) ne change pas de position.

Pool 8 : Ces perceuses sont destinées pour le perçage des pièces de grande forme, elles sont équipées d'une table à mouvements fixes et effectuent des perçages simples (un seul trou par pièce).

Pool 9 : Elles sont équipées d'une table à mouvements croisés (opération moins rapide que celle effectuée sur le pool 8).

Pool 10 : Même chose que pour le pool 9 , sauf que ces perceuses sont destinées à l'usinage des pièces de grande forme.

Pool 11 : Même chose que pour le pool 8, sauf que l'usinage sur ces perceuses n'est pas restreint aux pièces de grande forme.

Pool 13 : C'est des fraiseuses semi-automatiques c.à.d une fois le réglage de l'outil effectué par l'opérateur, ce dernier n'intervient qu'après la fin de l'opération.

Pool 14 : C'est une petite fraiseuse spécialisée dans l'opération de sciage mécanique à l'aide d'une fraise de petite épaisseur , elle peut éventuellement faire des petites renures pour n'importe quel type de pièces.

Pool 15 : C'est des fraiseuses semi-automatiques.

Pool 16 : Petite meule spécialisée dans la préparation de l'état de surface (opération de surfacage).

Pool 17 , 20 : Ces fraiseuses ne sont pas réellement des machines de production, elles sont caractérisées par un taux de panne assez élevé, ce qui rend leur utilisation très restreinte.

Pool 18 : C'est un centre d'usinage destiné seulement pour l'usinage des ferrures "pivots" ; l'usinage de ces pièces nécessite une charge considérable sur la machine.

Pool 19 : Cette machine est spécialisée dans l'opération de dressage-face , elle est équipée d'une grande meule positionnée horizontalement.

LES GAMMES VARIANTES

- le pool 15 peut effectuer le même type d'usinage que le pool 12 (la réciproque est fausse) ;
- le pool 3 peut effectuer le même type d'usinage que les pools 8, 9, 10, 11 (la réciproque est fausse);
- le pool 4 peut effectuer le même type d'usinage que les pools 3, 8, 9, 10 et 11 (la réciproque est fausse) ;
- le pool 5 effectue le même type d'usinage que les pools 17 et 20 (la réciproque est fausse).

Liste des pièces

Le code SONACOME de toutes les pièces fabriquées à l'atelier "ferrures", dont les séquences présentent plus de deux opérations.

| | | | | | | | |
|----|--------|----|--------|-----|--------|-----|---------|
| 1 | 163488 | 36 | 599591 | 71 | 699830 | 106 | 737825 |
| 2 | 163569 | 37 | 599669 | 72 | 699839 | 107 | 738888 |
| 3 | 163600 | 38 | 617458 | 73 | 703637 | 108 | 738972 |
| 4 | 163631 | 39 | 617526 | 74 | 707215 | 109 | 742316 |
| 5 | 164973 | 40 | 662441 | 75 | 707261 | 110 | 742317 |
| 6 | 173134 | 41 | 672110 | 76 | 707429 | 111 | 744104 |
| 7 | 190851 | 42 | 672112 | 77 | 707430 | 112 | 744237 |
| 8 | 191445 | 43 | 672184 | 78 | 707588 | 113 | 744384 |
| 9 | 191446 | 44 | 672186 | 79 | 707789 | 114 | 744391 |
| 10 | 192773 | 45 | 672620 | 80 | 707790 | 115 | 744395 |
| 11 | 241665 | 46 | 672707 | 81 | 707811 | 116 | 744397 |
| 12 | 408542 | 47 | 672708 | 82 | 714914 | 117 | 744398 |
| 13 | 444899 | 48 | 672733 | 83 | 714915 | 118 | 744503 |
| 14 | 482156 | 49 | 672787 | 84 | 715500 | 119 | 744566 |
| 15 | 482176 | 50 | 672788 | 85 | 720098 | 120 | 744571 |
| 16 | 485521 | 51 | 673809 | 86 | 720107 | 121 | 744609 |
| 17 | 487655 | 52 | 680420 | 87 | 720108 | 122 | 744714 |
| 18 | 499671 | 53 | 680421 | 88 | 720109 | 123 | 748913 |
| 19 | 551715 | 54 | 691963 | 89 | 720369 | 124 | 748914 |
| 20 | 551723 | 55 | 694190 | 90 | 720454 | 125 | 748916 |
| 21 | 551734 | 56 | 694191 | 91 | 720456 | 126 | 750874 |
| 22 | 551743 | 57 | 696102 | 92 | 720919 | 127 | 751647 |
| 23 | 551745 | 58 | 696718 | 93 | 720966 | 128 | 751648 |
| 24 | 551754 | 59 | 699055 | 94 | 723129 | 129 | 751993 |
| 25 | 551755 | 60 | 699056 | 95 | 723805 | 130 | 758029 |
| 26 | 551777 | 61 | 699101 | 96 | 729456 | 131 | 758184 |
| 27 | 551780 | 62 | 699102 | 97 | 729970 | 132 | 758417 |
| 28 | 551804 | 63 | 699103 | 98 | 731005 | 133 | 758554 |
| 29 | 551889 | 64 | 699104 | 99 | 731029 | 134 | 758604 |
| 30 | 599388 | 65 | 699165 | 100 | 731779 | 135 | 765952 |
| 31 | 599389 | 66 | 699174 | 101 | 735382 | 136 | 780008 |
| 32 | 599390 | 67 | 699227 | 102 | 735720 | 137 | 784114 |
| 33 | 599418 | 68 | 699228 | 103 | 737724 | 138 | 786701 |
| 34 | 599444 | 69 | 699497 | 104 | 737728 | 139 | 790750 |
| 35 | 599452 | 70 | 699645 | 105 | 732017 | 140 | 1089038 |

| | | | | | | | |
|-----|---------|-----|---------|-----|---------|-----|--------------|
| 141 | 1089921 | 173 | 1142513 | 205 | 5003028 | 237 | 9201339 |
| 142 | 1089945 | 174 | 1143205 | 206 | 5003029 | 238 | 9360271 |
| 143 | 1090293 | 175 | 1143293 | 207 | 5003047 | 239 | 9360272 |
| 144 | 1090294 | 176 | 117332 | 208 | 5003068 | 240 | 361142875 |
| 145 | 1090439 | 177 | 1143683 | 209 | 5003070 | 241 | 3694922730 |
| 146 | 1140420 | 178 | 1144809 | 210 | 5003086 | 242 | 36949682043 |
| 147 | 1140452 | 179 | 1144999 | 211 | 5003107 | 243 | 369727579 |
| 148 | 1140675 | 180 | 1145283 | 212 | 5003108 | 244 | 5000653695 |
| 149 | 1140678 | 181 | 1145378 | 213 | 5003109 | 245 | 5000654855 |
| 150 | 1140680 | 182 | 1146291 | 214 | 5003122 | 246 | 500065654856 |
| 151 | 1140719 | 183 | 1146310 | 215 | 5010001 | 247 | 5000654917 |
| 152 | 1140737 | 184 | 1147196 | 216 | 5010016 | 248 | 5000654918 |
| 153 | 1140778 | 185 | 1147338 | 217 | 5010017 | 249 | 5000655213 |
| 154 | 1141059 | 186 | 1147618 | 218 | 5010024 | 250 | 5000704197 |
| 155 | 1141060 | 187 | 1147784 | 219 | 5010029 | 251 | 5000704229 |
| 156 | 1141083 | 188 | 1148192 | 220 | 5010031 | 252 | 5000704235 |
| 157 | 1141328 | 189 | 1148901 | 221 | 5010032 | 253 | 5000704837 |
| 158 | 1141337 | 190 | 1148902 | 222 | 5010053 | 254 | 5000748855 |
| 159 | 1141447 | 191 | 1149329 | 223 | 5010054 | 255 | 5000748856 |
| 160 | 1141448 | 192 | 1149754 | 224 | 5010057 | 256 | 5000761390 |
| 161 | 1141449 | 193 | 1149906 | 225 | 5010066 | 257 | 5000761391 |
| 162 | 1141450 | 194 | 1150531 | 226 | 5010071 | 258 | 5000782072 |
| 163 | 1141538 | 195 | 1150541 | 227 | 5010130 | 259 | 5000782073 |
| 164 | 1141539 | 196 | 1150992 | 228 | 5010288 | 260 | 5003128 |
| 165 | 1141540 | 197 | 1151062 | 229 | 5010306 | 261 | 5003125 |
| 166 | 1141614 | 198 | 1151063 | 230 | 5010318 | 262 | 1147261 |
| 167 | 1141744 | 199 | 1152388 | 231 | 5010514 | 263 | 1151060 |
| 168 | 1141960 | 200 | 1152389 | 232 | 5010594 | 264 | 1147281 |
| 169 | 1142025 | 201 | 1153328 | 233 | 5010595 | 265 | 694320 |
| 170 | 1142042 | 202 | 5003007 | 234 | 5010644 | 266 | 744213 |
| 171 | 1142070 | 203 | 5003025 | 235 | 5010991 | 267 | 744215 |
| 172 | 1142159 | 204 | 5003027 | 236 | 5010992 | 268 | 5010635 |
| 269 | 1141451 | 271 | 1143469 | 272 | 1150303 | 270 | 5000704115 |

Les séquences , classes, temps alloués et quantités des pièces

- P1** S:-12-9-7-11-7; CL=6; CH:-1.75-2.30-1.10-2.20-0.80; Q=380;
P2 S:-11-7; CL=11; CH:-8.69-1.00; Q=1470;
P3 S:-9-10; CL=6; CH:-2.85-1.60; Q=1470;
P4 S:-12-9-1-9; CL=6; CH:-2.00-2.10-4.90-4.50; Q=1630;
P5 S:-11-7; CL=11; CH:-8.69-1.00; Q=1800;
P6 S:-11-13-1; CL=6; CH:-2.95-2.10-0.85; Q=4200;
P7 S:-13-8-9-13; CL=6; CH:-1.25-6.25-4.50-2.50; Q=1000;
P8 S:-2-9-10-8; CL=11; CH:-5.40-11.90-1.30-7.50; Q=180;
P9 S:-2-9-10-8; CL=11; CH:-5.40-11.90-1.30-7.50; Q=180;
P10 S:-2-9-8-11-7-9; CL=11; CH:-4.00-13.00-5.50-1.20-2.20-1.80; Q=180;
P11 S:-11-7-13; CL=6; CH:-1.60-0.30-0.70; Q=850;
P12 S:-9-11; CL=11; CH:-14.50-4.30; Q=1200;
P13 S:-11-9; CL=11; CH:-0.80-4.05; Q=1200;
P14 S:-9-8; CL=11; CH:-5.25-2.80; Q=3260;
P15 S:-9-7; CL=6; CH:-2.50-1.50; Q=500;
P16 S:-9-13-3-12-11; CL=11; CH:-3.80-4.00-18.50-3.80-0.80; Q=250;
P17 S:-16-3-13-8-10; CL=11; CH:-1.50-10.00-1.95-5.00-1.80; Q=500;
P18 S:-11-1; CL=6; CH:-3.30-2.50; Q=630;
P19 S:-12-3-8; CL=6; CH:-4.00-3.00-11.00; Q=360;
P20 S:-12-3-7-8-9; CL=6; CH:-5.20-3.00-1.00-6.00-3.00; Q=180;
P21 S:-13-3-9-13-3-11-14; CL=11; CH:-6.10-3.50-1.20-2.80-7.40-0.80-0.80; Q=360;
P22 S:-12-6-10-13-9-1; CL=11; CH:-2.90-2.60-1.50-4.60-4.05-2.10; Q=720;
P23 S:-15-3; CL=11; CH:-15.00-53.90; Q=360;
P24 S:-12-9-11; CL=11; CH:-2.50-7.90-6.00; Q=360;
P25 S:-15-3-12-11-9; CL=6; CH:-10.00-7.50-3.00-4.00-12.50; Q=180;
P26 S:-3-1; CL=11; CH:-29.80-6.00; Q=360;
P27 S:-1-13-17-11; CL=11; CH:-1.40-1.50-1.55-2.20; Q=1440;
P28 S:-15-3-12-11-9; CL=6; CH:-10.00-7.50-3.00-4.00-12.50; Q=180;
P29 S:-12-9-7; CL=11; CH:-2.40-2.10-1.50; Q=360;
P30 S:-12-15-6-7; CL=11; CH:-3.00-2.50-3.30-3.00; Q=720;
P31 S:-12-6-9-13-9-1; CL=11; CH:-2.50-2.60-1.50-3.80-4.20-4.50; Q=360;
P32 S:-1-9; CL=6; CH:-6.00-3.20; Q=360;
P33 S:-15-3-18; CL=11; CH:-10.50-25.00-120.00; Q=180;
P34 S:-12-9-11; CL=11; CH:-2.40-3.20-1.20; Q=720;
P35 S:-15-18; CL=11; CH:-10.50-120.00; Q=180;
P36 S:-13-11; CL=11; CH:-5.00-2.80; Q=720;
P36 S :-11-13; CL=11; CH :-2.50-2.50; Q=720;
P37 S :-12-16; CL=1; CH :-2.40-0.35; Q=100;
P38 S :-1-9; CL=11; CH :-2.30-2.85; Q=2350;
P39 S :-11-12-13; CL=11; CH :-2.15-1.30-2.05; Q=2180;
P40 S :-7-11; CL=11; CH :-2.00-2.10; Q=760;
P41 S :-13-3-11; CL=6; CH :-1.95-2.15-7.00; Q=200;
P42 S :-13-3-11; CL=6; CH :-1.95-2.15-7.00; Q=200;
P43 S :-11-1-11-7; CL=6; CH :-1.10-3.00-3.00-1.00; Q=200;
P44 S :-1-9-7-13; CL=11; CH :-4.20-2.00-0.40-3.00; Q=200;
P45 S :-19-13-11; CL=6; CH :-0.85-2.00-3.00; Q=500;
P46 S :-12-8-13-8-11; CL=6; CH :-1.00-2.30-6.20-4.60-3.20; Q=200;

- P47** S : -12-8-13-8-11; CL=6; CH : -1.00-2.30-6.20-4.60-3.20; Q=200;
P48 S : -6-13-9-3-12; CL=6; CH : -3.00-4.00-3.25-18.50-3.80; Q=200;
P49 S : -8-11; CL=6; CH : -2.95-1.00; Q=250;
P50 S : -8-11; CL=6; CH : -2.70-1.20; Q=250;
P51 S : -16-9; CL=6; CH : -0.80-2.00; Q=1000;
P52 S : -12-13; CL=11; CH : -1.10-0.90; Q=5470;
P53 S : -12-13; CL=11; CH : -1.10-0.90; Q=5470;
P54 S : -12-3-9-13-9; CL=11; CH : -2.40-9.50-2.80-4.35-5.80; Q=250;
P55 S : -12-9-11-8-11-1; CL=6; CH : -2.25-5.00-0.60-7.25-0.90-13.35; Q=500;
P56 S : -12-13-11-7; CL=11; CH : -3.15-2.00-3.70-1.20; Q=500;
P57 S : -15-3-1-3-11; CL=6; CH : -6.95-4.50-8.00-3.50-2.00; Q=250;
P58 S : -13-3-13-11; CL=11; CH : -4.50-9.90-2.50-2.50; Q=400;
P59 S : -3-9-12; CL=11; CH : -33.00-12.20-4.00; Q=250;
P60 S : -15-11-13-9; CL=6; CH : -3.80-4.65-4.00-12.60; Q=250;
P61 S : -12-5-3-5-8-3; CL=11; CH : -20.50-6.50-35.00-17.75-8.00-9.50; Q=250;
P62 S : -12-5-3-5-8-3; CL=11; CH : -20.50-6.50-35.00-17.75-8.00-9.50; Q=250;
P63 S : -13-1-9-7; CL=11; CH : -3.80-6.00-8.00-8.00; Q=250;
P64 S : -13-1-9-7; CL=11; CH : -3.80-6.00-8.00-8.00; Q=250;
P65 S : -12-11-7; CL=11; CH : -3.00-6.30-2.00; Q=500;
P66 S : -12-13-3; CL=11; CH : -16.95-2.70-8.00; Q=500;
P67 S : -12-9; CL=6; CH : -4.40-2.30; Q=500;
P68 S : -12-9; CL=6; CH : -4.40-2.30; Q=500;
P69 S : -12-1-4; CL=11; CH : -24.60-12.00-5.50; Q=250;
P70 S : -12-9-13-8; CL=6; CH : -2.00-3.40-3.30-12.80; Q=250;
P71 S : -5-7; CL=6; CH : -4.00-2.40; Q=500;
P72 S : -13-12-7-5; CL=6; CH : -2.00-1.50-10.00-10.20; Q=250;
P73 S : -13-3; CL=11; CH : -6.75-6.00; Q=500;
P74 S : -4-5; CL=11; CH : -39.00-16.00; Q=1350;
P75 S : -4-5; CL=11; CH : -12.00-15.45; Q=750;
P76 S : -12-11-1-16-13; CL=11; CH : -1.40-2.15-0.80-0.20-1.55; Q=4230;
P77 S : -12-11-1-16-13; CL=11; CH : -1.40-2.15-0.80-0.20-1.55; Q=4230;
P78 S : -12-8; CL=11; CH : -7.00-4.50; Q=1080;
P79 S : -13-8-9-1; CL=11; CH : -2.70-4.25-8.50-4.60; Q=2700;
P80 S : -9-7; CL=11; CH : -3.15-2.25; Q=2660;
P81 S : -4-5; CL=11; CH : -12.00-15.50; Q=880;
P82 S : -11-1-13-11; CL=6; CH : -1.20-2.00-2.00-4.25; Q=250;
P83 S : -20-11-7-8-11; CL=6; CH : -1.00-3.30-1.20-2.20-2.20; Q=250;
P84 S : -19-3-13-11-3-14; CL=11; CH : -0.73-6.20-2.30-3.45-7.70-0.70; Q=2660;
P85 S : -12-9-11-13-11; CL=11; CH : -3.85-2.80-5.60-2.20-0.60; Q=1330;
P86 S : -13-9-12-11; CL=11; CH : -3.20-3.65-3.20-4.40; Q=1330;
P87 S : -13-9-12-11; CL=11; CH : -3.20-3.65-3.20-4.40; Q=1330;
P88 S : -13-9-13-11; CL=11; CH : -1.35-3.20-1.35-1.98; Q=2660;
P89 S : -19-10; CL=1; CH : -0.60-1.40; Q=450;
P90 S : -12-9-1-13-9; CL=11; CH : -2.10-4.00-3.00-5.00-3.70; Q=2840;
P91 S : -2-15-12-4-15-3-15-12-3; CL=11; CH : -54.5-10.5-8-16-7.5-39.9-16.5-8.5-10;
Q=2840;
P92 S : -12-3-1-3; CL=11; CH : -4.20-3.50-8.50-8.00; Q=1080;
P93 S : -12-6-1-9; CL=11; CH : -6.75-2.80-9.50-6.65; Q=1620;
P94 S : -5-10-1-7-19-13; CL=6; CH : -2.60-3.70-1.00-1.00-0.20-6.20; Q=1470;
P95 S : -13-11-7; CL=6; CH : -1.60-3.35-0.80; Q=3800;

- P96 S : -13-11-7; CL=1; CH : -1.10-1.30-2.00; Q=1500;
P97 S : -12-9-7-1-9; CL=11; CH : -2.40-2.50-1.50-6.00-4.50; Q=1100;
P98 S : -16-7; CL=6; CH : -0.90-0.60; Q=250;
P99 S : -16-7-11; CL=6; CH : -1.00-1.05-6.10; Q=250;
P100 S : -11-12-13-11; CL=6; CH : -4.75-8.00-2.50-5.00; Q=500;
P101 S : -12-10; CL=11; CH : -1.80-3.90; Q=180;
P102 S : -2-13-3; CL=11; CH : -8.00-2.25-6.00; Q=500;
P103 S : -15-4; CL=6; CH : -5.50-28.00; Q=180;
P104 S : -13-10-9-13-4; CL=11; CH : -3.00-5.50-1.20-2.00-4.85; Q=180;
P105 S : -13-9-13-4; CL=6; CH : -2.20-3.80-2.30-5.10; Q=260;
P106 S : -12-4-9-4; CL=11; CH : -3.00-2.60-0.80-17.10; Q=180;
P107 S : -13-12-13-3-11; CL=11; CH : -5.25-2.10-2.10-16.90-1.00; Q=250;
P108 S : -7-16; CL=1; CH : -0.50-0.80; Q=250;
P109 S : -13-11; CL=11; CH : -4.50-2.10; Q=2160;
P110 S : -6-13-9; CL=11; CH : -2.50-6.75-3.00; Q=2160;
P111 S : -13-6-13-12-3-7-3; CL=1; CH : -7.05-3.00-8.40-2.20-6.80-0.80-5.85; Q=1000;
P112 S : -12-9-12; CL=11; CH : -2.60-7.70-1.40; Q=600;
P113 S : -5-8; CL=6; CH : -3.00-5.50; Q=300;
P114 S : -12-3-12-8; CL=11; CH : -2.70-6.50-2.35-5.95; Q=1080;
P115 S : -12-3; CL=11; CH : -2.35-12.50; Q=1080;
P116 S : -12-3; CL=11; CH : -2.35-12.50; Q=1080;
P117 S : -5-1; CL=6; CH : -1.55-1.85; Q=2080;
P118 S : -1-3; CL=11; CH : -33.00-8.20; Q=300;
P119 S : -1-8; CL=6; CH : -5.40-1.80; Q=1080;
P120 S : -12-3-7-1; CL=6; CH : -1.40-2.00-1.80-4.20; Q=1080;
P121 S : -12-15-3-13-3; CL=11; CH : -6.60-3.00-23.10-4.00-24.00; Q=2160;
P122 S : -15-6-12-3-14; CL=1; CH : -8.65-3.60-3.35-10.10-1.00; Q=2160;
P123 S : -13-7; CL=6; CH : -1.40-2.60; Q=550;
P124 S : -13-7; CL=6; CH : -1.40-2.60; Q=550;
P125 S : -13-11; CL=6; CH : -1.40-2.00; Q=1100;
P126 S : -15-3; CL=11; CH : -11.55-56.30; Q=1040;
P127 S : -5-11-14-7; CL=1; CH : -3.20-3.80-0.80-2.10; Q=250;
P128 S : -11-1-14-7; CL=6; CH : -2.80-0.90-0.80-2.70; Q=250;
P129 S : -7-13; CL=1; CH : -1.80-0.35; Q=250;
P130 S : -12-11; CL=11; CH : -2.25-2.40; Q=3260;
P131 S : -13-3-9; CL=6; CH : -6.00-3.50-2.00; Q=1080;
P132 S : -12-6; CL=11; CH : -2.10-0.90; Q=1080;
P133 S : -19-9; CL=11; CH : -0.70-3.55; Q=2660;
P134 S : -9-1; CL=11; CH : -1.30-2.00; Q=450;
P135 S : -7-9-11; CL=11; CH : -3.20-3.00-1.00; Q=7140;
P136 S : -5-11; CL=1; CH : -2.60-1.60; Q=500;
P137 S : -13-6-3; CL=11; CH : -4.55-3.40-3.00; Q=720;
P138 S : -12-6-10-15-4; CL=6; CH : -3.00-2.60-0.60-2.20-6.00; Q=180;
P139 S : -13-8-10-11-14; CL=11; CH : -1.85-17.50-11.00-0.80-0.55; Q=3260;
P140 S : -12-6-12-10-13-4-10-11; CL=11; CH : -2.75-1.80-2.70-7.75-1.50-5.70-3.95-1.95;
Q=1800;
P141 S : -12-11-13-11; CL=11; CH : -1.40-4.00-1.50-2.70; Q=2720;
P142 S : -17-11-1; CL=11; CH : -3.10-4.60-5.70; Q=1000;
P143 S : -15-6-12-3-14; CL=11; CH : -8.65-3.00-3.35-10.10-1.00; Q=2660;
P144 S : -13-6-13-12-3-7-3; CL=11; CH : -7.05-3.00-8.35-2.20-6.80-0.80-5.85; Q=1760;

- P145 S : -12-6-12-10-13-4-10-11; CL=6; CH : -2.75-1.80-2.70-6.55-1.50-5.70-3.95-1.95; Q=250;
- P146 S : -10-13; CL=1; CH : -5.50-6.00; Q=1300;
- P147 S : -12-6-12-10-11-10-13-4-10-11; CL=11; CH : -2.75-1.8-2.7-3.4-1.1-4.35-1.5-5.7-3.95-1.95; Q=1470;
- P148 S : -12-1-13; CL=6; CH : -1.50-1.00-3.50; Q=800;
- P149 S : -12-1-13; CL=6; CH : -1.50-1.00-3.50; Q=800;
- P150 S : -12-11-1-13; CL=6; CH : -1.50-1.40-1.00-3.50; Q=420;
- P151 S : -9-13-3; CL=6; CH : -3.00-4.00-2.50; Q=420;
- P152 S : -9-1; CL=1; CH : -1.00-1.00; Q=800;
- P153 S : -12-9; CL=6; CH : -2.00-6.50; Q=420;
- P154 S : -12-9-15-8-11; CL=6; CH : -2.05-3.40-3.15-2.40-2.40; Q=550;
- P155 S : -12-9-15; CL=6; CH : -2.05-3.40-3.15; Q=550;
- P156 S : -12-6-12-10-13-4-10-11; CL=11; CH : -2.75-1.80-2.70-7.75-1.50-5.70-3.95-1.95; Q=3860;
- P157 S : -13-3-12-9-1-3; CL=11; CH : -6.40-11.30-2.20-4.00-10.00-6.30; Q=120;
- P158 S : -12-3-7; CL=11; CH : -1.50-10.00-6.30; Q=1630;
- P159 S : -15-6-13-3-14; CL=11; CH : -5.10-3.50-2.50-10.00-0.70; Q=1630;
- P160 S : -15-6-13-3-14; CL=11; CH : -5.10-3.50-2.50-10.00-0.70; Q=1630;
- P161 S : -15-6-12-11-12; CL=11; CH : -5.85-2.60-1.55-3.75-2.70; Q=1630;
- P162 S : -15-6-12-11-12; CL=11; CH : -5.85-2.60-1.55-3.75-2.70; Q=1630;
- P163 S : -13-6-13-4-14-13-9-4; CL=11; CH : -8.00-3.20-3.20-8.65-1.00-2.75-6.50-2.85; Q=1630;
- P164 S : -13-6-13-4-14-13-9-4; CL=11; CH : -8.00-3.20-3.20-8.65-1.00-2.75-6.50-2.85; Q=1630;
- P165 S : -12-11-15-9-11; CL=6; CH : -2.50-3.20-2.00-3.50-5.00; Q=3700;
- P166 S : -12-9-11-1-11-9; CL=6; CH : -1.70-4.70-6.75-5.80-2.50-3.25; Q=250;
- P167 S : -12-10-7-1-8-7; CL=6; CH : -2.70-2.10-1.80-6.00-9.50-3.50; Q=250;
- P168 S : -5-11; CL=11; CH : -2.00-9.50; Q=420;
- P169 S : -15-6-13-3-11-14; CL=11; CH : -6.20-2.20-1.80-7.75-0.83-0.40; Q=1680;
- P170 S : -15-6; CL=11; CH : -3.00-2.20; Q=440;
- P171 S : -15-3-18-3-15; CL=11; CH : -10.50-25.00-105.00-12.00-7.50; Q=440;
- P172 S : -19-3; CL=11; CH : -0.60-6.00; Q=880;
- P173 S : -15-6-13-3-11-14; CL=11; CH : -5.80-2.20-2.80-9.50-1.00-0.65; Q=3260;
- P174 S : -13-11-20; CL=1; CH : -3.20-1.00-1.90; Q=500;
- P175 S : -20-11-13-11; CL=11; CH : -2.20-2.50-1.50-2.70; Q=1000;
- P176 S : -3-1; CL=1; CH : -4.00-2.50; Q=650;
- P177 S : -12-3-1-3; CL=6; CH : -3.50-7.00-4.20-3.00; Q=880;
- P178 S : -13-3; CL=11; CH : -11.50-4.00; Q=1100;
- P179 S : -12-8; CL=1; CH : -3.00-2.60; Q=220;
- P180 S : -9-1; CL=1; CH : -2.15-4.15; Q=200;
- P181 S : -12-13-11; CL=11; CH : -3.50-3.50-8.00; Q=320;
- P182 S : -2-9-8-11-7-9; CL=11; CH : -5.90-13.00-5.50-1.20-2.20-1.80; Q=420;
- P183 S : -13-6-13-3-7; CL=11; CH : -7.05-3.00-8.35-6.80-0.80; Q=900;
- P184 S : -12-9-11-13-11; CL=6; CH : -3.85-2.80-5.60-2.20-2.60; Q=250;
- P185 S : -11-1; CL=1; CH : -3.50-6.00; Q=250;
- P186 S : -15-6-11-12-1-3-9; CL=6; CH : -6.00-2.50-1.80-2.50-10.00-5.00-3.00; Q=500;
- P187 S : -15-6-11-12-11; CL=6; CH : -6.00-3.00-1.50-1.50-5.60; Q=250;
- P188 S : -12-9-12; CL=6; CH : -3.00-5.00-13.00; Q=250;
- P189 S : -12-13-3-9; CL=6; CH : -17.85-4.00-16.00-7.00; Q=250;

- P190 S : -12-13-9; CL=6; CH : -15.10-4.00-7.00; Q=250;
P191 S : -12-10-13; CL=1; CH : -2.00-2.30-10.00; Q=250;
P192 S : -19-10; CL=1; CH : -0.60-1.40; Q=200;
P193 S : -3-11; CL=6; CH : -10.00-0.50; Q=150;
P194 S : -1-3-11; CL=1; CH : -3.80-6.50-1.20; Q=250;
P195 S : -1-3-11; CL=1; CH : -3.80-6.50-1.20; Q=250;
P196 S : -12-13-3; CL=1; CH : -24.75-2.70-8.00; Q=250;
P197 S : -12-3; CL=6; CH : -3.50-4.00; Q=250;
P198 S : -12-13-16; CL=6; CH : -2.60-7.60-1.00; Q=100;
P199 S : -13-4-1; CL=1; CH : -1.50-3.00-7.70; Q=250;
P200 S : -13-4-1; CL=6; CH : -1.50-3.00-7.70; Q=250;
P201 S : -12-13-3; CL=6; CH : -1.50-1.40-4.50; Q=250;
P202 S : -9-7; CL=6; CH : -3.20-0.50; Q=3800;
P203 S : -11-12-20-13-16; CL=6; CH : -1.55-0.50-0.70-0.70-0.60; Q=1800;
P204 S : -11-12-13-16; CL=6; CH : -1.55-0.90-1.70-0.60; Q=1800;
P205 S : -11-12; CL=6; CH : -2.05-0.65; Q=1800;
P206 S : -5-7-17-7; CL=6; CH : -1.35-1.10-3.35-0.60; Q=1800;
P207 S : -13-11-7-11; CL=11; CH : -3.90-6.20-1.20-0.66; Q=1470;
P208 S : -15-6-11-1-3; CL=11; CH : -6.00-2.50-2.00-9.80-5.75; Q=1470;
P209 S : -12-9-7-8-13; CL=11; CH : -1.55-2.30-2.00-6.20-2.80; Q=1470;
P210 S : -13-11-7; CL=11; CH : -1.70-9.00-1.40; Q=1470;
P211 S : -7-17-13; CL=6; CH : -1.90-30.00-2.80; Q=1300;
P212 S : -12-6-11; CL=11; CH : -1.30-1.70-0.80; Q=7200;
P213 S : -12-6; CL=11; CH : -1.90-1.70; Q=5880;
P214 S : -12-7-13-14-11-7; CL=11; CH : -1.30-2.50-1.50-1.20-3.50-1.00; Q=1470;
P215 S : -13-10-11-14; CL=11; CH : -2.60-18.20-0.89-1.10; Q=3600;
P216 S : -15-9-11-13-8; CL=11; CH : -4.85-2.50-0.63-1.40-6.45; Q=3600;
P217 S : -13-6-13-3-11-14-11; CL=11; CH : -5.80-2.60-1.65-5.65-0.60-0.60-0.80; Q=3600;
P218 S : -12-9; CL=11; CH : -1.05-1.50; Q=7600;
P219 S : -13-8-10-11-14; CL=11; CH : -2.60-8.65-7.20-0.60-0.90; Q=3600;
P220 S : -15-6-12-3-14; CL=11; CH : -3.70-1.75-1.75-0.75-0.75; Q=3600;
P221 S : -15-11-12-3-11-14; CL=11; CH : -1.50-2.50-2.00-5.20-1.15-0.75; Q=3600;
P222 S : -12-6-13-3-11-14; CL=11; CH : -6.80-2.20-1.80-7.75-0.83-0.80; Q=2940;
P223 S : -15-6-13-3-11-14; CL=11; CH : -6.30-2.05-1.80-6.85-2.03-0.80; Q=2940;
P224 S : -15-6-12-3-11-14; CL=11; CH : -5.45-2.25-2.35-6.35-0.83-0.80; Q=5880;
P225 S : -13-8-9-11-14; CL=11; CH : -3.50-8.85-6.45-0.45-0.55; Q=2940;
P226 S : -13-8-9-11-14; CL=11; CH : -1.95-7.85-8.10-0.60-0.55; Q=3300;
P227 S : -15-6-11-1-3; CL=11; CH : -5.80-2.50-0.80-10.00-4.85; Q=1800;
P228 S : -12-9-7-14-1-16; CL=11; CH : -1.20-1.50-0.80-2.00-3.50-0.60; Q=3270;
P229 S : -6-8-9; CL=11; CH : -1.30-5.50-1.55; Q=7540;
P230 S : -10-11; CL=11; CH : -3.65-1.25; Q=5300;
P231 S : -1-9-1; CL=11; CH : -3.00-3.50-2.20; Q=3270;
P232 S : -20-7; CL=6; CH : -1.50-1.10; Q=3000;
P233 S : -9-11-13; CL=11; CH : -1.70-2.40-4.90; Q=3270;
P234 S : -12-1; CL=11; CH : -2.00-3.35; Q=2940;
P235 S : -1-13-9-13; CL=11; CH : -2.55-1.65-1.80-1.70; Q=6540;
P236 S : -1-2; CL=11; CH : -2.55-5.20; Q=6540;
P237 S : -5-7; CL=11; CH : -1.50-1.80; Q=5000;
P238 S : -9-7-14; CL=6; CH : -1.75-2.00-1.90; Q=1000;
P239 S : -9-7-14; CL=6; CH : -1.75-2.00-1.90; Q=1000;

P240 S :-9-12; CL=1; CH :-3.10-1.10; Q=120;
P241 S :-11-1-7-11; CL=1; CH :-3.20-5.00-1.20-1.50; Q=250;
P242 S :-7-1; CL=6; CH :-1.50-3.60; Q=250;
P243 S :-13-7; CL=6; CH :-2.70-3.35; Q=250;
P244 S :-1-12-9-7; CL=1; CH :-6.50-1.95-4.50-1.70; Q=180;
P245 S :-3-13-2-1-3-14; CL=11; CH :-43.25-8.00-41.00-16.00-6.00-8.00; Q=800;
P246 S :-3-13-2-1-12-14; CL=11; CH :-43.25-8.00-41.00-16.00-3.50-8.00; Q=500;
P247 S :-15-12-3-15-3-5; CL=11; CH :-6.00-11.00-24.70-6.00-70.10-4.00; Q=250;
P248 S :-15-12-3-15-3-5; CL=11; CH :-6.00-11.00-24.70-6.00-70.10-4.00; Q=250;
P249 S :-11-20; CL=1; CH :-5.65-1.40; Q=1630;
P250 S :-13-3; CL=11; CH :-8.50-20.85; Q=2600;
P251 S :-12-3-11-1-9; CL=11; CH :-1.80-4.00-0.90-6.00-5.00; Q=1100;
P252 S :-13-9-13-9; CL=6; CH :-2.50-4.00-3.00-4.00; Q=1100;
P253 S :-17-20-9-11-17-10; CL=11; CH :-1.20-2.00-2.85-3.00-1.00-2.75; Q=1800;
P254 S :-12-3-9-3; CL=11; CH :-2.00-4.00-2.00-3.00; Q=1100;
P255 S :-12-9-13-9; CL=11; CH :-3.00-4.50-1.50-0.50; Q=1100;
P256 S :-12-3; CL=6; CH :-3.80-4.70; Q=250;
P257 S :-3-9-18-9; CL=6; CH :-25.00-11.00-15.00-6.00; Q=250;
P258 S :-13-11-13-11; CL=11; CH :-2.50-2.20-1.40-7.50; Q=250;
P259 S :-13-11-13-11; CL=6; CH :-2.50-2.20-1.40-7.50; Q=250;
P260 S :-5-11-5-7-11; CL=6; CH :-0.90-1.90-5.80-1.00-1.80; Q=1470;
P261 S :-5-11; CL=11; CH :-3.00-9.40; Q=1470;
P262 S :-12-3-1-11; CL=1; CH :-3.00-12.00-7.00-4.00; Q=250;
P263 S :-11-13-1; CL=6; CH :-3.50-1.50-1.50; Q=250;
P264 S :-12-5-3-11-1; CL=1; CH :-3.00-2.50-12.00-4.00-7.00; Q=250;
P265 S :-11-3; CL=6; CH :-1.60-7.20; Q=200;
P266 S :-1-11; CL=11; CH :-3.20-2.30; Q=1040;
P267 S :-1-11; CL=11; CH :-3.20-2.30; Q=1040;
P268 S :-3-14; CL=6; CH :-3.20-2.50; Q=200;
P269 S :-6-3; CL=11; CH :-2.50-3.00; Q=1080;
P270 S :-5-3; CL=11; CH :-1.50-3.00; Q=1100;
P271 S :-3-14; CL=6; CH :-2.80-1.60; Q=500;
P272 S :-7-16; CL=6; CH :-0.50-0.80; Q=250;

Les charges des pools distribuables relatives aux séquences contenant une seule opération

| | | | | | | |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| pool | 1 | 3 | 4 | 6 | 7 | 8 |
| CH1 | 24089 | 74625 | 78734 | 108640 | 545907 | 108964 |
| pool | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 15 |
| CH1 | 380764 | 240050 | 338156 | 214564 | 410514 | 0 |

Données sur les solvers correspondants aux différents types de problèmes :

| SOLVERS | TYPES DE PROBLEMES RESOLUS |
|----------|----------------------------|
| BDML | LP RMIP |
| ZOOM | LP RMIP MIP |
| MINOS | LP RMIP RMINLP NLP DNLP |
| CONOPT | LP RMIP RMINLP NLP |
| OSL | LP RMIP MIP |
| DICOPT | MINLP |
| MPSWRITE | LP RMIP MIP RMINLP DNLP |

| | |
|--------|---|
| LP | problèmes de programmation linéaire, |
| RMIP | problème de programmation en nombres entiers relaxé, |
| MIP | problèmes de programmation en nombres entiers à variables binaires, |
| NLP | problèmes de programmation non linéaire, |
| MINLP | problèmes de programmation non linéaire en nombres entiers à variables binaires, |
| RMINLP | problèmes de programmation non linéaire en nombres entiers relaxés, |
| DNLP | problèmes de programmation non linéaire avec des discontinuités dans les contraintes ou dans la fonction objective. |

Structure du modèle GAMS :

Les composantes de base du modèle se présentent ainsi :

| | |
|-----------|---|
| \$Title | (titre du programme) |
| Sets | Déclaration Affectation des éléments |
| Data | (paramètres, tables, scalars) Déclaration Affectation aux valeurs |
| Variables | Déclaration Spécification du type des valeurs |
| Equations | Déclaration Spécification du type des variables Affectation des bornes et valeurs initiales |
| Model | (spécification des équations constituant le modèle) |
| Solve | -nom du modèle-direction de l'optimisation (max, min)-fonction objective-type de problème |
| Display | élément à afficher (optionnelle). |

GAMS 2.25.064 386/486 DOS

17/03/95 09:22:15

General Algebraic Modeling System Compilation

```

1
2 * PROGRAMME DE MISE EN LIGNE FONCTIONNELLE DE L'ATELIER FERRURES
3 * Declaration des indices
4 sets
5 I POOLi /1*16/
6 alias(I,J)
7 alias(I,K);
8 * Declaration des donnees
9 PARAMETERS
10 SUP(I)
11 /1 1
12 2 2
13 3 3
14 4 4
15 5 5
16 6 6
17 7 7
18 8 8
19 9 9
20 10 10
21 11 11
22 12 12
23 13 13
24 14 14
25 15 15
26 16 16 /;
27
28
29 TABLE A(I,J) des echanges inter-pools
30
31 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
32
33 1 86 11 7 12 100
34 2 22 44
35 3 37 44 46 6 51
36 4 7 33 22 39
37 5 6 34 29 28 6 6
38 6 11 22 11 11 11 17
39 7 29 12 6 23 33
40 8 22 6 56 33
41 9 84 17 33 119 33 28
42 10 6 6 22 22
43 11 110 17 6 130 6 39 7
44 12 40 225 22 23 122 17 35 214 46
45 13 34 11 251 96 67 18 101 185 22
46 14 11 7
47 15 106 12 167 6 17
48 16 11 12 18
49

```

```

50 + 11 12 13 14 15 16
51
52 1 35 12 68 6 33
53 2 11 11
54 3 136 51 45 79 44
55 4 22 11
56 5 30
57 6 45 95 139
58 7 41 47 23 7
59 8 64
60 9 134 51 118 12
61 10 72 52 6
62 11 80 107 133 6
63 12 140 103 11 22 1
64 13 215 29 11 18
65 14 22 22
66 15 17 44
67 16 33
68
69
70 VARIABLES
71
72 W(I,J) variable de decision
73
74 F FONCTION OBJECTIVE;
75 BINARY VARIABLE W ;
76
77 EQUATIONS
78
79 EQU0 FONCTION OBJECTIVE
80
81 EQU1(I,J) contraintes de positionnement
82 EQU2(I,J,K) contraintes de transitivite ;
83
84 EQU0 .. F=E= SUM((I,J),A(I,J)*(1-W(I,J)));
85
86
87
88 EQU1(I,J)$((SUP(I) NE SUP(J)) .. W(I,J)+W(J,I)=E=1;
89 EQU2(I,J,K)$((SUP(I) NE SUP(J)) and (SUP(I) NE SUP(K)) and (SUP(J) NE
SUP(K))) ..
90 W(I,J)+W(J,K)-W(I,K)=I=1;
91
92 model LIGNE /all/;
93 options MIP=OSL;
94 option limrow = 0 ;
95 option limcol = 0 ;
96 option sysout = off ;
97 option solprint = off ;
98 solve LIGNE using mip minimizing F;
99
100 display W.I;

```

COMPILATION TIME = 1.870 SECONDS VERID MW2-00-064

MODEL STATISTICS

BLOCKS OF EQUATIONS 3 SINGLE EQUATIONS 3601
BLOCKS OF VARIABLES 2 SINGLE VARIABLES 241
NON ZERO ELEMENTS 10691 DISCRETE VARIABLES 240

GENERATION TIME = 18.780 SECONDS

EXECUTION TIME = 18.940 SECONDS VERID MW2-00-064

SOLVE SUMMARY

MODEL LIGNE OBJECTIVE F
TYPE MIP DIRECTION MINIMIZE
SOLVER OSL FROM LINE 98

**** SOLVER STATUS 1 NORMAL COMPLETION
**** MODEL STATUS 1 OPTIMAL
**** OBJECTIVE VALUE 1633.0000

RESOURCE USAGE, LIMIT 95.620 1000.000
ITERATION COUNT, LIMIT 310 1000

--- GAMS/OSL 2.002

Work space allocated -- 2.90 Mb

**** REPORT SUMMARY : 0 NONOPT
0 INFEASIBLE
0 UNBOUNDED

--- 100 VARIABLE W.L variable de decision

ANNEXE F : Programme GAMS et résultats

| | 1 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | | 1.000 | 1.000 | 1.000 | | 1.000 |
| 2 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| 3 | | | | | | 1.000 |
| 4 | | 1.000 | | 1.000 | | 1.000 |
| 5 | | 1.000 | | | | 1.000 |
| 6 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | | 1.000 |
| 8 | | 1.000 | | | | 1.000 |
| 9 | | | | | | 1.000 |
| 10 | | | | | | 1.000 |
| 11 | | | | | | 1.000 |
| 12 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| 13 | | 1.000 | 1.000 | 1.000 | | 1.000 |
| 15 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| 16 | | 1.000 | 1.000 | 1.000 | | 1.000 |
| + | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| 1 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | | 1.000 |
| 2 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| 3 | | 1.000 | 1.000 | 1.000 | | |
| 4 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | | |
| 5 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | | |
| 6 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | | 1.000 |
| 8 | | 1.000 | 1.000 | 1.000 | | |
| 9 | | | 1.000 | 1.000 | | |
| 10 | | | | 1.000 | | |
| 12 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | | 1.000 |
| 13 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | | |
| 15 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| 16 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | | 1.000 |
| + | 14 | 15 | 16 | | | |
| 1 | 1.000 | | 1.000 | | | |
| 2 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | | | |
| 3 | 1.000 | | | | | |
| 4 | 1.000 | | | | | |
| 5 | 1.000 | | | | | |
| 6 | 1.000 | | 1.000 | | | |
| 7 | 1.000 | | | | | |
| 8 | 1.000 | | | | | |
| 9 | 1.000 | | | | | |
| 10 | 1.000 | | | | | |
| 11 | 1.000 | | | | | |
| 12 | 1.000 | | 1.000 | | | |
| 13 | 1.000 | | | | | |
| 15 | 1.000 | | 1.000 | | | |
| 16 | 1.000 | | | | | |

EXECUTION TIME = 2.200 SECONDS VERID MW2-00-064

La ligne fonctionnelle :

| | | | | | |
|-----------------|----|----|----|----|----|
| Position | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| pool | 2 | 15 | 12 | 6 | 1 |
| position | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| pool | 19 | 16 | 17 | 20 | 13 |
| position | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| pool | 4 | 5 | 8 | 3 | 18 |
| position | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| pool | 9 | 10 | 11 | 7 | 14 |

| | | | | | | | | | | |
|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Coupe | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Valeur | 144 | 221 | 691 | 1237 | 1243 | 1297 | 1372 | 1405 | 1588 | 1612 |
| Coupe | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| Valeur | 1653 | 1659 | 1715 | 1738 | 1760 | 2214 | 2247 | 2336 | 2337 | 2654 |
| Coupe | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |
| Valeur | 2279 | 2199 | 2177 | 2119 | 2084 | 1953 | 1921 | 1921 | 1205 | 885 |
| Coupe | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | | | |
| Valeur | 754 | 695 | 584 | 262 | 216 | 102 | 7 | | | |

- P1** S : -12-38-37-11-7; la sous-ligne (1) ;
P2 S : -11-7; la sous-ligne (2) ;
P3 S : -38-10; la sous-ligne (1) ;
P4 S : -12-25-1-31; la sous-ligne (1) ;
P5 S : -11-7; la sous-ligne (2) ;
P6 S : -24-33-22; la sous-ligne (1) ;
P7 S : -13-8-9-26; la sous-ligne (1) ;
P8 S : -2-38-10-30; la sous-ligne (1) ;
P9 S : -2-38-10-30; la sous-ligne (1) ;
P10 S : -2-25-8-11-7-31; la sous-ligne (1) ;
P11 S : -11-7-26; la sous-ligne (2) ;
P12 S : -38-11; la sous-ligne (1) ;
P13 S : -24-25; la sous-ligne (1) ;
P14 S : -25-8; la sous-ligne (1) ;
P15 S : -38-7; la sous-ligne (2) ;
P16 S : -25-13-3-21-11; la sous-ligne (1) ;
P17 S : -16-27-13-8-10; la sous-ligne (1) ;
P18 S : -11-22; la sous-ligne (2) ;
P19 S : -12-27-8; la sous-ligne (1) ;
P20 S : -28-3-7-8-38; la sous-ligne (1) ;
P21 S : -13-3-9-13-3-11-14; la sous-ligne (1) ;
P22 S : -12-6-35-13-9-22; la sous-ligne (1) ;
P23 S : -15-30; la sous-ligne (2) ;
P24 S : -12-9-11; la sous-ligne (1) ;
P25 S : -15-3-21-11-31; la sous-ligne (1) ;
P26 S : -3-22; la sous-ligne (2) ;
P27 S : -1-13-5-11; la sous-ligne (1) ;
P28 S : -15-27-21-11-31; la sous-ligne (1) ;
P29 S : -12-9-7; la sous-ligne (1) ;
P30 S : -12-15-6-7; la sous-ligne (1) ;
P31 S : -12-6-25-13-9-22; la sous-ligne (1) ;
P32 S : -1-38; la sous-ligne (1) ;
P33 S : -15-3-18; la sous-ligne (1) ;
P34 S : -28-9-11; la sous-ligne (1) ;
P35 S : -15-18; la sous-ligne (1) ;
P36 S : -13-11; la sous-ligne (1) ;
P36 S : -24-33; la sous-ligne (1) ;
P37 S : -12-16; la sous-ligne (1) ;
P38 S : -1-38; la sous-ligne (1) ;
P39 S : -11-28-33; la sous-ligne (1) ;
P40 S : -7-29; la sous-ligne (2) ;
P41 S : -13-3-11; la sous-ligne (1) ;
P42 S : -13-3-11; la sous-ligne (1) ;
P43 S : -24-1-11-7; la sous-ligne (1) ;
P44 S : -1-9-7-26; la sous-ligne (2) ;
P45 S : -19-13-11; la sous-ligne (1) ;
P46 S : -12-27-13-8-11; la sous-ligne (1) ;
P47 S : -12-27-13-8-11; la sous-ligne (1) ;
P48 S : -6-13-4-3-21; la sous-ligne (1) ;
P49 S : -8-11; la sous-ligne (1) ;

- P50 S : -8-11; la sous-ligne (1) ;
P51 S : -16-31; la sous-ligne (2) ;
P52 S : -28-33; la sous-ligne (1) ;
P53 S : -28-33; la sous-ligne (1) ;
P54 S : -28-3-9-33-9; la sous-ligne (1) ;
P55 S : -28-9-11-8-11-22; la sous-ligne (1) ;
P56 S : -12-33-11-7; la sous-ligne (1) ;
P57 S : -15-27-1-3-11; la sous-ligne (1) ;
P58 S : -13-3-33-11; la sous-ligne (1) ;
P59 S : -27-9-21; la sous-ligne (1) ;
P60 S : -15-24-13-31; la sous-ligne (1) ;
P61 S : -12-5-3-5-8-3; la sous-ligne (1) ;
P62 S : -12-5-3-5-8-3; la sous-ligne (1) ;
P63 S : -23-1-9-7; la sous-ligne (1) ;
P64 S : -23-1-9-7; la sous-ligne (1) ;
P65 S : -28-11-7; la sous-ligne (1) ;
P66 S : -12-13-3; la sous-ligne (1) ;
P67 S : -28-38; la sous-ligne (1) ;
P68 S : -28-38; la sous-ligne (1) ;
P69 S : -12-1-32; la sous-ligne (1) ;
P70 S : -12-25-13-8; la sous-ligne (1) ;
P71 S : -5-7; la sous-ligne (2) ;
P72 S : -13-21-7-5; la sous-ligne (1) ;
P73 S : -13-30; la sous-ligne (2) ;
P74 S : -4-5; la sous-ligne (1) ;
P75 S : -4-5; la sous-ligne (1) ;
P76 S : -12-24-1-16-13; la sous-ligne (1) ;
P77 S : -12-24-1-16-13; la sous-ligne (1) ;
P78 S : -12-8; la sous-ligne (1) ;
P79 S : -13-8-9-22; la sous-ligne (1) ;
P80 S : -9-7; la sous-ligne (2) ;
P81 S : -4-5; la sous-ligne (1) ;
P82 S : -24-1-33-11; la sous-ligne (1) ;
P83 S : -20-11-7-8-11; la sous-ligne (1) ;
P84 S : -19-3-33-11-30-14; la sous-ligne (1) ;
P85 S : -28-9-11-33-11; la sous-ligne (1) ;
P86 S : -13-9-21-11; la sous-ligne (1) ;
P87 S : -13-9-21-11; la sous-ligne (1) ;
P88 S : -13-9-33-11; la sous-ligne (1) ;
P89 S : -19-10; la sous-ligne (1) ;
P90 S : -12-25-1-13-31; la sous-ligne (1) ;
P91 S : -2-15-12-32-15-30-15-12-3; la sous-ligne (1) ;
P92 S : -12-27-1-3; la sous-ligne (1) ;
P93 S : -12-6-1-38; la sous-ligne (1) ;
P94 S : -5-10-1-34-19-33; la sous-ligne (1) ;
P95 S : -33-11-7; la sous-ligne (1) ;
P96 S : -33-11-7; la sous-ligne (1) ;
P97 S : -28-9-7-1-31; la sous-ligne (1) ;
P98 S : -16-7; la sous-ligne (2) ;
P99 S : -16-7-29; la sous-ligne (2) ;

- P100 S** :-11-12-33-11; la sous-ligne (1) ;
P101 S :-28-10; la sous-ligne (1) ;
P102 S :-2-13-3; la sous-ligne (1) ;
P103 S :-15-32; la sous-ligne (2) ;
P104 S :-13-10-25-13-32; la sous-ligne (1) ;
P105 S :-13-9-13-32; la sous-ligne (1) ;
P106 S :-12-4-9-32; la sous-ligne (1) ;
P107 S :-23-12-13-3-11; la sous-ligne (1) ;
P108 S :-34-16; la sous-ligne (1) ;
P109 S :-33-11; la sous-ligne (1) ;
P110 S :-6-13-38; la sous-ligne (1) ;
P111 S :-23-6-13-28-3-7-30; la sous-ligne (1) ;
P112 S :-12-9-21; la sous-ligne (1) ;
P113 S :-5-8; la sous-ligne (1) ;
P114 S :-28-3-12-8; la sous-ligne (1) ;
P115 S :-28-3; la sous-ligne (1) ;
P116 S :-28-3; la sous-ligne (1) ;
P117 S :-5-22; la sous-ligne (2) ;
P118 S :-1-3; la sous-ligne (1) ;
P119 S :-1-8; la sous-ligne (1) ;
P120 S :-28-3-7-22; la sous-ligne (2) ;
P121 S :-12-15-27-13-3; la sous-ligne (1) ;
P122 S :-15-6-28-3-14; la sous-ligne (1) ;
P123 S :-13-7; la sous-ligne (2) ;
P124 S :-13-7; la sous-ligne (2) ;
P125 S :-13-11; la sous-ligne (1) ;
P126 S :-15-3; la sous-ligne (1) ;
P127 S :-5-11-14-36; la sous-ligne (2) ;
P128 S :-11-22-14-36; la sous-ligne (2) ;
P129 S :-7-26; la sous-ligne (2) ;
P130 S :-28-11; la sous-ligne (1) ;
P131 S :-13-3-38; la sous-ligne (1) ;
P132 S :-12-6; la sous-ligne (1) ;
P133 S :-19-9; la sous-ligne (1) ;
P134 S :-25-22; la sous-ligne (1) ;
P135 S :-34-38-11; la sous-ligne (1) ;
P136 S :-5-11; la sous-ligne (1) ;
P137 S :-23-6-3; la sous-ligne (1) ;
P138 S :-12-6-10-15-32; la sous-ligne (1) ;
P139 S :-13-8-10-11-14; la sous-ligne (1) ;
P140 S :-12-6-21-10-13-4-10-11; la sous-ligne (1) ;
P141 S :-12-24-13-11; la sous-ligne (1) ;
P142 S :-17-11-22; la sous-ligne (1) ;
P143 S :-15-6-28-3-14; la sous-ligne (1) ;
P144 S :-23-6-13-28-3-7-30; la sous-ligne (1) ;
P145 S :-12-6-21-10-13-4-10-11; la sous-ligne (1) ;
P146 S :-10-26; la sous-ligne (2) ;
P147 S :-12-6-21-10-11-35-13-4-10-11; la sous-ligne (1) ;
P148 S :-12-1-13; la sous-ligne (1) ;
P149 S :-12-1-13; la sous-ligne (1) ;

- P150 S : -12-24-1-13; la sous-ligne (1) ;
P151 S : -25-13-3; la sous-ligne (1) ;
P152 S : -25-22; la sous-ligne (2) ;
P153 S : -28-38; la sous-ligne (1) ;
P154 S : -28-9-15-8-11; la sous-ligne (1) ;
P155 S : -28-9-15; la sous-ligne (1) ;
P156 S : -12-6-21-10-13-4-10-11; la sous-ligne (1) ;
P157 S : -13-3-12-25-1-3; la sous-ligne (1) ;
P158 S : -28-3-7; la sous-ligne (1) ;
P159 S : -15-6-13-3-14; la sous-ligne (1) ;
P160 S : -15-6-13-3-14; la sous-ligne (1) ;
P161 S : -15-6-21-11-28; la sous-ligne (1) ;
P162 S : -15-6-21-11-28; la sous-ligne (1) ;
P163 S : -23-6-13-4-14-13-9-32; la sous-ligne (1) ;
P164 S : -23-6-13-4-14-13-9-32; la sous-ligne (1) ;
P165 S : -28-11-15-9-11; la sous-ligne (1) ;
P166 S : -28-9-11-1-11-31; la sous-ligne (1) ;
P167 S : -28-10-7-1-8-7; la sous-ligne (1) ;
P168 S : -5-11; la sous-ligne (1) ;
P169 S : -15-6-13-3-11-14; la sous-ligne (1) ;
P170 S : -15-6; la sous-ligne (1) ;
P171 S : -15-3-18-30-15; la sous-ligne (1) ;
P172 S : -19-3; la sous-ligne (1) ;
P173 S : -15-6-13-3-11-14; la sous-ligne (1) ;
P174 S : -13-11-20; la sous-ligne (1) ;
P175 S : -20-11-13-11; la sous-ligne (1) ;
P176 S : -3-22; la sous-ligne (2) ;
P177 S : -12-27-1-3; la sous-ligne (1) ;
P178 S : -13-3; la sous-ligne (1) ;
P179 S : -12-8; la sous-ligne (1) ;
P180 S : -9-22; la sous-ligne (2) ;
P181 S : -12-13-11; la sous-ligne (1) ;
P182 S : -2-25-8-11-7-31; la sous-ligne (1) ;
P183 S : -23-6-13-3-7; la sous-ligne (1) ;
P184 S : -12-9-11-13-11; la sous-ligne (1) ;
P185 S : -11-22; la sous-ligne (2) ;
P186 S : -15-6-11-12-1-3-38; la sous-ligne (1) ;
P187 S : -15-6-11-28-11; la sous-ligne (1) ;
P188 S : -28-38-21; la sous-ligne (1) ;
P189 S : -12-13-3-31; la sous-ligne (1) ;
P190 S : -12-13-31; la sous-ligne (1) ;
P191 S : -28-10-26; la sous-ligne (1) ;
P192 S : -19-10; la sous-ligne (1) ;
P193 S : -3-11; la sous-ligne (1) ;
P194 S : -1-3-11; la sous-ligne (1) ;
P195 S : -1-3-11; la sous-ligne (1) ;
P196 S : -12-13-3; la sous-ligne (1) ;
P197 S : -28-3; la sous-ligne (1) ;
P198 S : -12-13-16; la sous-ligne (1) ;
P199 S : -13-4-22; la sous-ligne (1) ;

- P200 S : -13-4-22; la sous-ligne (1) ;
P201 S : -12-13-3; la sous-ligne (1) ;
P202 S : -9-7; la sous-ligne (2) ;
P203 S : -11-12-20-13-16; la sous-ligne (1) ;
P204 S : -11-12-13-16; la sous-ligne (1) ;
P205 S : -11-28; la sous-ligne (1) ;
P206 S : -5-7-17-7; la sous-ligne (2) ;
P207 S : -13-11-7-29; la sous-ligne (1) ;
P208 S : -15-6-24-1-3; la sous-ligne (1) ;
P209 S : -12-9-7-8-26; la sous-ligne (1) ;
P210 S : -13-11-7; la sous-ligne (1) ;
P211 S : -34-17-13; la sous-ligne (1) ;
P212 S : -12-6-11; la sous-ligne (1) ;
P213 S : -12-6; la sous-ligne (1) ;
P214 S : -28-7-26-14-11-7; la sous-ligne (2) ;
P215 S : -13-10-11-14; la sous-ligne (1) ;
P216 S : -15-25-11-13-8; la sous-ligne (1) ;
P217 S : -23-6-13-3-11-14-29; la sous-ligne (1) ;
P218 S : -28-31; la sous-ligne (2) ;
P219 S : -13-8-10-11-14; la sous-ligne (1) ;
P220 S : -15-6-28-3-14; la sous-ligne (1) ;
P221 S : -15-11-12-3-11-14; la sous-ligne (1) ;
P222 S : -12-6-13-3-11-14; la sous-ligne (1) ;
P223 S : -15-6-13-3-11-14; la sous-ligne (1) ;
P224 S : -15-6-28-3-11-14; la sous-ligne (1) ;
P225 S : -13-8-38-11-14; la sous-ligne (1) ;
P226 S : -13-8-38-11-14; la sous-ligne (1) ;
P227 S : -15-6-24-1-3; la sous-ligne (1) ;
P228 S : -28-9-7-14-1-16; la sous-ligne (1) ;
P229 S : -6-8-31; la sous-ligne (1) ;
P230 S : -10-11; la sous-ligne (1) ;
P231 S : -1-38-22; la sous-ligne (1) ;
P232 S : -20-7; la sous-ligne (2) ;
P233 S : -25-11-26; la sous-ligne (1) ;
P234 S : -12-1; la sous-ligne (1) ;
P235 S : -1-13-9-26; la sous-ligne (1) ;
P236 S : -1-2; la sous-ligne (1) ;
P237 S : -5-7; la sous-ligne (2) ;
P238 S : -25-7-14; la sous-ligne (2) ;
P239 S : -25-7-14; la sous-ligne (2) ;
P240 S : -25-21; la sous-ligne (1) ;
P241 S : -24-1-7-29; la sous-ligne (2) ;
P242 S : -7-22; la sous-ligne (2) ;
P243 S : -13-7; la sous-ligne (2) ;
P244 S : -1-28-38-7; la sous-ligne (1) ;
P245 S : -3-23-2-1-3-14; la sous-ligne (1) ;
P246 S : -3-23-2-1-21-14; la sous-ligne (1) ;
P247 S : -15-28-3-15-27-5; la sous-ligne (1) ;
P248 S : -15-12-3-15-27-5; la sous-ligne (1) ;
P249 S : -24-20; la sous-ligne (1) ;

- P250** S : -13-3; la sous-ligne (1) ;
- P251** S : -12-3-11-1-38; la sous-ligne (1) ;
- P252** S : -13-9-13-38; la sous-ligne (1) ;
- P253** S : -17-20-9-11-17-10; la sous-ligne (1) ;
- P254** S : -12-3-9-30; la sous-ligne (1) ;
- P255** S : -12-25-13-38; la sous-ligne (1) ;
- P256** S : -12-3; la sous-ligne (1) ;
- P257** S : -3-38-18-9; la sous-ligne (1) ;
- P258** S : -13-11-13-11; la sous-ligne (1) ;
- P259** S : -13-11-13-11; la sous-ligne (1) ;
- P260** S : -5-11-5-7-29; la sous-ligne (1) ;
- P261** S : -5-11; la sous-ligne (1) ;
- P262** S : -12-27-1-11; la sous-ligne (1) ;
- P263** S : -24-13-22; la sous-ligne (1) ;
- P264** S : -12-5-3-11-22; la sous-ligne (1) ;
- P265** S : -24-3; la sous-ligne (1) ;
- P266** S : -1-11; la sous-ligne (1) ;
- P267** S : -1-11; la sous-ligne (1) ;
- P268** S : -3-14; la sous-ligne (2) ;
- P269** S : -6-3; la sous-ligne (1) ;
- P270** S : -5-3; la sous-ligne (1) ;
- P271** S : -3-14; la sous-ligne (2) ;
- P272** S : -34-16; la sous-ligne (1).

FIGURES

FIGURES

| | |
|---|----|
| figure 01 : organisation en sections homogènes | 03 |
| figure 02 : organisation en ligne | 05 |
| figure 03 : les différents mouvements dans une ligne | 06 |
| figure 04 : réorganisation d'une ligne de production | 07 |
| figure 05 : les données relatives à l'exemple (implantation en ligne) | 07 |
| figure 06 : la première ligne obtenue de l'exemple (implantation en ligne) | 08 |
| figure 07 : l'écoulement et situation de l'en-cours pour la première ligne (exemple implantation en ligne) | 08 |
| figure 08 : l'écoulement du flux et situation de l'en-cours pour la deuxième ligne | 09 |
| figure 09 : matrice binaire de représentation des produits - machines | 15 |
| figure 10 : partition par similitudes d'opérations | 15 |
| figure 11 : matrice de représentation des produits - machines | 16 |
| figure 12 : partition par similitude de charge | 16 |
| figure 13 : matrice binaire de représentation machines - machines | 16 |
| figure 14 : partition par similitude d'échange | 17 |
| figure 15 : l'enchaînement décomposition - agencement | 18 |
| figure 16 : l'enchaînement agencement - décomposition | 19 |
| figure 17 : matrice d'échange | 25 |
| figure 18 : solution obtenue après execution de la première formulation(exemple) | 25 |
| figure 19 : la ligne avant distribution (exemple illustratif) | 32 |
| figure 20 : la ligne après distribution (exemple illustratif) | 32 |
| figure 21 : ligne après deuxième distribution (exemple illustratif) | 33 |
| figure 22 : ligne avant utilisation des gammes variantes(exemple illustratif) | 33 |
| figure 23 : les différentes positions d'insertions dans une ligne de N pools | 34 |
| figure 24 : la matrice de contribution | 35 |
| figure 25 : les différentes coupes possibles dans une ligne de N pools | 40 |
| figure 26 : décomposition de la ligne opérationnelle (exemple illustratif) | 40 |
| figure 27 : la signification des deux premiers chiffres du code machine | 42 |
| figure 28 : classification selon le nombre de pools utilisés dans les gammes (>2) | 49 |
| figure 29 : le degrés de sollicitation des pools | 49 |
| figure 30 : classification selon le nombre de lancements des pièces | 50 |
| figure 31 : les flux entrants et sortants de chaque pool | 50 |
| figure 32 : contribution du flux de la ligne fonctionnelle avant des 4 machines | 53 |
| figure 33 : la configuration du flux de la ligne fonctionnelle finale | 54 |
| figure 34 : les données sur les charges et les capacités des pools | 58 |
| figure 35 : les résultats obtenus pour les différentes valeurs de la marge MG | 60 |
| figure 36 : les données sur la ligne opérationnelle obtenue | 61 |
| figure 37 : configuration de la ligne opérationnelle | 63 |
| figure 38 : décomposition en sous-lignes de production | 64 |

**TABLE
DES MATIERES**

TABLE DES MATIERES

| | |
|---|----|
| INTRODUCTION | 01 |
| CHAPITRE I : ANALYSE DES DIFFERENTES STRUCTURES ORGANISATIONNELLES DES ATELIERS MULTI-PRODUITS | |
| 1- Les différents types d'implantations | 03 |
| 1.1 L'implantation en sections homogènes | 03 |
| 1.1.1 définition | 03 |
| 1.1.2 caractéristiques | 03 |
| 1.2 L'implantation en ligne | 05 |
| 1.2.1 définition | 05 |
| 1.2.2 caractéristiques | 05 |
| 2- La décomposition d'un atelier en îlots de fabrication | 10 |
| 3- Synthèse | 11 |
| CHAPITRE II : ANALYSE DU FLUX DE PRODUCTION | |
| 1- Généralités sur l'analyse du flux | 12 |
| 1.1 analyse statique du flux | 12 |
| 1.2 analyse dynamique du flux | 12 |
| 1.3 conclusion | 13 |
| 2- Application de l'analyse statique | 13 |
| 2.1 l'apport de l'analyse statique | 13 |
| 2.2 les concepts de l'analyse statique | 14 |
| 2.2.1 le partitionnement des produits et des machines | 14 |

TABLE DES MATIERES

| | |
|--|----|
| 2.2.2 l'agencement spatial en ligne des moyens de production | 17 |
| 2.3 l'enchaînement des concepts de l'analyse statique | 17 |
| - l'enchaînement décomposition - agencement | 18 |
| - l'enchaînement agencement - décomposition | 19 |
| 2.4 l'approche retenue | 19 |

CHAPITRE III : FORMULATION DU PROBLEME

| | |
|---|----|
| 1- Agencement en ligne | 20 |
| 1.1 l'état de l'art | 20 |
| 1.1.1 la méthode maticielle | 20 |
| 1.1.2 la méthode basée sur les similarités des séquences | 21 |
| 1.1.3 détermination de la séquence globale minimale S.G.M | 22 |
| 1.2 méthodes proposées | 23 |
| 1.2.1 la conception de la ligne fonctionnelle | 23 |
| 1.2.1.1 formulation de base | 24 |
| 1.2.1.2 première transformation | 26 |
| 1.2.1.3 deuxième transformation | 28 |
| 1.2.1.4 étude des cas particuliers | 30 |
| 1.2.2 la conception de la ligne opérationnelle | 32 |
| 1.2.2.1 algorithme de distribution | 34 |
| 1.2.2.2 algorithme des gammes variantes | 38 |
| 2- Décomposition en sous-lignes de production | 40 |

CHAPITRE IV : EXEMPLE INDUSTRIEL (atelier ferrures)

| | |
|--|----|
| 1- Analyse de la situation actuelle | 41 |
| 1.1 présentation de l'atelier "ferrures" | 41 |
| 1.2 dysfonctionnements dus à l'organisation actuelle | 43 |
| 2- Application | 47 |

TABLE DES MATIERES

| | |
|---|----|
| 2.1 le cas retenu | 47 |
| 2.2 démarche de résolution | 48 |
| 2.2.1 formation de la ligne de production | 48 |
| 2.2.1.1 la recherche de la ligne fonctionnelle | 48 |
| - présentation des données | 48 |
| - présentation de l'outil de résolution | 51 |
| - résultats et interprétations | 53 |
| 2.2.1.2 la recherche de la ligne opérationnelle | 54 |
| - présentation des données | 54 |
| - présentation de l'outil de résolution | 59 |
| - résultats et interprétations | 60 |
| 2.2.2 décomposition en sous-lignes de production | 64 |
| | |
| CONCLUSION GENERALE | 66 |
| | |
| BIBLIOGRAPHIE | 68 |
| | |
| ANNEXES | 70 |
| - Annexe A : Glossaire | 70 |
| - Annexe B : Données sur les machines | 74 |
| B1 : liste des machines | 74 |
| B2 : caractéristiques techniques des machines | 75 |
| B3 : gammes variantes | 76 |
| - Annexe C : Données sur les pièces | 77 |
| C1 : liste des pièces | 77 |
| C2 : séquences(S), classes(CL), temps alloués(TA) et quantités(Q) | 79 |
| C3 : charges relatives aux séquences d'une seule opération(CH1) | 84 |
| - Annexe D : Carte de flux | 85 |
| - Annexe E : Présentation du logiciel GAMS | 86 |
| E1 : les solveurs correspondants aux différents problèmes | 86 |
| E2 : structure d'un programme GAMS | 86 |

TABLE DES MATIERES

| | |
|---|-----|
| - Annexe F : Programme GAMS et résultats | 87 |
| F1 : programme GAMS | 87 |
| F2 : la ligne fonctionnelle obtenue | 91 |
| - Annexe G : Les positions des pools dans la ligne fonctionnelle | 92 |
| - Annexe H : Les séquences définitives et les sous-lignes correspondantes | 93 |
| | |
| . FIGURES | 99 |
| . TABLE DES MATIERES | 100 |