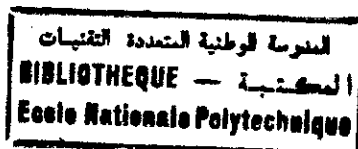


4/96
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Ecole Nationale Polytechnique d'Alger

Département de Génie Industriel

Projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat
en Génie Industriel

Thème :

Elaboration d'une heuristique pour la mise en ligne d'un atelier
Multi-produits

Application à l'atelier "Ferrures" au C.V.I Rouiba

Proposé par :

M.T.LAMRAOUI
M.A.MEKARNIA

Etudié par :

M.BENSAOUD Atef
M.BENSAFTA Kamel.Malik

Dirigé par :

M.T.LAMRAOUI

Soutenu le 26 juin 1996 au département de Génie Industriel

Promotion 1995 / 1996

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Ecole Nationale Polytechnique d'Alger

Département de Génie Industriel

Projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat
en Génie Industriel

Thème :

**Elaboration d'une heuristique pour la mise en ligne d'un atelier
Multi-produits**

Application à l'atelier "Ferrures" au C.V.I Rouiba

Proposé par :

M.T.LAMRAOUI
M.A.MEKARNIA

Etudié par :

M.BENSAOUD Atef
M.BENSAFTA Kamel.Malik

Dirigé par :

M.T.LAMRAOUI

Soutenu le 26 juin 1996 au département de Génie Industriel

Promotion 1995 / 1996

موضوع هذه الدراسة هو إنجاز طريقة أوريستيقية لوضع ورشة متعددة المنتوجات على شكل خط إنتاجي. هذا النوع من طرق الحل يسمح بالوصول إلى نتائج جيدة في هذا المضمار ولا يشكل تعقيدا حواريًا كبيرًا. الطريقة المنجزة سيتم تطبيقها على مثال صناعي وهذا لتمكيننا من اختبار نجاعتها وصلاحية نتائجها.

Résumé

L'objet de notre étude est l'élaboration d'une heuristique pour la mise en ligne d'un atelier multi-produits. L'approche heuristique devra permettre l'obtention d'une ligne de flux de bonne qualité avec une complexité algorithmique réduite. La méthode conçue est appliquée à un exemple industriel afin de tester sa performance et sa fiabilité.

Abstract

The objet of our study, is elaboration of an heuristic for alignment of multi-product workshop. Heuristic approach should give a flowline of quality with retrat algorithmique complexity. The elaborated method will be applied to an industrial example, in order to test its efficiency and reliability.

A la bien aimée et souffrante Algérie, je te souhaite un prompt rétablissement.

A mon très cher papa et ma très chère maman, des êtres qui aiment le savoir et la science, et qui m'ont toujours soutenu avec leur inépuisable amour. Sachez, très chers parents que je ne suis que l'œuvre de vos réflexions.

A ma soeur Soumaya et son mari Ali.

A mes frères Assaad et Seif.

A mes soeurs Oulfa, Ichrak et Raoudha.

A mon cher oncle Najib et sa femme Souad.

A toutes mes tantes.

A tous ceux qui ont contribué à ma formation, de l'enseignement primaire à l'enseignement supérieur.

A mon ami et frère Malik.

Atef

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

A la mémoire de Abd-El-Latif

Malik

Avant-propos

Cette étude a été faite au département de génie industriel de l'École Nationale Polytechnique.

Le sujet traité a été proposé et dirigé par Monsieur Toufik LAMRAOUI Maître-assistant chargé de cours. Nous le remercions vivement pour ses précieux conseils et pour sa contribution constante à la réalisation de ce travail.

Nous remercions également, Madame N.ABOUN, Chef de département, Maître assistante chargé de cours, pour l'honneur qu'elle nous fait en acceptant de présider le jury de soutenance de notre projet, pour son suivi et pour l'aide qu'elle nous apporté tout au long de notre scolarité.

Nous remercions aussi, monsieur A.MEKARNIA pour avoir accepté d'examiner notre travail.

Nous remercions enfin tous ceux qui nous ont apporté leur aide, morale ou autre, pour mener à terme ce travail, et nous pensons plus particulièrement à Monsieur M.S BENSAOUD, Monsieur et Madame BENSEBIA et Mademoiselle H.HASNAOUI.

Table de matière

| | |
|---|----|
| Introduction | 1 |
| Chapitre I : Concepts généraux et problématique | 3 |
| I.1. Ateliers multi-produits | 4 |
| I.2. Aperçu sur les formes d'organisation des ateliers | 4 |
| I.2.1. Implantation en section homogène | 4 |
| I.2.2. Décomposition en îlots de fabrication | 6 |
| I.2.3. Implantation en ligne | 7 |
| I.2.3.1. Avantages et inconvénient | 7 |
| I.2.3.2. Types de mouvements | 7 |
| I.3. Problématique | 9 |
| Chapitre II : Etat de l'art | 10 |
| II.1. Heuristique pour la construction de la séquence globale minimale. | 11 |
| II.1.1. Traitement des données | 11 |
| II.1.2. Heuristique | 12 |
| II.1.2.1. Algorithme | 12 |
| II.1.2.2. Exemple d'application | 13 |
| II.1.3. Remarques portées sur l'heuristique | 16 |
| II.1.4. Algorithme amélioratif | 16 |
| II.1.5. Propositions | 18 |
| II.2. Heuristique basée sur la similarité des séquences | 23 |
| II.3. Analyse de flux basée sur un réseau | 26 |
| II.3.1. Algorithme | 26 |
| II.3.2. Exemple d'application | 27 |
| II.3.3. Conclusion | 32 |
| II.4. Exploration par séparation et évaluation (Branch & Bound) | 33 |
| II.5. Modélisation mathématique | 34 |

| | |
|---|----|
| Chapitre III: Heuristique proposée | 38 |
| III.1. Introduction aux algorithmes approchés | 39 |
| III.1.1. Algorithmes itératifs | 39 |
| III.1.1.1. Algorithmes de voisinage | 40 |
| III.1.1.2. Algorithmes procédant par relaxations successives | 41 |
| III.1.1.3. Fiabilité d'un algorithme itératif | 41 |
| III.1.2. Algorithmes gloutons | 42 |
| III.1.2.1. Critère du coût moyen et extension | 42 |
| III.1.2.2. Critère du coût marginal pour les fonctions d'ensemble | 43 |
| III.1.2.3. Critère du regret maximum | 43 |
| III.2. Heuristique proposée | 44 |
| III.2.1. La ligne fonctionnelle | 44 |
| III.2.1.1. Ligne initiale | 45 |
| III.2.1.2. Ligne intermédiaire | 47 |
| III.2.1.2.1. Matrice de contribution | 47 |
| III.2.1.2.2. Ordre d'intégration des pools | 51 |
| III.2.1.2.3. Vecteur de contribution | 56 |
| III.2.1.3. Ligne finale | 62 |
| III.2.2. La ligne opérationnelle | 62 |
| III.2.2.1. Algorithme de distribution | 63 |
| III.2.2.1.1. Positions d'insertion possibles | 63 |
| III.2.2.1.2. Algorithme | 65 |
| III.2.2.2. Réaffectation des produits | 66 |
| III.2.2.3. Adéquation charge-capacité | 66 |
| III.2.2.4. Marge d'acceptation du taux de charge | 68 |
| Chapitre IV: Application industrielle | 70 |
| IV.1. Présentation de l'atelier "Ferrures" | 71 |
| IV.2. Construction de la ligne fonctionnelle | 73 |
| IV.2.1. Notions utilisées | 73 |
| IV.2.1.1. La notion d'échange | 73 |

| | |
|---|----|
| IV.2.1.2. Les retours engendrés | 75 |
| IV.2.1.3. Distance de flux et backtracking | 76 |
| IV.2.2. Etapes de construction de la ligne | 76 |
| IV.2.2.1. Ligne initiale | 76 |
| IV.2.2.2. Ligne intermédiaire | 80 |
| IV.2.2.3. Ligne finale | 81 |
| IV.3. Construction de la ligne opérationnelle | 82 |
| IV.3.1. Présentation des données | 82 |
| IV.3.1.1. Adéquation charge-capacité | 83 |
| IV.3.2. Résultats obtenus | 87 |
| IV.3.3. Ligne finale | 90 |
| IV.3.4. Analyse du flux de production | 90 |
| IV.4. Résultats | 91 |
| IV.4.1. Ligne de 16 pools | 91 |
| IV.4.2. Ligne des 20 pools | 91 |
| IV.5. Programme informatique | 93 |
| Conclusion | 94 |
| Bibliographie | |
| Liste des tableaux | |
| Liste des figures | |
| Liste des annexes | |
| Annexes | |

Introduction

Parmi les différentes formes d'organisation des ateliers multi-produits, l'organisation en ligne est sans doute la plus souhaitée, pour la clarté du flux qu'elle permet d'avoir.

Différentes approches ont été utilisées pour la mise en ligne, dont une modélisation mathématique en programme linéaire à variables bivalentes. Le problème de complexité posé par cette méthode de résolution, définit la problématique de notre travail.

Nous proposons d'élaborer une méthode heuristique, remédiant au problème de complexité, tout en donnant une solution acceptable. L'heuristique à élaborer, doit nous permettre l'obtention d'une ligne par une manière simple et fiable, d'un atelier donné.

Notre travail est structuré en quatre chapitres selon la démarche suivante:

La premier chapitre intitulé 'Concepts généraux et problématique', présente les différentes formes d'organisation des ateliers multi-produits, avec pour corollaire, la définition d'un atelier multi-produits. Nous présentons dans ce chapitre l'implantation en section homogène, l'implantation en îlots de fabrication et l'implantation en ligne. Ce chapitre se termine par la présentation de la problématique.

Introduction

Dans le deuxième chapitre 'Etat de l'art', on traite la mise en ligne par différentes approches, des méthodes heuristiques tirées de la littérature se résumant en trois volets, à savoir la construction d'une séquence globale minimale, méthode basée sur la similarité des séquences et analyse du flux basée sur un réseau, et des méthodes exactes, dont, l'exploration par séparation et évaluation (Branch & Bound) et la modélisation mathématique.

Nous présentons au troisième chapitre, une introduction aux algorithmes approchés (algorithmes itératifs et gloutons), ainsi que l'heuristique que nous avons élaboré.

Une application industrielle est présentée dans le dernier chapitre, ce qui permettra de tester la fiabilité de notre approche. Cette application a été menée dans l'atelier 'Ferrures' du complexe des véhicules industriels de Rouiba, le chapitre comporte la présentation de cet atelier, les données du problème, l'application de l'heuristique, les résultats obtenus et enfin, un aperçu sur le programme informatique élaboré pour l'implémentation de l'heuristique.

En conclusion, nous mettrons l'accent sur les différentes perspectives de développement de ce travail.

CHAPITRE I :

Concepts généraux et problématique

I.1. Ateliers Multi-produits

I.2. Aperçu sur les méthodes d'organisation des ateliers

I.2.1. Implantation en section homogène

I.2.2. Implantation en îlots de fabrication

I.2.3. Implantation en ligne

I.2.3.1. Avantages et inconvénients

I.2.3.2. Types de mouvements

I.3 Problématique

CHAPITRE I : Concepts généraux et problématique

I.1. Ateliers multi-produits

Un atelier multi-produits est un système de production où l'on retrouve différentes machines (moyens de production) pour la fabrication de divers produits, pour lesquels on associe une gamme de fabrication qui représente l'enchaînement des opérations d'usinage et le temps de traitement pour chaque opération.

I.2. Aperçu sur les formes d'organisation des ateliers

Parmi les formes d'organisation de flux de production utilisées dans les ateliers, nous citerons l'implantation en section homogène, l'implantation en îlots de fabrication et l'implantation en ligne.

I.2.1. Implantation en section homogène

L'implantation en section homogène revient à regrouper les machines selon le type d'opération qu'elles effectuent. Ainsi dans un atelier donné, on retrouvera une section de fraisage, une section de perçage...etc.

Il est à noter que ce type d'implantation est à conseiller dans un système où il y aurait une multitude de produits à fabriquer et dont les gammes de fabrication sont très différentes.

Nous présentons, ci-dessous, un exemple de gamme de fabrication d'un atelier multi-produits.

Exemple :

Soit un atelier de mécanique, spécialisé dans l'usinage des pièces d'un moteur automobile. L'usinage de ces pièces nécessite, à titre d'exemple, des tours, des fraiseuses, des rectifieuses, des perceuses et des aléseuses.

Désignation des machines :

Tour : T
Fraiseuse : F
Perceuse : P
Aléseuse : A
Rectificuse : R

La désignation des pièces est présentée sur le tableau (I.1) :

Tableau I.1 : Désignation des pièces

| Références des pièces | Opérations d'usinage | Temps d'usinage en unités de temps (u.t) | | | | |
|-----------------------|----------------------|--|-----|-----|-----|-----|
| P1 | R P T F R | 2.5 | 1.0 | 3.2 | 1.5 | 4.0 |
| P2 | T R P F | 5.6 | 3.1 | 2.0 | 1.0 | |
| P3 | R P R A | 4.3 | 5.1 | 5.0 | | |
| P4 | T P R A | 5.1 | 2.0 | 6.0 | 3.5 | |

Ainsi la pièce P1 aura la gamme de fabrication suivante :

- une rectification de 2.5 (u.t)
- un perçage de 1.0 (u.t)
- un tournage de 3.2 (u.t)
- un fraisage de 1.5 (u.t)
- une rectification de 4.0 (u.t)

où (u.t.) représente l'unité de temps.

On présente sur la figure (I.1.) le chemin des pièces P2 et P4 de l'exemple [7].

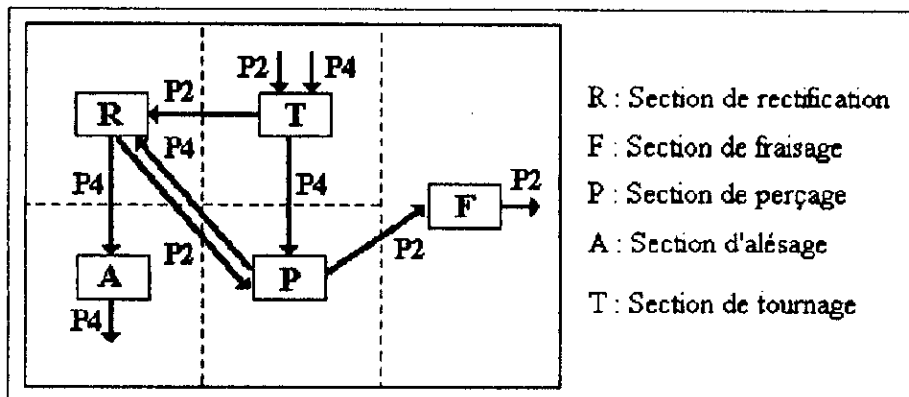


Figure I.1. : Implantation en section homogène

Parmi les inconvénients que présente l'organisation en section homogène citons :

- un ordonnancement très complexe et très difficile à manipuler, vu que la nature de l'implantation ne permet pas d'avoir un lien particulier entre les machines et les produits [7];
- les postes voisins dans le processus de fabrication d'un produit donné, peuvent être très éloignés l'un de l'autre en étant dans des sections différentes, ce qui aura pour effet d'augmenter considérablement les temps de manutention [6];
- l'importance des lots de transfert engendre des temps d'attente très importants créant des en-cours considérables, ce qui représente un capital immobilisé, et l'entreprise n'en tire aucun profit [1].

1.2.2. Implantation en îlots de fabrication

La décomposition en îlots de fabrication est la création de sous-ateliers spécialisés dans des tâches spécifiques. Cette manière de faire nécessite le partitionnement de l'ensemble des produits fabriqués, en familles de produits et la décomposition des tâches en sous-systèmes de production. Ceci se fera selon une logique de technologie, en essayant de déterminer les analogies existantes entre les gammes de fabrication des produits.

En matière de flux de production, le souci de la décomposition en îlots de fabrication est de minimiser les mouvements des produits s'effectuant entre les îlots, tout en réduisant leurs tailles. Il est à noter que cette démarche permet de faciliter la gestion de l'atelier et de réduire la taille des problèmes de planification des tâches [1], [4], [12].

I.2.3. Implantation en ligne

L'implantation en ligne, est l'agencement des machines selon un ordre respectif de l'enchaînement des opérations de fabrication des produits envisagés (figure I.2.) [7].

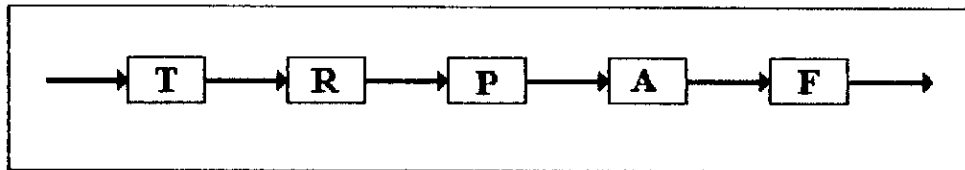


Figure I.2 : Implantation en ligne

Cette manière de procéder est caractérisée par des flux de production continus. Elle est dite aussi "fabrication de grandes séries", ce qui n'exclut pas d'avoir des lignes spécialisées dans les fabrication de moyennes séries, dont les débits sont équilibrés par la création volontaire de stocks entre les postes de travail [7].

I.2.3.1. Avantages et inconvénients

L'implantation en ligne permet d'avoir de courtes distances de transfert, ce qui réduit le temps de transport, le cycle de fabrication et donc le coût de revient. Elle permet également d'avoir des lots de transfert à taille très réduite, ce qui réduit les en-cours et donc l'appel en fonds de roulement [1], [6], [7].

Cependant, la mise en ligne, est déconseillée pour un système de production où la conception de produits nouveaux est très fréquente. Ceci étant dû à l'allure de la ligne actuelle qui pourrait ne pas correspondre aux gammes de fabrication de ces nouveaux produits; ce qui la rend par conséquent très rigide [7].

I.2.3.2 Types de mouvements

Dans une ligne, quatre types de mouvement des produits sont possibles (Fig. I.3 et I.4) :

-le retour :

Un retour a lieu, lorsque le produit nécessite le passage sur une machine qui se trouve avant sa position actuelle dans la ligne.

Aussi, dans une étude d'implantation en ligne, il est recherché une clareté du flux en minimisant les retours. En effet ces derniers pénalisent le sens d'écoulement unique du flux de production (anti-flux);

-le saut :

Un saut a lieu, lorsque le produit nécessite le passage sur une machine non adjacente et se trouvant après sa position actuelle dans la ligne. Le saut ne perturbe pas le sens du flux de production mais peut compliquer la manutention;

-l'opération répétée :

Une opération qui est répétée ne perturbe pas le sens du flux de production et n'a par conséquent aucun effet négatif sur la qualité de la ligne;

-le passage en succession :

Le passage en succession est le mouvement le plus escompté dans une organisation en ligne, car il est unidirectionnel et justifie l'agencement des machines dans la ligne. Pour ce type de mouvement, les distances parcourues par les produits sont courtes et donc, leur temps de transport en est réduit [6].

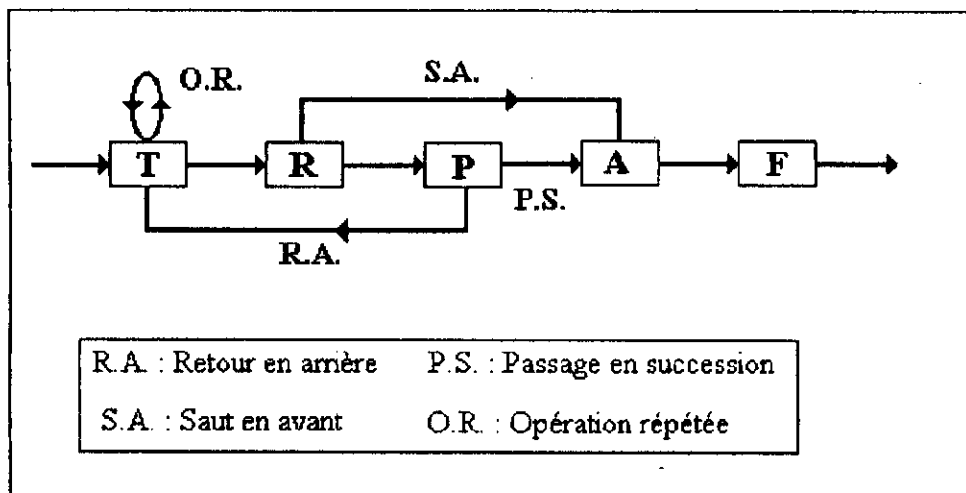


Figure I.3 : Types de mouvements dans une ligne

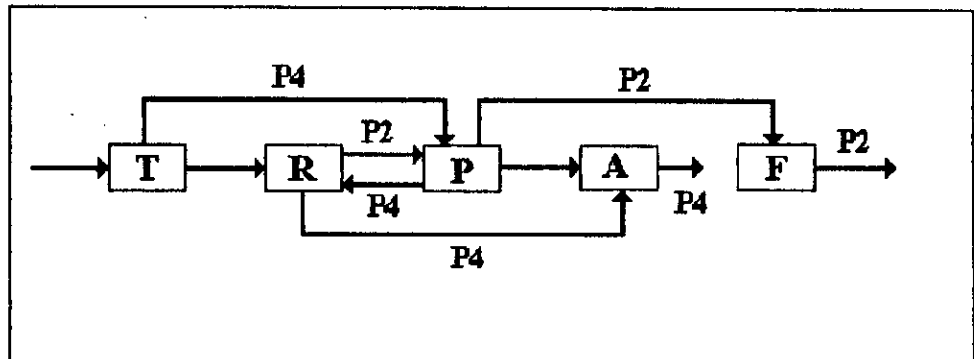


Figure I.4 : Passage des pièces P2 et P4 dans une application à l'exemple précédent

I.3. Problématique

La mise en ligne a été approchée par différentes méthodes. Parmi ces méthodes, une modélisation mathématique sous la forme d'un programme linéaire à variables bivalentes.

Cette méthode a fait l'objet d'un travail antérieur dans le cadre d'un projet de fin d'études [2]. L'application du modèle à un cas pratique a révélé des difficultés quant à sa résolution. En effet, le modèle mathématique est caractérisé par des nombres de variables et de contraintes de l'ordre de N^2 , où N est le nombre de machines à mettre en ligne.

La complexité du modèle mathématique rend sa résolution, lorsqu'il s'agit de problèmes de taille importante, quasi impossible.

Notre travail consiste donc à élaborer une heuristique pour laquelle la taille du problème ne constitue pas une contrainte restrictive.

CHAPITRE II :

Etat de l'art

II.1. Heuristique pour la construction de la S G M

II.1.1. Traitement des données

II.1.2. Heuristique

II.1.2.1. Algorithme

II.1.2.2. Exemple d'application

II.1.3. Critique de l'heuristique

II.1.4. Algorithme amélioratif

II.1.5. Propositions

II.2. Heuristique basée sur la similarité des séquences

II.3. Analyse du flux basée sur un réseau

II.3.1. Algorithme

II.3.2. Exemple d'application

II.3.3. Conclusion

II.4. Exploration par séparation et évaluation (Branch & Bound)

II.5. Modèle mathématique pour la mise en ligne d'un atelier multi-produits

CHAPITRE II : Etat de l'art

Nous présentons, ci-après, quelques approches de résolution pour la mise en ligne, dont des méthodes heuristiques et des méthodes exactes.

II.1. Heuristique pour la construction d'une séquence globale minimale [13]

La séquence globale minimale est une séquence minimale de machines de telle manière qu'une série de pièces, qui doivent passer sur certaines machines et selon un certain ordre, n'ait à parcourir la séquence que dans un seul sens. Cette séquence peut contenir plusieurs fois la même machine et une pièce qui la parcourt peut en éviter certaines.

Le problème se présente dans un système de fabrication de pièces différentes, dit "atelier multi-produits". A chaque pièce correspond une séquence de machine appelée "gamme de fabrication" [13].

II.1.3. Traitement des données

a) Acquisition des données :

Les données du problème sont les suivantes :

- q : nombre de pièces fabriquées par le système.
- m : nombre de types de machines sollicitées.
- nm : nombre de machines dans la gamme de la pièce e.
- I(e,i) : indice de la ième machine de la gamme de la pièce e.

b) Elimination des gammes multiples :

Par souci de minimiser le nombre de gammes à traiter, on écarte toutes les gammes qui sont contenues dans d'autres gammes.

II.1.4. Heuristique

L'heuristique proposée pour la construction de la séquence globale minimale est de nature itérative.

A l'itération k :

- Pour chaque machine i (appartenant à l'intervalle $[1, \dots, m]$), on considère le rapport $NF^k(i)/NT^k(i)$ appelé $PRIMO^k(i)$ "priority machine order";

où :

$NF^k(i)$: nombre de fois où la machine i est la dernière machine de la séquence à l'itération k .

$NT^k(i)$: nombre de fois où la machine i est présente dans l'ensemble des gammes à l'itération k .

- On place la machine ayant le plus grand $PRIMO^k$ avant le dernier placement déjà effectué; au cas d'un ex-æquo, on retient la machine la plus présente;

- Ce choix étant fait, on supprime la machine retenue de toutes les fins de séquences puis on passe à l'itération $k+1$.

Critère d'arrêt :

On s'arrête lorsque toutes les gammes sont vides, ainsi la Séquence Globale Minimale obtenue aura contenue toutes les gammes de fabrication [13].

II.1.2.1. Algorithme

Initialisation :

A partir du tableau des données sur les gammes de fabrication, on construit le vecteur des nombres d'utilisation des machines dans le système : $NT^1(i)$; $k = 1$.

Itération :

Faire

1 : construire le vecteur des nombres de présence des machines à la fin de chaque séquence :

$NF^k(i)$.

2 : calculer la fonction priorité $PRIMO^k(i) = NF^k(i) / NT^k(i)$.

3 : déterminer la machine prioritaire, pour laquelle $\text{Max} \{ \text{PRIMO}^k(i), i: [1...m] \}$

si plusieurs machines correspondent à ce Max,

alors prendre la machine ayant le $\text{Max} \{ \text{NF}^k(i) \}$

si plusieurs machines correspondent à ce Max

alors choisir aléatoirement une de ces machines

fin si;

4 : réactualisation du nombre de présence de la machine prioritaire choisie :

$$\text{NT}^{k+1}(c) = \text{NT}^k(c) - \text{NF}^k(c); c \text{ étant l'indice de la machine choisie à l'itération } k.$$

5 : élimination de la machine c des fins de séquences.

6 : placer cette machine à la k ème position en partant de la droite.

7 : $k = k + 1$;

8 : si toutes les machines d'une certaine gamme sont éliminées alors $q = q - 1$.

tant que ($q \neq 0$).

II.1.2.2. Exemple d'application

Soient les gammes de fabrication suivantes :

p1 : m1 m2 m4 m5 m2

p2 : m2 m3 m1 m3

p3 : m4 m1 m3

p4 : m5 m4 m2 m3

p5 : m2 m1 m2 m5

Initialisation :

$$\text{NT}^1(1) = 4; \text{NT}^1(2) = 6; \text{NT}^1(3) = 4; \text{NT}^1(4) = 3; \text{NT}^1(5) = 3$$

Itération 1 :

| Séquence | Machine | NT ¹ | NF ¹ | PRIMO ¹ | Choix |
|-----------|---------|-----------------|-----------------|--------------------|-------|
| 1-2-4-5-2 | 1 | 4 | 0 | 0 | |
| 2-3-1-3 | 2 | 6 | 1 | 1/6 | |
| 4-1-3 | 3 | 4 | 3 | 3/4 | 3 |
| 5-4-2-3 | 4 | 3 | 0 | 0 | |
| 2-1-2-5 | 5 | 3 | 1 | 1/3 | |

On choisit la machine 3
S G M courante : 3

Itération 2 :

| Séquence | Machine | NT ² | NF ² | PRIMO ² | Choix |
|-----------|---------|-----------------|-----------------|--------------------|-------|
| 1-2-4-5-2 | 1 | 4 | 2 | 1/2 | 1 |
| 2-3-1-3 | 2 | 6 | 2 | 1/3 | |
| 4-1 | 3 | 1 | 0 | 0 | |
| 5-4-2 | 4 | 3 | 0 | 0 | |
| 2-1-2-5 | 5 | 3 | 1 | 1/3 | |

On choisit la machine 1
S G M courante : 1 3

Itération 3 :

| Séquence | Machine | NT ³ | NF ³ | PRIMO ³ | Choix |
|-----------|---------|-----------------|-----------------|--------------------|-------|
| 1-2-4-5-2 | 1 | 2 | 0 | 0 | |
| 2-3 | 2 | 6 | 2 | 1/3 | |
| 4 | 3 | 1 | 1 | 1 | 3 |
| 5-4-2 | 4 | 3 | 1 | 1/3 | |
| 2-1-2-5 | 5 | 3 | 1 | 1/3 | |

On choisit la machine 3
S G M courante : 3 1 3

Itération 4 :

| Séquence | Machine | NT ⁴ | NF ⁴ | PRIMO ⁴ | Choix |
|-----------|---------|-----------------|-----------------|--------------------|-------|
| 1-2-4-5-2 | 1 | 2 | 0 | 0 | |
| 2 | 2 | 6 | 3 | 1/2 | 2 |
| 4 | 3 | 0 | 0 | 0 | |
| 5-4-2 | 4 | 3 | 1 | 1/3 | |
| 2-1-2-5 | 5 | 3 | 1 | 1/3 | |

On choisit la machine 2
S G M : 2 3 1 3

Itération 5 :

| Séquence | Machine | NT ⁵ | NF ⁵ | PRIMO ⁵ | Choix |
|----------|---------|-----------------|-----------------|--------------------|-------|
| 1-2-4-5 | 1 | 2 | 0 | 0 | |
| 4 | 2 | 3 | 0 | 0 | |
| 5-4 | 4 | 3 | 2 | 2/3 | 4 |
| 2-1-2-5 | 5 | 3 | 2 | 2/3 | 5 |

On choisit arbitrairement
la machine 4
S G M : 4 2 3 1 3

Itération 6 :

| Séquence | Machine | NT ⁶ | NF ⁶ | PRIMO ⁶ | Choix |
|----------|---------|-----------------|-----------------|--------------------|-------|
| 1-2-4-5 | 1 | 2 | 0 | 0 | |
| | 2 | 3 | 0 | 0 | |
| 5 | 4 | 1 | 0 | 0 | |
| 2-1-2-5 | 5 | 3 | 3 | 1 | 5 |

On choisit la machine 5
S G M : 5 4 2 3 1 3

Itération 7 :

| Séquence | Machine | NT ⁷ | NF ⁷ | PRIMO ⁷ | Choix |
|----------|---------|-----------------|-----------------|--------------------|-------|
| 1-2-4 | 1 | 2 | 0 | 0 | |
| | 2 | 3 | 0 | 1/3 | |
| 2-1-2 | 4 | 1 | 1 | 1 | |
| 2-1-2-5 | 5 | 3 | 3 | 1 | 4 |

On choisit la machine 4
S G M : 4 5 4 2 3 1 3

Itération 8 :

| Séquence | Machine | NT ⁸ | NF ⁸ | PRIMO ⁸ | Choix |
|----------|---------|-----------------|-----------------|--------------------|-------|
| 1-2 | 1 | 2 | 0 | 0 | |
| 2-1-2 | 2 | 3 | 2 | 2/3 | 2 |

On choisit la machine 2
S G M : 2 4 5 4 2 3 1 3

Itération 9 :

| Séquence | Machine | NT ⁹ | NF ⁹ | PRIMO ⁹ | Choix |
|----------|---------|-----------------|-----------------|--------------------|-------|
| 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 |
| 2-1 | 2 | 1 | 0 | 0 | |

On choisit la machine 1
S G M : 1 2 4 5 4 2 3 1 3

Itération 10 :

A cette itération il ne reste qu'une seule opération (machine 2 : première séquence du produit 5), elle représentera la dernière machine à intégrer.
S G M finale : 2 2 4 5 4 2 3 1 3

Passage des produits dans la S G M :

| | | | | | | | | | | | | | |
|----|---|---|---|---|---|-----------|---|---|-----------|---|---|---|---|
| P1 | 2 | 1 | → | 2 | → | 4 | → | 5 | 4 | 2 | 3 | 1 | 3 |
| | | | | | | | | | └───┬───┘ | | | | |
| P2 | 2 | 1 | 2 | 4 | 5 | 4 | 2 | → | 3 | → | 1 | → | 3 |
| P3 | 2 | 1 | 2 | 4 | 5 | → | 4 | → | 2 | → | 3 | 1 | → |
| | | | | | | | | | └───┬───┘ | | | | |
| P4 | 2 | 1 | 2 | 4 | 5 | 4 | 2 | 3 | 1 | 3 | | | |
| P5 | 2 | → | 1 | → | 2 | 4 | 5 | 4 | 2 | 3 | 1 | 3 | |
| | | | | | | └───┬───┘ | | | | | | | |

Figure II.1 : Passage des pièces dans la S G M finale

II.1.3. Critique de l'heuristic

Parmi les inconvénients de la S G M, nous pouvons citer :

- une ligne de longueur pouvant être très importante;
- une application réelle très délicate;
- une duplication sans mesure des machines.

En effet, pour l'exemple traité où le nombre de produits n'est pas énorme (cinq) la SGM obtenue a une longueur de 10 machines. Aussi dans un cas défavorable où une superposition des séquences de fabrication des produits ne serait pas possible (gammes très différentes avec une multitude de machines), la longueur de la ligne pourrait atteindre :

$$L = \sum_{i=1}^{NP} LG(i) \quad (II.1)$$

où :

$LG(i)$ est la longueur de la gamme du produit i et NP le nombre de produits

ce qui rend son application très délicate.

Ainsi pour un atelier fabriquant quelques centaines de produits, avec des gammes de longueur moyenne de 4 opérations, nous obtiendrons une SGM de longueur avoisinant les 400 machines, ce qu'aucun atelier ne permet d'implanter.

La duplication des machines est à l'origine de tous ces problèmes. Dans un cas défavorable où la superposition des gammes n'est pas possible, on obtiendrait une SGM où un grand nombre de machines sera dupliqué. Ne tenant pas compte de la disponibilité des machines, cette manière de faire n'est pas très pratique.

II.1.4. Algorithme amélioratif

Dans le souci de réduire le longueur de la SGM, il a été établi une méthode exacte pour sa détermination. Celle-ci repose sur le principe d'énumération de toutes les SGM possibles. Le passage de l'itération k à l'itération $(k+1)$ ne se fait pas par le choix de la machine ayant le plus grand primo, mais en considérant toutes les machines ayant un primo non nul, ce qui

nous amène à développer des branches et à construire une arboréscence où chaque branche représente une allure de la SGM.

Une étude de la complexité de cet algorithme, nous montre l'importance de l'arboréscence créée. Ainsi dans un cas défavorable où à chaque itération K, toutes les machines ont un primo non nul, et pour lequel une superposition des gammes n'est pas possible et donc une SGM de longueur importante, le nombre de branches à créer sera :

$$NB = \sum_{k=1}^L (NM)^k \quad (II.2)$$

où:

NB est le nombre de branches, NM le nombre de machines et L la longueur moyenne de la SGM.

Ainsi, pour un exemple pour lequel on a $NM=3$ et $L=10$, $NB = \sum_{k=1}^{10} (3)^k$ et serait de

l'ordre de 80000 branches, ce qui est énorme du point de vue temps de l'arboréscence.

Pour l'exemple considéré, on a :

| Itération | Primo # 0 | Nombre de branches |
|-----------|-----------|--------------------|
| 1 | 3 | 3 |
| 2 | 3 | 9 |
| 3 | 4 | 36 |
| 4 | 3 | 108 |
| 5 | 2 | 216 |
| 6 | 1 | 216 |
| 7 | 2 | 432 |
| 8 | 1 | 432 |
| 9 | 1 | 432 |

Nombre total de branches : 1886

Résultat de l'application :

S G M : 2 1 2 4 5 4 2 3 1 3

Le même résultat est obtenu par l'algorithme, ce qui signifie qu'aucune amélioration de la SGM n'est possible pour ce cas.

II.1.5. Propositions

Proposition 1 :

Pour remédier au problème de duplication et en tenant compte de la disponibilité des machines dans la construction de la ligne, nous avons modifié le résultat obtenu par la SGM comme suit :

-la démarche contient autant d'étapes que de machines;

-à chaque étape une machine donnée est éliminée de toutes les positions sauf d'une, ce qui nous permettra de déterminer sa position optimale dans la ligne (celle qui minimise les retours en arrière). Toutes les positions ayant été déterminées, on construit la ligne selon l'ordre obtenu.

Considérant l'exemple précédent pour lequel la duplication n'est pas possible compte tenu d'une disponibilité égale à 1 pour chacune des machines.

La SGM obtenue est la suivante :

2 1 2 4 5 4 2 3 1 3
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Etape 1: élimination de la machine 1

| Position | Ligne | Retours |
|----------|---------------|---------|
| 1 | 2 1 2 4 5 4 2 | 1+1=2 |
| 2 | 2 4 5 4 2 3 1 | 1+1=2 |

Etape 2 : élimination de la machine 2

| Position | Ligne | Retours |
|----------|-----------------|------------|
| 1 | 2 1 4 5 4 3 1 3 | 2+1+ 1+1=5 |
| 2 | 1 2 4 5 4 3 1 3 | 1+1+1+1=4 |
| 3 | 1 4 5 4 2 3 1 3 | 1+2=3 |

Etape 3 : élimination de la machine 3

| Position | Ligne | Retours |
|----------|-------------------|---------|
| 1 | 2 1 2 4 5 4 2 3 1 | 1+1=2 |
| 2 | 2 1 2 4 5 4 2 1 3 | 1=1 |

Etape 4 : élimination de la machine 4

| Position | Ligne | Retours |
|----------|-------------------|-----------|
| 1 | 2 1 2 4 5 2 3 1 3 | 1 = 1 |
| 2 | 2 1 2 5 4 2 3 1 3 | 1 + 1 = 2 |

Résultat :

| Machines | Position optimale |
|----------|-------------------|
| 1 | 2, 9 |
| 2 | 7 |
| 3 | 10 |
| 4 | 4 |
| 5 | 5 |

Lignes correspondantes :

| Possibilité | Ligne | Retours |
|-------------|-----------|-----------------------|
| 1 | 1 4 5 2 3 | 1 + 1 + 1 + 1 + 2 = 6 |
| 2 | 4 5 2 1 3 | 2 + 1 + 1 + 2 = 6 |

Le résultat obtenu par l'application à notre exemple est satisfaisant. Cependant, il peut se présenter dans d'autres cas de figure une même position optimale pour des machines différentes et ceci à cause de l'inexistence de lien entre les différentes étapes.

Proposition 2 :

Pour remédier au problème sus-cité, nous avons modifié notre démarche de la manière suivante :

1. La démarche contient autant d'étapes que de machines;
2. A chaque étape on détermine la machine à éliminer comme suit:
 - la machine ayant le plus petit rapport (disponibilité / duplication);
 - la machine la plus présente;
 - la machine causant le minimum de retours;
3. On détermine la position optimale de cette machine;
4. On maintient la machine dans cette position et on passe à l'étape suivante jusqu'à l'obtention d'une ligne finale.

Application à l'exemple précédent :

S G M : 2 1 2 4 5 4 2 3 1 3

Etape 1 : élimination de la machine 2 (rapport = 1/3)

| Possibilité | Ligne | Retours | Choix |
|-------------|-----------------|---------|-------|
| 1 | 2 1 4 5 4 3 1 3 | 2+1+1+1 | |
| 2 | 1 2 4 5 4 3 1 3 | 1+1+1+1 | |
| 3 | 1 4 5 4 2 3 1 3 | 1+2 | * |

Etape 2 : élimination de la machine 3 (rapport t = 1/2, présence = 4)

| Possibilité | Ligne | Retours | Choix |
|-------------|---------------|---------|-------|
| 1 | 1 4 5 4 2 3 1 | 1+1+1+2 | |
| 2 | 2 4 5 4 2 1 3 | 1+1+2 | * |

Etape 3 : élimination de la machine 1 (rapport t=1/2, présence = 4)

| Possibilité | Ligne | Retours | Choix |
|-------------|-------------|---------|-------|
| 1 | 1 4 5 4 2 3 | 1+1+1+2 | * |
| 2 | 4 5 4 2 1 3 | 2+1+2 | * |

Etape 4 : élimination de la machine 4 (rapport=1/2, présence=3)

| Possibilité | Ligne | Retours | Choix |
|-------------|-----------|---------|-------|
| 1 | 4 5 2 1 3 | 2+1+1+2 | * |
| 2 | 5 4 2 1 3 | 3+1+3 | |

La ligne finale est : 4 5 2 1 3, elle engendre 6 retours.

Cette manière de faire, a permis de lier les étapes entre elles; cependant elle présente toujours l'inconvénient de l'existence de plusieurs positions optimales (étape 3).

Proposition 3 :

Dans le souci de remédier aux inconvénients précédents, et pour réduire la complexité de la méthode, nous avons tenu compte de la disponibilité pendant la construction de la S G M.

La démarche à suivre est la suivante :

1. suivre l'algorithme de construction de la SGM;
2. si une duplication se présente et que la disponibilité ne le permet pas alors, déterminer la position donnant le minimum de retours;.
3. continuer la construction jusqu'à ce que toutes les séquences soient traitées.

Application à l'exemple :

Itération 1 : 3

Itération 2 : 1 3

Itération 3 : la machine 3 doit être dupliquée SGM : 3 1 3

| Possibilité | Ligne | Retours | Choix |
|-------------|-------|---------|-------|
| 1 | 1 3 | 1 | * |
| 2 | 3 1 | 1+1 | |

Itération 4 : 2 1 3

Itération 5 : 4 2 1 3

Itération 6 : 5 4 2 1 3

Itération 7 : la machine 4 doit être dupliquée SGM : 4 5 4 2 1 3

| Possibilité | Ligne | Retours | Choix |
|-------------|-----------|---------|-------|
| 1 | 4 5 2 1 3 | 3+1+3 | |
| 2 | 4 5 2 1 3 | 2+1+1+2 | * |

Itération 8 : la machine 2 doit être dupliquée SGM : 2 5 4 2 1 3

| Possibilité | Ligne | Retours | Choix |
|-------------|-----------|-----------|-------|
| 1 | 5 4 2 1 3 | 7 | |
| 2 | 2 5 4 1 3 | 3+1+1+1+2 | |
| 3 | 4 5 2 1 3 | 6 | * |
| 4 | 2 4 5 1 3 | 2+1+1+2+1 | |

Itération 9 : la machine 1 doit être dupliquée SGM : 1 4 2 1 3

| Possibilité | Ligne | Retours | Choix |
|-------------|-----------|-----------|-------|
| 1 | 4 5 2 1 3 | 6 | * |
| 2 | 1 4 5 2 3 | 1+1+1+1+2 | |

Itération 10 : la machine 2 doit être dupliquée S G M : 2 4 5 2 1 3

| Possibilité | Ligne | Retours | Choix |
|-------------|-----------|-----------|-------|
| 1 | 2 4 5 1 3 | 2+1+2+1 | * |
| 2 | 4 5 2 1 3 | 6 | |
| 3 | 2 1 4 5 3 | 2+1+1+2+1 | |
| 4 | 1 4 5 2 3 | 6 | |

Après toutes ces modifications et vu la persistance du problème du choix de ligne entre les étapes, à cause d'une égalité entre le nombre de retours et qui ne sont pas nécessairement causés par les mêmes gammes, nous avons tiré les conclusions suivantes :

Dans une application où le nombre de machines est très important la solution optimale ne pourrait pas être obtenue étant donné que :

1. L'élimination des machines pendant la construction peut nous éloigner de la solution optimale, car une position P1 écartée définitivement à l'itération K, parceque considérée non optimale, pourrait l'être dans une prochaine itération du fait qu'à cette itération, la séquence contiendrait plus de machines et le nombre de retours calculé deviendra alors plus significatif.

2. L'erreur sur le calcul des retours (la différence) est due à l'interaction existente entre certaines machines et qui n'est mise à l'évidence que si ces machines se trouvent dans la ligne courante. Aussi, pour une application où le nombre de machine est très important, cette interaction n'est pas prise en compte ce qui fera éloigner la solution de son optimum.

3. L'obtention de plusieurs solutions optimales est due à l'impossibilité de trancher, lorsqu' à une étape donnée, plusieurs lignes engendrent le même nombre de retours. Il faut alors, tenir compte de l'interaction entre les machines pour être plus près du nombre de retours réellement engendré par la ligne.

Ces conclusions seront prises en compte dans la partie "calcul du maximum de contribution", (III.2.1.2.1.) pour la construction de la ligne fonctionnelle. L'idée d'interaction entre les machines est à la base de l'heuristique élaborée pour la mise en ligne d'un atelier multi-produits qui sera développée dans la première partie du chapitre III (construction de la ligne fonctionnelle).

II.2. Heuristique basée sur la similarité des séquences [9]

Algorithme

1. Sélectionner le produit ayant la plus grande gamme, et prendre sa séquence comme ligne construite initiale du flux (L C F).
2. Pour chacun des produits restants, calculer son coefficient de similarité avec la L C F .
3. La sélection du prochain produit est basée sur son coefficient de similarité (C S); le produit ayant le plus grand coefficient de similarité indique que sa séquence est la plus similaire avec la L C F; alors le produit donnant le plus grand C S sera sélectionné.
4. La séquence de ce produit est intégrée dans la séquence de la L C F courante. Deux possibilités de L C F peuvent être construites par la modification de la L C F courante dans les directions " avant " et " arrière ".
5. Vérifier la disponibilité des machines/postes de travail pour les deux possibilités L C F, et éliminer les machines / postes de travail injustifiés. Sélectionner la possibilité de L C F en utilisant les règles suivantes:
 - 5.1. Si une seule possibilité de L C F satisfait la contrainte de disponibilité des postes de travail; elle sera alors sélectionnée.
 - 5.2. Si les deux possibilités satisfont la contrainte de disponibilité
 - 5.3. Si les deux possibilités n'arrivent pas à satisfaire les contraintes, celle qui crée le moindre backtracking après l'élimination des postes/ machines injustifiés sera sélectionnée.
 - 5.4. S'il y a égalité, sélectionner une possibilité, arbitrairement.
6. La L C F sélectionnée représente la nouvelle L C F. Répéter (2) à (5) jusqu'à ce que toutes les séquences des produits soient intégrées dans la L C F [9].

Exemple d'application :

Données : Les données sont résumées sur les tableaux suivants :

| Disponibilité des machines | | | | | | | |
|----------------------------|---|---|---|---|---|---|---|
| Postes de travail | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Disponibilité des machines | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

| Produit | Demande | Nombre d'opérations | Gamme |
|---------|---------|---------------------|-----------------------|
| 1 | 50 | 3 | 2 - 4 - 7 |
| 2 | 100 | 4 | 1 - 2 - 5 - 6 |
| 3 | 150 | 5 | 1 - 3 - 2 - 4 - 7 |
| 4 | 100 | 6 | 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 7 |

Itération 1 :

* Ligne initiale : Elle est constituée de la gamme du produit 4 (longueur de la gamme = 6).

LCF : 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 7

* Actualisation de la disponibilité des machines :

| Poste | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|----------|---|---|---|---|---|---|---|
| Machines | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

* Calcul des coefficients de similarité : Le calcul des coefficients de similarité est présenté ci-après :

| | | |
|--|-------------------------|-------------------------|
| Produit 1 : | Avant 2 - 4 - 7 | Arrière 2 - 4 - 7 |
| LCF : | → 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 7 | ← 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 7 |
| | CAV1 = 3 | CAR1 = 3 |
| $CS1 = (CAV1 + CAR1) / (2 \times N1) = (3 + 3) / (2 \times 3) = 1$ | | |

| | | |
|--|-------------------------|--------------------------|
| Produit 2 : | Avant 1 - 2 - 5 - 6 | Arrière 1 - 2 - 5 - 6 |
| LCF : | → 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 7 | ← 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 7 |
| | CAV2 = 3 | CAR2 = 3 |
| $CS2 = (CAV2 + CAR2) / (2 \times N2) = (3 + 3) / (2 \times 4) = 3 / 4$ | | |

| | | |
|--|----------------------------|------------------------------|
| Produit 3 : | Avant 1 - 3 - 2 - 4 - 7 | Arrière 1 - 3 - 2 - 4 - 7 |
| LCF : | → 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 7 | ← 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 7 |
| | CAV3 = 3 | CAR3 = 3 |
| $CS3 = (CAV3 + CAR3) / (2 \times N3) = (3 + 3) / (2 \times 5) = 3 / 5$ | | |

* Décision : Intégrer la gamme du produit "1" car elle donne le plus grand coefficient de similarité .

* Nouvelle L C F : 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 7 .

* Remarque : La nouvelle L C F est identique à l'ancienne parceque le coefficient de similarité de la gamme du produit intégré est égal à "1".

Itération 2 :

* Calcul des coefficients de similarité :

Produit 2 : $CS2 = 3 / 4$.

Produit 3 : $CS3 = 3 / 5$.

* Décision : Intégrer la gamme du produit "2" .

* Nouvelle L C F : 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 7 .

Itération 3 :

* Disponibilité = 0 machine dans chaque poste de travail.

* Calcul des coefficients de similarité :

| | | |
|--|---------------------------|---------------------------|
| | Avant | Arrière |
| Produit 3 : | 1 - 3 - 2 - 4 - 7 | 1 - 3 - 2 - 4 - 7 |
| L C F : | 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 7 | 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 7 |
| $CS3 = (4 + 4) / (2 \times 5) = 4 / 5$ | | |

* Décision : Intégrer la gamme du produit "3" (c'est le seul produit restant) .

* Nouvelle L C F :

Il y a deux possibilités de L C F :

L C F dans le sens " avant " : 1 - 2 - 3 - 2 - 4 - 5 - 6 - 7

L C F dans le sens " arrière " : 1 - 3 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 7

Après l'élimination des postes injustifiés (dupliqués et non disponibles), on obtient :

L C F " avant " : 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 7

L C F " arrière " : 1 - 3 - 2 - 4 - 5 - 6 - 7

III. 3. Analyse du flux basée sur un réseau

Les détails qui suivent illustrent les procédures de l'algorithme de l'analyse du flux basée sur un réseau. Le concept de base de cet algorithme est similaire à celui de l'heuristique basée sur la similarité des séquences, car les deux concepts prennent en considération la similarité des séquences pour la construction du chemin du flux [9].

III.3.1. Algorithme

1. Sélectionner le produit ayant la plus grande demande et prendre la gamme de ce produit comme réseau initial.

2. Sélectionner parmi les produits restants celui qui possède la plus grande demande.

3. Enumérer toutes les alternatives possibles de chemins dans le réseau restant.

4. Pour chaque chemin généré à l'espace 3, calculer les indices de similarité, CA (indice "avant") et CAR (indice "arrière").

5. Calculer le nombre de postes de travail manquant dans chaque direction PMA et PMAR dans les deux directions (avant et arrière). Le nombre de postes de travail manquant dans chaque direction est défini par la différence entre le nombre d'opérations du produit candidat P_i et l'indice de similarité de cette direction.

6. Pour les postes de travail manquant dans chaque chemin c'est à dire PMA et PMAR, il faut trouver le nombre de postes disponibles PDA et PDAR et les postes indisponibles PNA et PNAR tel que :

$$PMA = PDA + PNA$$

$$PMAR = PDAR + PNAR$$

7. Sélectionner le meilleur choix (Chemin et sens de modifications). Pour modifier, utiliser les règles suivantes :

7.1. Sélectionner le choix ayant le plus petit PN, qui pourrait être PNA ou PNAR (si PNA est plus petit que PNAR, alors le sens de modification est "l'avant" et vice-versa).

7.2. S'il y a égalité des valeurs de PN, sélectionner le choix donnant le plus petit possible PM (PMA ou PMAR) pour ces valeurs égales.

7.3. S'il y a égalité des valeurs de PM, sélectionner le choix donnant le plus grand indice de similarité pour ces valeurs égales.

7.4. S'il y a égalité des valeurs de l'indice de similarité, alors sélectionner arbitrairement l'un de ces choix égaux.

8. Modifier le chemin en utilisant les procédures de modification. Il y a deux procédures dont l'une est pour la modification "avant" et l'autre pour la modification "arrière". Elles sont présentées dans un algorithme. Le Si est la séquence ajustée du produit candidat Pi. C'est la séquence après l'élimination de ces " postes de travail manquant " qui ne sont pas disponibles.

Par exemple, supposons que l'on ait un produit ayant la séquence 1-2-3-4-5-6, le chemin sélectionné est 2-4-6-7-9 et le sens de modification est "l'avant". Après la comparaison de la séquence avec le chemin "avant", on trouve qu'il y a trois "postes de travail manquant" c'est à dire que $PMA = 3$. Ces postes manquant sont P1, P2 et P5. Si seulement P3 et P5 sont disponibles, alors la séquence ajustée sera 2-3-4-5-6 après l'élimination du poste P1 de la séquence. On utilise cete séquence " ajustée " pour modifier le chemin sélectionné.

9. Répéter les étapes (2) à (9) jusqu'à ce que toutes les séquences des produits soient invluses dans le réseau.

III.3.2. Exemple d'application

Les données de l'exemple d'application sont présentées su les tableaux suivants :

| | | | | | | | | |
|-------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Postes de travail | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Disponibilité | 2 | 2 | 1 | 2 | 3 | 2 | 1 | 1 |

| Produit | Demande | Nombre d'opérations | Séquences (en postes) |
|---------|---------|---------------------|-------------------------|
| 1 | 150 | 5 | 3—2—4—5—6 |
| 2 | 100 | 5 | 3—2—5—6—4 |
| 3 | 50 | 6 | 3—2—1—4—6—8 |
| 4 | 20 | 5 | 1—2—4—6—7 |

Initialement, le produit 4 est sélectionné car il a la plus grande demande, la configuration initiale est ainsi faite sur la base de la séquence du produit 4. A la seconde itération, le produit 1 est sélectionné parcequ'il a la plus grande demande parmi les produits restant; tous les chemins du réseau résultant de la première itération sont générés.

Du fait que la structure initiale est une ligne, il y a un seul chemin qui peut être trouvé dans le réseau initial. Les indices de similarité, le nombre de postes de travail qui manquent, le nombre de postes disponibles et le nombre de postes de travail indisponibles sont alors calculés.

Le nombre de postes de travail disponibles est déterminé par le calcul du nombre de postes parmi les postes manquant ayant une disponibilité positive. Il y a deux choix 1A et 1AR qui peuvent être générés par le chemin trouvé à l'itération 2.

Ces deux choix ont les mêmes opérations, mais leur comparaison et directions de la future modification sont différants (l'une est "avant" et l'autre est "arrière"). Les alternatives de modification (1A et 1 AR) à l'itération 2 sont toutes les deux bonnes et produisent les mêmes résultats, on sélectionne, alors arbitrairement, l'une des deux.

Le produit 2 est sélectionné à la troisième itération. Il y a quatre chemins différents qui peuvent être trouvés dans le réseau courant, et chacun d'eux a deux directions de modification, il y aurait donc au total, huit choix de modification. Le choix 4A est sélectionné pour la modification parcequ'il a le plus petit nombre de postes de travail indisponibles et le plus petit nombre de postes de travail manquant conformément à l'étape (7) de l'algorithme.

Le processus détaillé et le résultat de la troisième itération sont représentés. Des opérations similaires sont représentées à la dernière itération lorsque le dernier produit (produit 3) est sélectionné.

Itération 1 :

Décision : Sélectionner le produit 4 et construire la ligne initiale.

Le réseau initial (Une ligne) : $1 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 6 \rightarrow 7$

Itération 2 :

Disponibilité des postes de travail après l'itération 1 :

| Postes de travail | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|----------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Disponibilité des machines | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 1 | 0 | 1 |

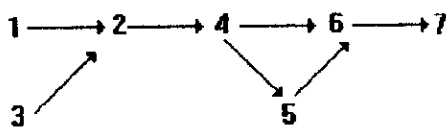
Produit candidat : 1

Séquence du produit : $3-2-4-5-6$. nombre d'opérations = 5

| N° | Chemin | Direction | P.M. | C.S. | Postes disponibles | P.N.D. |
|----|-----------|-----------|-------|------|--------------------|--------|
| 1 | 1-2-4-6-7 | A | 5-3=2 | 3 | 2 | 2-2= 0 |
| | | AR | 5-3=2 | 3 | 2 | 2-2= 0 |

Décision : Le choix 1A et 1AR étant tous les deux bons (Règles de l'étape - 7-), sélectionner arbitrairement 1A ou 1AR. Modifier le chemin 1 suivant l'une des directions ("Avant" ou "arrière"), ainsi la séquence du produit 1 sera incluse.

Le réseau actualisé sera :



Itération 3 :

Disponibilité des postes de travail après l'itération 2 :

| | | | | | | | | |
|----------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Postes de travail | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Disponibilité des machines | 1 | 1 | 0 | 1 | 2 | 1 | 0 | 1 |

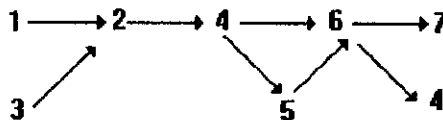
Produit candidat : 2

Séquence du produit : 3-2-5-6-4. nombre d'opérations = 5

| N° | Chemin | Direction | P.M. | C.S. | Postes disponibles | P.N.D. |
|----|-------------|-----------|-------|------|--------------------|--------|
| 1 | 1-2-4-6-7 | A | 5-2=3 | 2 | 2 | 3-2=1 |
| | | AR | 5-2=3 | 2 | 2 | 3-2=1 |
| 2 | 1-2-4-5-6-7 | A | 5-3=2 | 3 | 1 | 2-1=1 |
| | | AR | 5-2=3 | 2 | 2 | 3-2=1 |
| 3 | 3-2-4-6-7 | A | 5-3=2 | 3 | 3 | 2-2=0 |
| | | AR | 5-3=2 | 3 | 2 | 2-2=0 |
| 4 | 3-2-4-5-6-7 | A | 5-4=1 | 4 | 1 | 1-1=0 |
| | | AR | 5-3=2 | 3 | 2 | 2-2=0 |

Décision : Le choix 4A est le meilleur (Règle de l'étape -7.3-), sélectionner alors 4A . On modifie ainsi le chemin 4 dans la direction " avant ", ainsi, la séquence du produit 2 pourra être incluse dans le réseau :

Le réseau actualisé sera :



Itération 4 :

Disponibilité des postes de travail après l'itération 3 :

| | | | | | | | | |
|----------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Postes de travail | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Disponibilité des machines | 1 | 1 | 0 | 0 | 2 | 1 | 0 | 1 |

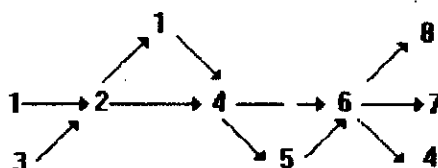
Produit candidat : 3

Séquence du produit : 3—2—1—4—6—8. Nombre d'opérations = 6

| N° | Chemin | Direction | P.M. | C.S. | Postes disponibles | P.N.D. |
|----|--------|-----------|-------|------|--------------------|--------|
| 1 | | A | 6-3=3 | 3 | 2 | 3-2=1 |
| | | AR | 6-3=3 | 3 | 2 | 3-2=1 |
| 2 | | A | 6-3=3 | 3 | 2 | 3-2=1 |
| | | AR | 6-3=3 | 3 | 2 | 3-2=1 |
| 3 | | A | 6-3=3 | 3 | 3 | 3-2=1 |
| | | AR | 6-3=3 | 3 | 2 | 3-2=1 |
| 4 | | A | 6-3=3 | 3 | 2 | 3-2=1 |
| | | AR | 6-3=3 | 3 | 2 | 3-2=1 |
| 5 | | A | 6-4=2 | 4 | 2 | 2-2=0 |
| | | AR | 6-4=2 | 4 | 2 | 2-2=0 |
| 6 | | A | 6-4=2 | 4 | 2 | 2-1=0 |
| | | AR | 6-4=2 | 4 | 2 | 2-2=0 |
| 7 | | A | 6-4=2 | 4 | 3 | 2-2=0 |
| | | AR | 6-4=2 | 4 | 2 | 2-2=0 |
| 8 | | A | 6-4=2 | 4 | 2 | 2-2=0 |
| | | AR | 6-4=2 | 4 | 2 | 2-2=0 |

Décision : Les choix 5A, 5AR, 6A, 6AR, 7A, 7AR, 8A et 8AR sont tous bons (Règles de sélection de l'étape -7-), on sélectionne arbitrairement l'un d'eux. On modifie le chemin du choix sélectionné, ainsi, la séquence du produit 3 pourra être incluse dans le réseau :

Le réseau actualisé sera :



III.3.3. Conclusion

Deux approches d'analyse de flux ont été présentées. A la différence d'autres méthodes, celles étudiées tiennent compte de la disponibilité des postes de travail et de la similarité des séquences dans le processus de construction, et d'un processus d'élimination pour les postes non disponibles.

L'approche basée sur un réseau donne plus de forme et d'information que l'approche de ligne proposée. Elle présente également des avantages dans la diminution de la distance du flux et plus d'indépendance de flux. Cependant, le processus de sélection pourrait être compliqué dès que le réseau devient important. La complexité du réseau peut être mesurée par le nombre de chemins qui peuvent être générés par le réseau. Le nombre total de chemins est calculé par l'expression :

$$\text{Nombre total de chemins} = \prod_{i=1, \dots, S} n_i \quad (\text{II.3})$$

(où S est le nombre total des sélections singulièrement liées et n_i , le nombre de sous-chemins dans la section i)

Etant donné le nombre de postes disponibles, le réseau aura un nombre important de chemins si tous les postes de travail disponibles sont intégrés dans le réseau et sont tous des nœuds de branchement, c'est à dire qui créent des branches quand ils sont intégrés dans le réseau.

La décision d'opter pour une méthode à utiliser dépend du problème et de l'objectif à atteindre. S'il n'y a pas une grande différence entre les séquences des produits, l'approche de réseau peut être utilisée, ainsi que l'approche de ligne.

Le problème de complexité posé par l'approche de réseau et l'hypothèse émise sur la similarité des séquences rendent ces heuristiques restreintes à une catégorie particulière de problème, d'où la nécessité de concevoir une autre manière de procéder.

II.4. Exploration et séparation et évaluation (Branch & Bound)

La solution optimale du problème de mise en ligne peut être, bien entendu, obtenue par l'énumération de toutes les possibilités d'emplacement des postes, et ce en utilisant la technique de Branch & Bound.

Ayant, par exemple, 4 postes à mettre en ligne, les gammes à fabriquer sont les suivantes :

Produit 1 : 4 - 3 - 2 - 1

Produit 2 : 3 - 2 - 1

Produit 3 : 2 - 1 - 4

Il y a 4! lignes possibles, soit 24 :

| Pos1 | Pos2 | Pos3 | Pos4 | Retours | f* | |
|------|------|------|------|------------|----|---|
| 4 | 3 | 2 | 1 | 2 | | 2 |
| 4 | 3 | 1 | 2 | 5 > f* | 2 | |
| 4 | 2 | 3 | 1 | 4 > f* | 2 | |
| 4 | 2 | 1 | 3 | 4 > f* | 2 | |
| 4 | 1 | 2 | 3 | 7 > f* | 2 | |
| 4 | 1 | 3 | 2 | 5 > f* | 2 | |
| 3 | 4 | 2 | 1 | 3 > f* | 2 | |
| 3 | 4 | 1 | 2 | 6 > f* | | 2 |
| 3 | 2 | 4 | 1 | 3 > f* | | |
| 3 | 2 | 1 | 4 | 1 | | 1 |
| 3 | 1 | 4 | 2 | 2+... > f* | | 1 |
| 3 | 1 | 2 | 4 | 2+... > f* | | 1 |
| 2 | 1 | 4 | 3 | 2 > f* | 1 | |
| 2 | 1 | 3 | 4 | 2+... > f* | | 1 |
| 2 | 3 | 4 | 1 | 2+... > f* | | 1 |
| 2 | 3 | 1 | 4 | 2+ > f* | | 1 |
| 2 | 4 | 3 | 1 | 1+1 > f* | | 1 |
| 2 | 4 | 1 | 3 | 1+1 > f* | | 1 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 2+... > f* | | 1 |
| 1 | 2 | 4 | 3 | 2+... > f* | | 1 |
| 1 | 3 | 4 | 2 | 2+... > f* | | 1 |
| 1 | 3 | 2 | 4 | 2+... > f* | | 1 |
| 1 | 4 | 2 | 3 | 2+... > f* | | 1 |
| 1 | 4 | 3 | 2 | 1+1 > f* | | 1 |

L'énumération exhaustive de toutes les possibilités permet l'obtention d'une ligne qui donne un minimum de retours, car on considère que tous les postes sont intégrés lors du calcul du nombre de retours engendrés, ce qui nous donne une évaluation juste de ce nombre.

Cette manière de faire est impossible, du point de vue complexité, qui est mesurée par le nombre de permutations, qui peuvent avoir lieu : N ! .

II.5. Modèle mathématique pour la mise en ligne d'un atelier multi-produit [2]

Une formulation de base a été élaborée pour rechercher une ligne fonctionnelle reliant tous les pools de manière à maximiser le flux principal, elle se présente comme suit :

$$\text{MaxF} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N A_{ij} X_{ij} \quad \forall S \subset H \quad (\text{II.4})$$

sous les conditions suivantes :

$$\sum_{i=1}^N X_{ij} = 0 \quad \forall j \in N \text{ tel que } j \neq 0 \quad (\text{II.5})$$

$$\sum_{i=1}^N X_{ij} = 0 \quad j = 0$$

$$\sum_{i=1}^N X_{ij} = 0 \quad \forall j \in N \text{ tel que } j \neq 0 \quad (\text{II.6})$$

$$\sum_{i=1}^N X_{ij} = 0 \quad i = N + 1$$

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

où :

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

A_{ij} représente l'échange total du pool i vers le pool j ;

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

Les expressions (II.5) et (II.6) sont des conditions de contraintes de degrés et l'équation (II.7) est une contrainte d'intégrité.

Il s'avère que cette formulation n'assure pas l'obtention d'une seule ligne intégrant tous les moyens de production.

Pour remédier à ce problème, il y a eu recours à une contrainte utilisée essentiellement dans le problème classique du voyageur de commerce pour l'élimination des sous-tournées entre les villes, elle se présente comme suit :

$$\sum_{j \in S} \sum_{i \in S} X_{ij} \leq |S| - 1 \quad \forall i, j \in H \quad S \neq \emptyset \quad (\text{II.8})$$

Afin de perfectionner le modèle de base, deux transformations ont été introduites :

Première transformation :

On définit une variable notée (Z_{ij}) et indiquant l'existence de sauts du pool i vers le pool j dans la ligne optimale et $(1-X_{ij}-Z_{ij})$ indique si le pool i est après j dans la ligne optimale.

A la différence de la formulation de base, le nouveau critère est la maximisation du flux principal en minimisant les sauts et les retours avec des poids différents. Le modèle obtenu est le suivant :

$$\text{Max } F = \alpha \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N A_{ij} X_{ij} - \beta \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N A_{ij} Z_{ij} - \delta \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N A_{ij} (1 - X_{ij} - Z_{ij}) \quad (\text{II.9})$$

sous les contraintes suivantes :

$$\sum_{i=1}^N X_{ij} = 1 \quad \forall j \in H \text{ tel que } j \neq 0 \quad (\text{II.10})$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N X_{ij} &= 0 & j=0 \\ \sum_{j=1}^{N+1} X_{ij} &= 0 & \forall i \in H \text{ tel que } i \neq N+1 \end{aligned} \quad (\text{II.11})$$

$$\sum_{j=1}^N X_{ij} = 0 \quad i = N+1$$

$$\sum_{j \in S} \sum_{i \in S} X_{ij} \leq |S| - 1 \quad \forall S \subset H \cdot S \neq \emptyset \quad (\text{II.12})$$

$$X_{ij} + Z_{i,j} + X_{j,i} + Z_{j,i} = 1 \quad \forall i, j = 1, \dots, N \text{ tel que } i \neq j \quad (\text{II.13})$$

$$X_{i,k} (X_{k,j} + Z_{k,j}) = X_{i,k} Z_{i,j} \quad \forall i, j, k = 1, \dots, N \text{ tel que } i, j \neq k \quad (\text{II.14})$$

$$\alpha + \beta + \delta = 1 \quad (\text{II.15})$$

$$X_{ij} = 0, 1 \quad \forall i, j \in H \quad (\text{II.16})$$

où :

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);

δ : Coefficient de pondération pour le troisième critère c (minimisation des retours);

les équations (II.10) et (II.11) sont les contraintes de degrés;

l'équation (II.12) représente la contrainte d'élimination des sous-tournées;

l'équation (II.13) spécifie qu'il existe une seule relation entre le pool i et le pool j;

l'équation (II.14) représente la contrainte de transitivité;

l'équation (II.15) permet d'équilibrer les trois termes de pondération;

l'équation (II.16) représente la contrainte d'intégrité.

Deuxième transformation :

Elle est apportée pour affiner le modèle précédant et retenir un modèle final, ceci en tenant compte de :

-la redondance qui apparait au niveau de la fonction économique (objectif) en maximisant le flux principal, ce qui est traduit par la minimisation des retours et des sauts;

-linéariser (écrire d'une autre manière) les contraintes de transitivité, afin de réduire la complexité du problème;

-éliminer les contraintes redondantes.

Modèle retenu (final) :

$$X_{ik} + Z_{ik} + X_{kj} - 1 \leq Z_{ij} \quad \forall i, j, k = 1, \dots, N \text{ tel que } i \neq j \text{ et } k \quad (\text{II.17})$$

sous les contraintes suivantes :

$$\sum_{i=1}^N X_{ij} = 1 \quad \forall j \in H \text{ tel que } j \neq 0 \quad (\text{II.18})$$

$$\sum_{i=1}^N X_{ij} = 0 \quad j = 0$$

$$\sum_{j=1}^{N+1} X_{ij} = 1 \quad \forall i \in H \text{ tel que } i \neq N+1 \quad (\text{II.19})$$

$$\sum_{i=1}^{N+1} X_{ij} = 0 \quad i = N + 1$$

$$X_{i,j} + Z_{i,j} + X_{j,i} + Z_{j,i} = 1 \quad \forall i, j = 1, \dots, N \text{ tel que } i \neq j \quad (\text{II.20})$$

$$X_{ik} + Z_{ik} + X_{kj} - 1 \leq Z_{ij} \quad \forall i, j, k = 1, \dots, N \text{ tel que } i \neq j \text{ et } k \quad (\text{II.21})$$

$$X_{ij} / Z_{ij} = 0, 1 \quad \forall i, j \in H \quad (\text{II.22})$$

où γ est le poids affecté à la minimisation des retours en arrière, $\gamma \in [0, 1]$

Le modèle a été simplifié pour l'objectif retenu qui consiste à minimiser exclusivement les retours en arrière. Il se présente comme suit :

$$\text{Min}F = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N A_{ij}(1 - W_{ij}) \quad (\text{II.23})$$

sous les contraintes suivantes :

$$W_{ij} + W_{ji} = 1 \quad \forall i, j = 1, \dots, N \text{ tel que } i \neq j \quad (\text{II.24})$$

$$W_{ik} + W_{kj} - 1 \leq W_{ij} \quad \forall i, j, k = 1, \dots, N \text{ tel que } i \neq j \text{ et } k \quad (\text{II.25})$$

$$W_{ij} = 0, 1 \quad \forall i, j \in H \quad (\text{II.26})$$

W_{ij} indique si le pool i est avant le pool j dans la ligne.

Le modèle a été mis en relief par son application à un exemple industriel (Atelier "Ferrures", CVI Rouiba). C'est lors de l'application en utilisant le logiciel "GAMS" (General Algebraic Modeling System), que le problème de complexité du modèle s'est présenté par le dépassement de l'espace mémoire limitée à cause du nombre de variables et de contraintes utilisées (de l'ordre de N^2 , où N est la taille du problème). Il en résulte que la solution finale n'est pas optimale.

Le recours à une réduction de la taille du problème était obligatoire, par l'écartement de quatre pools parmi les vingt que contenait l'application. Le modèle mathématique devient donc restreint aux applications de tailles réduites si l'on ne dispose pas de moyens de calcul plus puissants.

CHAPITRE III :

Heuristique proposée

III.1. Introduction aux algorithmes approchés

III.1.1. Algorithmes itératifs

III.1.2. Algorithmes gloutons

III.2. Heuristique.

III.2.1. La ligne fonctionnelle

III.2.1.1. Ligne initiale

III.2.1.2. Ligne intermédiaire

III.2.1.2.1. Matrice de contribution

III.2.1.2.2. Ordre d'intégration

III.2.1.2.3. Vecteur de contribution

III.2.1.3. Ligne fonctionnelle finale

III.2.2. Ligne opérationnelle

III.2.2.1. Algorithme de distribution

III.2.2.1.1. Position d'insertion possibles

III.2.2.1.2. Algorithme

III.2.2.2. Réaffectation des produits

III.2.2.3. Adéquation charge/capacité

III.2.2.4. Marge d'acceptation du taux de charge

Chapitre III : Heuristique proposée

III.1. Introduction aux algorithmes approchés [11]

Dans un grand nombre de problèmes, on est amené à chercher une "bonne" solution à un problème combinatoire. Citons quelques cas :

- Trouver une solution de départ pour initialiser un algorithme polynomial (plus court chemin, flot maximum, problème de transport, couplage maximum, etc...).
- Trouver une solution dans une procédure d'exploration par séparation et évaluation, afin d'éliminer un grand nombre de sommets de l'arborescence des solutions.
- Trouver une solution qui soit stable par rapport à une certaine variation des données. Ceci est très important, car les données des problèmes réels sont presque toujours entachées d'erreurs.

On définit un "algorithme approché", comme un algorithme qui donne une solution réalisable du problème, en tenant compte de la fonction économique (fonction objectif). Une telle solution est appelée "solution approchée".

Pour les problèmes fortement contraints, où il est difficile de trouver une solution réalisable, la seule façon de trouver une bonne solution est de mettre en œuvre une procédure d'exploration par séparation et évaluation.

Il existe pour les problèmes faiblement contraints où il est facile de trouver des solutions réalisables, deux types d'algorithmes approchés; les algorithmes itératifs et les algorithmes gloutons [11].

III.1.1. Les algorithmes itératifs

Le principe d'un algorithme itératif, est de partir d'une solution réalisable qu'on cherche à améliorer par itérations successives.

On suppose que le problème est sous la forme :

$$\text{Min } F(x) \quad \{ x \in X \} \quad (\text{III.1})$$

On part de la solution réalisable $x^1 \in X$.

A l'étape k , on a une solution réalisable x^k et on cherche une solution réalisable :

$$x^{k+1} = h(x^k) \in X \text{ telle que : } F(x^{k+1}) \leq F(x^k).$$

L'algorithme s'arrête lorsque x^{k+1} appartient à $\{x^1, x^2, \dots, x^k\}$

La solution obtenue sera notée $h(x^1)$.

Deux problèmes se posent pour un tel algorithme :

- La détermination de la solution de départ.
- La détermination de la fonction h .

Etudions pour l'instant, comment se fait le choix de x^{k+1} à partir de x^k .

III.1.1.1. Les algorithmes de voisinage

A toute solution réalisable ($x \in X$), supposons que l'on puisse associer un ensemble fini $V(x)$, tel que $x \in V(x)$, appelé voisinage de x .

Ce voisinage sera défini à partir de la donnée, d'une distance d et d'un paramètre λ par :

$$V_\lambda(x) = \{ y \in X / d(x,y) \leq \lambda \} \quad (\text{III.2})$$

Les algorithmes de voisinage se proposent alors de rechercher x^{k+1} dans $V(x^k)$.

La règle définissant x^{k+1} dans $V(x^k)$ est donnée par :

$$F(x^{k+1}) = \min F(x) ; x \in V(x^k) \quad (\text{III.3})$$

n'est pas toujours la meilleure, car elle peut être souvent longue si $V(x^k)$ est assez grand.

Il semble qu'on ait souvent intérêt à explorer $V(x^k)$ et à choisir pour x^{k+1} la première solution meilleure que x^k .

Le choix du paramètre λ dans $V\lambda(x)$ sera un compromis entre le temps d'exploration de $V\lambda(x)$ et la qualité de la solution cherchée.

Le temps requis pour explorer $V\lambda(x)$ sera alors en $\Theta(N\lambda)$. On choisit pratiquement $\lambda = 1$ ou $\lambda = 2$ [11].

II.1.1.2. Les algorithmes procédant par relaxations successives

Ils se définissent dans le cas où $F(x)$ peut s'écrire $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$ où chacun des problèmes en x_i est :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min} F(x_1^1, \dots, x_{i-1}^1, x_i^1, x_{i+1}^1, \dots, x_n^1) \\ x_i \\ (x_1^1, \dots, x_{i-1}^1, x_i^1, x_{i+1}^1, \dots, x_n^1) \in X \end{array} \right\} \quad (\text{III.4})$$

L'algorithme revient alors à résoudre successivement (III.1) en conservant à chaque étape les valeurs trouvées précédemment et en ne faisant varier qu'un groupe de variables.

Cette méthode peut être considérée comme une méthode de voisinage en considérant comme voisinage d'un vecteur x , l'ensemble des vecteurs qui ne diffèrent de x que sur un des groupes de variables x_i [11].

III.1.1.3. Fiabilité d'un algorithme itératif

Les solutions obtenues par les algorithmes itératifs, ne sont généralement pas optimales. Elles sont, par contre, localement optimales par rapport au voisinage défini plus haut. Même si on augmente la taille du voisinage, on ne sera jamais sûr de l'optimum global. De plus, la solution localement optimale, dépend parfois de la solution de départ choisie.

On améliorera en probabilité un algorithme itératif, en prenant plusieurs solutions de départ.

Pour un algorithme itératif donné, soit $Y = (y^1, y^2, \dots, y^k)$ l'ensemble des optimums locaux possibles.

Alors, les ensembles : $X^j = \{ x \in X \text{ tel que } \bar{h}(x) = y^j \}$ forment une partition de X

L'ensemble X^j correspond à l'ensemble des solutions de départ donnant l'optimum local y^j .

Si les solutions de départ sont tirées au hasard et de manière uniforme dans X , on aura la probabilité $P_j = |X^j| / |X|$ de trouver l'optimum local y^j .

Soit $y_0 \subset Y$, l'ensemble des solutions optimales du problème, alors,

$$P = \sum_{y^j \in Y_0} P_j$$

est la probabilité de tirer une solution initiale qui donne un optimum global.

On en déduit que si on fait N tirages indépendants pour la solution de départ, la probabilité d'obtenir l'optimum global par cet algorithme itératif est : $\hat{p} = 1 - (1-p)^m$. On peut de cette manière améliorer fortement la fiabilité d'un algorithme itératif [11].

III.1.2. Les algorithmes gloutons

Le principe d'un algorithme glouton, est de partir d'une solution partielle non réalisable, en fixant à chaque étape une ou plusieurs variables, jusqu'à la détermination d'une solution réalisable : c'est la solution cherchée.

A chaque étape on fait un choix définitif. Ce choix doit être particulièrement judicieux, puisqu'il ne pourra plus être remis en cause ultérieurement.

Parmi les critères de choix permettant de définir l'algorithme, il y a le critère de coût moyen, le critère du coût marginal et le critère du regret maximum [14].

III.1.2.1. Critère du coût moyen et extention

Les différents états de la nature ayant des probabilités inconnues, on suppose qu'elles sont égales. On définit l'espérance mathématique du gain dans chaque cas, et on choisit le meilleur.

Les exemples d'utilisation du choix de ce critère sont nombreux, tel que le critère de Dantzig pour l'algorithme du Simplexe, et du Gradient pour les problèmes non linéaires [11].

III.1.2.2. Le critère du coût marginal pour les fonctions d'ensemble

On veut minimiser la fonction $Z = F(s)$, sur l'ensemble des parties S de E .

Pour un sous-ensemble S , on peut considérer pour tout $j \in S$ que :

$$DI(j) = F(s) - F(s-j)$$

est l'accroissement de coût, dû à l'élément j (coût marginal de j relativement à S) [11].

III.1.2.3. Le critère du regret maximum

Les différents états de la nature ayant des probabilités inconnues, on se propose de se garantir contre le pire des cas.

Pour chaque décision possible, on définit le coût minimum si on ne choisit pas cette décision. Ce coût minimum représente le regret de ne pas avoir pris cette décision. On choisit alors la décision correspondante au regret maximum. Ceci est un critère de prudence, car on choisit la décision qui coûterait le plus si on choisissait son contraire [11].

III.2. Heuristique proposée

L'heuristique proposée pour la mise en ligne, est basée sur les étapes suivantes :

1. Le regroupement des machines qui peuvent assurer les mêmes types d'opérations, en pools, en considérant ainsi ces pools comme des postes de travail ayant un certain nombre de machines disponibles (comme dans l'heuristique basée sur les similarités des séquences présentée dans le chapitre précédent).
2. La construction d'une ligne fonctionnelle en pools ce qui revient à supposer la disponibilité d'une seule machine dans chaque poste de travail (pool).
3. La construction d'une ligne opérationnelle en tenant compte de la disponibilité des machines et de la possibilité de distribution du point de vue adéquation charge-capacité.

Nous avons choisi cette séparation de construction de la ligne, pour permettre à l'heuristique une ouverture dans la mesure où le problème de charge-capacité ne se présente pas.

Il est à noter que l'algorithme proposé utilise les deux principes algorithmiques cités ci-dessus, à savoir le principe des algorithmes itératifs dans le choix de la solution de départ (le choix de la ligne initiale) et le principe de critères de sélection des algorithmes gloutons pour la partie constructive de l'heuristique (Construction de la ligne fonctionnelle intermédiaire).

III.2.1. La ligne fonctionnelle

La construction de la ligne fonctionnelle est basée sur la combinaison de deux aspects :

Aspect constructif :

La construction en premier lieu, d'une ligne fonctionnelle intermédiaire à partir d'une ligne initiale, en intégrant les pools dans la ligne courante suivant une certaine démarche.

Aspect amélioratif

Une fois la ligne fonctionnelle intermédiaire obtenue, nous procédons à son amélioration en éliminant à chaque itération l'un des pools et en le réintégrant dans une nouvelle position, pour laquelle il donnera un maximum de contribution (III.2.1.2.1).

III.2.1.1. Ligne initiale

La construction de la ligne initiale peut être basée sur :

- Le produit ayant le plus grand nombre d'opérations dans sa séquence [9].
- La gamme du produit le plus demandé [9].
- Le couple de pools le plus présent.
- Un pool bien spécifique.

Le choix de la ligne initiale étant très important dans un algorithme de nature itératif, il est impératif qu'il soit très judicieux. Aussi nous avons opté pour la ligne initiale la plus courte. Ce choix nous évitera de nous éloigner de la solution optimale (ceci est le cas pour le choix 1).

Par souci de réduire la complexité de notre algorithme en terme de temps de calcul, nous avons écarté le choix 3 (le nombre de combinaisons peut être énorme).

Le caractère constructif de l'heuristique offre la possibilité d'intégrer les pools à chaque étape. Afin d'augmenter le nombre de pools intégrés, nous avons opté pour une ligne initiale constituée d'un seul pool, ce qui va nous permettre d'intégrer un maximum de pools par la suite (ce nombre limite étant $N-1$, N étant le nombre de pools à implanter).

Notre choix se porte donc sur un pool bien spécifique, pour lequel nous avons défini les critères suivants :

Critère de présence :

Le pool à choisir doit être présent de manière significative dans les séquences des différents produits, en d'autres termes, il faut qu'il soit parmi les pools les plus sollicités, cela nous assure l'existence d'une interaction entre ce pool et les autres pools à intégrer.

Critère d'homogénéité de répartition des échanges :

Le pool choisi doit avoir des échanges bien répartis avec les autres pools, ce qui assure l'existence d'interactions avec la majorité des pools qui restent. Nous évaluons cette homogénéité en comptant le nombre de "0" qui figurent sur la matrice d'échange. Un nombre élevé de "0", figurant sur la colonne ou la ligne d'un pool, indique que les échanges de ce pool ne sont pas répartis avec tous les pools.

Le pool qui sera retenu comme pool initial est celui qui vérifie, simultanément, le critère de présence et le critère d'homogénéité de répartition des échanges.

Pour combiner les deux critères, nous définissons, le rapport (RAP) de la présence et du nombre de zéros. Le pool à choisir initialement, est le pool ayant le plus grand RAP.

Exemple illustratif :

Produit 1 : 1 - 2 - 5

Produit 2 : 2 - 3 - 4 - 5

Produit 3 : 3 - 4 - 5 .

On construit la matrice d'échange entre les pools :

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

$E_{i,j}$: indique le nombre de fois que le pool i est avant le pool j dans les gammes des produits.

Présence : le pool 5 est présent 3 fois,
les pools 2, 3 et 4 sont présents 2 fois,
le pool 1 est présent 1 fois.

Pour cet exemple, nous calculons pour chaque pool le nombre total de "0" qui figurent sur sa ligne et sa colonne en excluant les "0" de la diagonale. Les résultats sont résumés sur le tableau ci-dessous :

| Pool | Ligne | Colonne | Total | Présence | RAP |
|------|-------|---------|-------|----------|-----|
| 1 | 3 | 4 | 7 | 1 | 1/7 |
| 2 | 2 | 3 | 5 | 2 | 2/5 |
| 3 | 3 | 3 | 6 | 1 | 1/6 |
| 4 | 3 | 3 | 6 | 2 | 1/3 |
| 5 | 4 | 2 | 6 | 3 | 1/2 |

Pour cet exemple, le pool cinq sera pris comme pool initial.

III.2.1.2. Ligne fonctionnelle intermédiaire

Afin d'obtenir une ligne fonctionnelle intermédiaire, nous avons, dans un premier temps, choisi d'utiliser la matrice de contribution [2].

III.2.1.2.1. Matrice de contribution

La matrice de contribution de dimension $[n, m]$, donne la contribution de l'insertion du pool i (i allant de 1 à m) dans la ligne, à la position j (j allant de 1 à n).

On entend par contribution, le nombre de retours engendrés, en premier lieu, et de sauts, en deuxième lieu. On souhaite souvent obtenir un flux unidirectionnel pour des raisons d'organisation de l'atelier. Pour cette raison, on ne considère, lors du calcul de la contribution, que le nombre de retours.

On dira qu'il y a un maximum de contribution, pour un minimum de retours.

Pour une ligne courante comportant K pools parmi N , il y aura $K+1$ positions d'insertion possibles et $N-K$ pools à intégrer

La matrice de contribution est écrite de la manière suivante :

$$\begin{array}{c}
 \\
 \\
 \\
 1 \\
 2 \\
 \vdots \\
 I \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 K+1
 \end{array}
 \begin{array}{ccccccc}
 & 1 & 2 & \dots & J & \dots & N-K \\
 \left[\begin{array}{ccccccc}
 & & & & \cdot & & \\
 & & & & \cdot & & \\
 & & & & \cdot & & \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & C_{ij} & \dots & \dots \\
 & & & & \cdot & & \\
 & & & & \cdot & & \\
 & & & & \cdot & &
 \end{array} \right]
 \end{array}$$

C_{ij} : représente la contribution du pool 'J' lorsqu'il est inséré dans la position "I".

Le nombre de pools intégrés, à chaque itération, varie suivant la formule suivante :

$$N_{pools} = [1, \dots, \text{MIN} (N - K, K+1)]$$

où :

K : nombre de pools intégrés.

$N-K$: nombre de pools restants

$K+1$: nombre total de positions.

Plusieurs cas de figures peuvent se présenter :

a) Intégration d'un seul pool :

Ce cas de figure peut se présenter de deux manières; soit un maximum de contribution de tous les pools pour la même position d'insertion, soit un maximum de contribution de toutes les lignes se trouvant sur une même colonne. Dans les deux cas un seul pool sera choisi.

Ces deux cas sont présentés par les matrices ci-dessous.

$$\begin{array}{c}
 \\
 \\
 \\
 \\
 I^* \\
 \\
 K+1
 \end{array}
 \begin{bmatrix}
 & 1 & 2 & \dots & J^* & \dots & N-K \\
 1 & \cdot & \cdot & & \cdot & & \cdot \\
 2 & \cdot & \cdot & & \cdot & & \cdot \\
 \cdot & \cdot & \cdot & & \cdot & & \cdot \\
 \cdot & \cdot & \cdot & & \cdot & & \cdot \\
 I^* & C_{1\max} & C_{2\max} & \dots & C_{j^*\max} & \dots & C_{n\max} \\
 \cdot & \cdot & \cdot & & \cdot & & \cdot \\
 \cdot & \cdot & \cdot & & \cdot & & \cdot \\
 K+1 & \cdot & \cdot & & \cdot & & \cdot
 \end{bmatrix}$$

$$\begin{array}{c}
 \\
 \\
 \\
 \\
 I^* \\
 \\
 K+1
 \end{array}
 \begin{bmatrix}
 & 1 & 2 & \dots & J^* & \dots & N-K \\
 1 & C_{1\max} & \cdot & & \cdot & & \cdot \\
 2 & \cdot & \cdot & & \cdot & & \cdot \\
 \cdot & \cdot & \cdot & & \cdot & & \cdot \\
 \cdot & \cdot & \cdot & & \cdot & & \cdot \\
 I^* & C_{I\max} & \cdot & & \cdot & & \cdot \\
 \cdot & \cdot & \cdot & & \cdot & & \cdot \\
 \cdot & \cdot & \cdot & & \cdot & & \cdot \\
 K+1 & C_{K+1\max} & \cdot & & \cdot & & \cdot
 \end{bmatrix}$$

b) Intégration de plusieurs pools :

Ce cas de figure se présente lorsque les maximum de contribution de certains pools se trouvent sur des lignes différentes. Un cas particulier serait un maximum de contribution de tous les pools en même temps d'où l'intégration de tous ces pools en une seule étape.

La matrice, ci-après, illustre ce cas.

| | | | | | | |
|-----|------------|------------|-----|------------|-----|------------|
| | 1 | 2 | ... | J | ... | N-K |
| 1 | . | C_{2max} | | . | | . |
| 2 | C_{1max} | . | | . | | . |
| . | . | . | | C_{imax} | | . |
| . | . | . | | . | | C_{nmax} |
| I | . | . | | . | | . |
| . | . | . | | . | | . |
| . | . | . | | . | | . |
| K+1 | . | . | | . | | . |

L'inconvénient de l'utilisation de la matrice de contribution est la possibilité d'intégrer plus d'un pool par étape. En effet, soit deux pools i et j intégrés à la même étape. La contribution du pool i donnée par la matrice ne désigne que sa relation avec les pools de la ligne courante, sans tenir compte des pools non intégrés ce qui rend cette contribution incomplète.

Pour remédier aux inconvénients résultant de la construction d'une ligne par le biais d'une matrice de contribution, nous avons opté pour l'intégration d'un seul pool, à chaque étape.

Cette procédure consiste à définir un ordre d'intégration des pools et à établir un vecteur de contribution qui détermine, à la différence de la matrice de contribution, uniquement la position d'intégration du pool considéré

En effet la matrice de contribution en se référant principalement au nombre de retours engendrés par l'insertion d'un pool à une certaine position, lors de la détermination du pool à intégrer et de sa position, écarte la possibilité de comparer la position de chacun des pools intégrés à une étape avec celles des autres pools intégrés à la même étape.

Nous proposons la démarche suivante pour la construction d'une ligne fonctionnelle intermédiaire :

- Sélectionner un pool parmi ceux qui ne sont pas encore intégrés dans la ligne courante, en définissant pour cela des règles de sélection (un ordre d'intégration).
- Construire un vecteur de contribution pour placer le pool sélectionné dans la ligne courante.

III.2.1.2.2. Ordre d'intégration des pools

Une multitude de critères de sélection ont été développés. La décision d'opter pour l'un d'eux ne pourrait se faire qu'après l'examen de plusieurs exemples et l'analyse présentée à chacun de ces critères.

Le choix qui consiste à intégrer un seul pool à chaque étape a été adopté, essentiellement, pour pouvoir comparer les possibilités d'insertion d'un pool par rapport aux autres.

Exemple d'illustration :

Soient 6 produits avec les gammes de fabrication suivantes :

Produit 1 : 1 - 3 - 2 - 4 - 6

Produit 2 : 6 - 4 - 3

Produit 3 : 1 - 5 - 3

Produit 4 : 2 - 1 - 5

Produit 5 : 2 - 1 - 4

Produit 6 : 2 - 4 - 1

Le pool 3 est choisi comme pool initial, deux positions sont possibles pour l'intégration des pools restant :

| | | |
|---|---|---|
| | 3 | |
| 1 | | 2 |

A cette étape, la matrice de contribution est :

$$\begin{matrix} & & 1 & 2 & 4 & 5 & 6 \\ 1 & \left[\right. & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 2 & & 2 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{matrix}$$

Un des pools 1 ou 5 sera intégré dans la première position. Soit le pool 1 celui qui est retenu dans la première position et le pool 2 à la deuxième.

La ligne courante sera : 1 - 3 - 2

Cette ligne engendre 3 retours, alors que la matrice de contribution n'en n'indique aucun. Cela est dû au fait de n'avoir pas tenu compte de la position du pool 1 par rapport au pool 2, alors qu'ils ont plusieurs échanges entre eux.

Définir un ordre ou des règles de sélection des pools, revient à donner plus de validité à la règle déterminante du processus de construction de la ligne fonctionnelle intermédiaire c'est à dire un minimum de retours engendrés. Cette règle contribuera à la construction d'une bonne ligne.

Nous proposons le choix des critères de sélection régissant l'ordre d'intégration des pools de la manière suivante :

- Choisir, parmi les pools restant, le pool le plus sollicité,
- ou
- Considérer le pool le moins sollicité, parmi les pools restant.

Ces critères de choix, ainsi que d'autres, ont été appliqués à une diversité d'exemples, et n'ont pas donné de bons résultats. Cette divergence est due principalement à l'absence d'interaction entre le pool choisi et ceux déjà implantés. Autrement dit, considérer le critère de présence des pools ne tient pas compte des échanges de ce pool avec ceux déjà intégrés.

Le critère de présence (sollicitation) a été écarté du processus de construction de la ligne fonctionnelle intermédiaire. En effet plusieurs exemples nous ont montré qu'un pool peut être le plus présent parmi les pools restant, tout en n'ayant pas simultanément de lien ou d'échange avec les pools faisant partie de la ligne courante. Cela se traduit par l'intégration de ce pool n'importe où dans la ligne courante.

Le critère de choix adopté est de choisir parmi les pools restant celui qui a le maximum d'échanges avec les pools appartenant à la ligne.

De cette manière, il est certain que le calcul des retours, qui aura lieu par la suite du processus de construction de la ligne, sera plus de significatif. La première étape de cette sélection consiste d'abord à calculer les échanges entre les pools. Deux manières de calcul se sont présentées lors de la construction d'une matrice représentant les échanges entre les pools :

- Construire une matrice d'échanges basée sur la relation de présence qui existe entre les pools.
- Calculer les échanges en construisant une matrice basée sur la relation d'adjacence entre les pools.

Reprenons les données de l'exemple précédant et calculons les matrices d'échange-présence et d'échange-adjacence:

P 1 : 1 - 3 - 2 - 4 - 6

P 2 : 6 - 4 - 3

P 3 : 1 - 5 - 3

P 4 : 2 - 1 - 5

P 5 : 2 - 1 - 4

P 6 : 2 - 4 - 1 .

1. Calculer les échanges sur la base de l'adjacence revient à ne considérer que les échanges qui ont lieu entre deux pools adjacents dans la séquence (suivant l'ordre de passage); les pools 2 et 1 sont deux fois adjacents (2-1), l'échange (2 , 1) est évalué à 2.

La matrice d'échanges-adjacence de cet exemple est ainsi écrite :

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 2 | 2 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 5 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |

2. Calculer les échanges entre deux pools sur la base de la présence, revient à tenir compte de la présence du couple formé par les deux pools en question, dans la séquence, le couple (2,1) est présent 3 fois (2 - 1 - 4 ; 2 - 1 - 5 ; 2 - 4 - 1), ainsi, l'échange (2,1) est évalué à 3.

La matrice d'échange-présence de cet exemple est :

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | 0 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 |
| 2 | 3 | 0 | 0 | 3 | 1 | 1 |
| 3 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 4 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 5 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |

L'évaluation des échanges par le biais d'une matrice d'échange-adjacence ne décrit pas exactement le lien existant entre les pools. Cela est dû à une perte d'informations, car on ne considère que l'échange qui existe entre deux pools adjacents, alors que l'existence d'un pool après ou avant un autre sans qu'il lui soit adjacent, nous indique les positions de ces pools l'un par rapport à l'autre .

Nous avons retenu le critère d'intégration basé sur la construction d'une matrice d'échange-présence. L'application de ce critère à l'exemple précédent où le pool 1 est choisi comme pool initial donne le résultat suivant :

Détermination d'un ordre d'intégration des pools :

Echanges des pools restant avec le pool 1 :

$$1 \begin{bmatrix} 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ 4 & 2 & 3 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

Le pool à intégrer en premier, sera celui qui vérifie le maximum d'échange avec le pool 1, il s'agit du pool 2. La ligne courante contient les pools 1 et 2.

Le deuxième pool à intégrer sera celui donnant un maximum d'échange avec les pools 1 et 2.

$$\begin{array}{l} 1 \\ 2 \end{array} \begin{bmatrix} 3 & 4 & 5 & 6 \\ 2 & 3 & 2 & 1 \\ 1 & 3 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Total 3 6 3 2

Le pool 4 sera intégré dans la ligne courante, la ligne actualisée comportera alors les pools 1, 2 et 4.

Le troisième pool à insérer sera celui qui parmi les pools restant (3, 5 et 6), donne le plus grand échange avec les pools de la ligne courante (1, 2 et 4)

$$\begin{array}{l} 1 \\ 2 \\ 3 \end{array} \begin{bmatrix} 3 & 5 & 6 \\ 2 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 2 & 0 & 2 \end{bmatrix}$$

Total 5 3 4

Le pool 3 donne un maximum d'échange, il sera alors intégré. La ligne courante contient les pools 1, 2, 4 et 3.

Le quatrième pool à insérer est donné par la matrice suivante:

| | | | |
|-------|---|---|---|
| | | 5 | 6 |
| 1 | 2 | 1 | |
| 2 | 1 | 1 | |
| 4 | 0 | 2 | |
| 3 | 1 | 2 | |
| Total | 4 | 6 | |

Le pool 6 sera intégré à cette étape. Finalement le pool 5 sera intégré en dernier.

Le tableau suivant résume l'ordre d'intégration des pools (ayant 1 comme pool initial) :

| | | | | | |
|---------------------|---|---|---|---|---|
| Pools | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Ordre d'intégration | 1 | 3 | 2 | 5 | 4 |

Afin d'améliorer la précision de la règle de sélection proposée, nous avons ajouté un sous-critère auquel on fait appel lorsque le premier critère de sélection ne permet pas de trancher, c'est à dire le cas où le maximum d'échange avec les pools intégrés est vérifié par deux pools ou plus parmi les pools restant (qui ne sont pas encore intégrés). Si encore une fois, cette règle de sélection ne permet pas le choix d'un pool. parmi les pools vérifiant les deux critères, on sélectionne un arbitrairement.

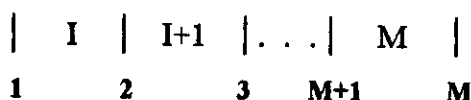
Cette manière, nous permet d'avoir une méthode exhaustive définissant un ordre d'intégration des pools.

III.2.1.2.3. Vecteur de contribution

Après avoir déterminé un ordre suivant lequel les pools seront intégrés un par un, la dernière étape du processus de construction de la ligne fonctionnelle intermédiaire consiste à déterminer les positions d'insertions des pools.

A chaque itération, on construit un k-vecteur, tel que k représente le nombre de positions d'insertions possibles dans la ligne courante. Ce vecteur, dit de contribution, contient les contributions des insertions du pool en question à cette itération (déterminé par l'ordre déjà établi). On l'insère à la position correspondant à la meilleure contribution, c'est à dire celle qui engendre un nombre minimal de retours.

A l'itération k, la configuration de la ligne courante est supposée être la suivante :



Conformément aux règles de détermination de l'ordre d'intégration, on définit pour le pool "p" le vecteur de contribution suivant :

$$[C_1 \ C_2 \ \dots \ C_j = \max \ \dots \ C_{M+1}]$$

et il sera inséré à la J^{ième} position car c'est celle qui donne un maximum de contribution (un minimum de retours). On continue le processus d'intégration par l'insertion des pools suivants, selon l'ordre d'intégration établi, jusqu'à ce qu'ils soient tous insérés.

Exemple :

Appliquons ce principe à l'exemple précédant.

La ligne courante comporte initialement le pool 1 :



Première itération

L'ordre d'intégration établi propose l'intégration du pool 2 en premier, le vecteur de contribution suivant lui est associé :

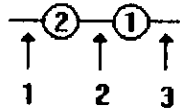
$$V_2 : [\ 1 \ 3 \]$$

on l'insère à la première position de la ligne, la ligne actualisée sera :



Deuxième itération

A cette étape, le pool 4 est à intégrer :



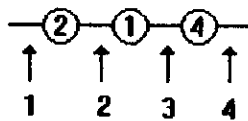
$$V4 : [4 \quad 2 \quad 2]$$

Les positions 2 et 3 donnent les mêmes contributions, on l'insère arbitrairement à la troisième position de la ligne, la ligne actualisée sera :



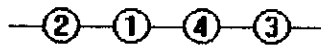
Troisième itération

A cette étape, le pool 3 est à intégrer :



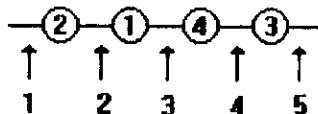
$$V3 : [4 \quad 5 \quad 3 \quad 2]$$

On insère le pool 3 dans la quatrième position de la ligne, la ligne actualisée sera :



Quatrième itération

On intègre le pool 5 à cette étape :



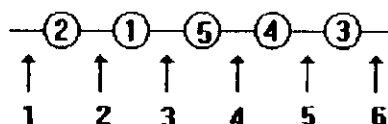
$$V5 : [4 \quad 4 \quad 2 \quad 2 \quad 3]$$

Les positions 3 et 4 sont toutes les deux bonnes, arbitrairement, on insère le pool 5 à la troisième position, la ligne actualisée sera :



Cinquième itération

Le pool 6 est le dernier à insérer :



$$V6 : [3 \quad 3 \quad 3 \quad 3 \quad 3 \quad 3]$$

Critères de selection :

A travers l'exemple traité, on remarque qu'aux itérations 4 et 5, le critère basé sur le nombre de retours n'arrive pas à donner la position d'insertion des pools concernés. Nous avons ajouté deux sous-critères de sélection du pool à intégrer, afin de perfectionner les résultats obtenus à partir du vecteur de contribution. Nous introduisons les notions de backtracking et de distance du flux :

Le backtracking :

Le backtracking est le nombre de retours engendrés par la gamme d'un produit, que multiplie la quantité à fabriquer de ce produit, il représente, en quelque sorte, le nombre total de retours engendrés en parcourant la gamme d'un produit. Ainsi k retours engendrés par un produit fabriqué en grande quantité ne seront pas pareils à k retours qu'engendre un produit fabriqué en petite quantité.

Cette notion est utilisée comme sous-critère dans le cas où le maximum de contribution (minimum de retours) est vérifié par deux pools ou plus, on choisit, alors, parmi ces positions celle qui donne le plus petit backtracking.

Distance du flux :

Nous avons appelé distance de flux, non pas la distance physique qui sépare les postes de travail, mais la distance théorique traversée par le flux de production, autrement dit, le nombre de postes sur la ligne " sautés" par le flux de production.

L'application de ce troisième critère (après avoir appliqué les deux autres) consiste à retenir la position qui donne la plus petite distance de flux créée par les retours .

Reprenons l'exemple précédent et affectons des quantités aux produits à fabriquer :

Produit 1 : 200

Produit 2 : 50

Produit 3 : 150

Produit 4 : 100

Produit 5 : 250

Produit 6 : 100

A la cinquième itération, toutes les positions donnent 3 retours, ce qui ne permet pas de choisir une position précise.

Calculons alors le backtracking engendré par chacune des positions possibles.

Position 1 : Engendre 2 retours au niveau du produit 1 et un retour au niveau du produit 6, elle engendre alors un backtracking de :

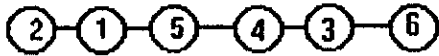
$$2 \times 200 + 1 \times 100 = 500$$

Positions 2, 3 et 4 : Même valeur de backtracking (500)

Position 5 : Engendre un retour au niveau du produit 1, un retour au niveau du produit 2 et un retour au niveau du produit 5, soit un backtracking de :

$$1 \times 200 + 1 \times 50 + 1 \times 100 = 350$$

Position 6 :



| | | | |
|-------------|----------|-----------|-------|
| Produit 1 : | 1 retour | 1—3→2—4—6 | D = 4 |
| Produit 2 : | 1 retour | 6→4—3 | D = 2 |
| Produit 6 : | 1 retour | 2—4→1 | D = 2 |

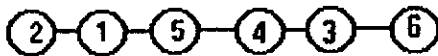
d'où

La distance totale du flux

$$D = (4 \times 200) + (2 \times 50) + (2 \times 100)$$

$$D = 1100$$

On retient la position six pour ce dernier pool à intégrer, car elle donne une distance de flux plus petite que celle donnée par la position cinq. La ligne finale Pour cet exemple est donc:



La construction de la ligne intermédiaire atteint sa phase finale, au moment où le dernier pool désigné par le vecteur d'ordre d'intégration est intégré.

Le processus de construction de la ligne fonctionnelle est complété par la phase finale qui est de nature améliorative, l'amélioration de la qualité de la ligne en termes de retours engendrés se fera par le réagencement des pools dans la ligne intermédiaire obtenue. Ce réagencement se fera sur la base de la contribution donnée par les différentes positions d'insertion de chacun des pools.

III.2.1.3. Ligne fonctionnelle finale

Une fois la ligne fonctionnelle intermédiaire obtenue, on améliore sa qualité en terme de retours engendrés. Cela consiste à éliminer, à chaque itération, un pool de la ligne et à le réintégrer en construisant un vecteur de contribution .

Ce choix est adopté essentiellement pour valider au maximum la manière avec laquelle on calcule les retours. Autrement dit, le fait d'intégrer un pool en comparant sa position avec quelques pools implantés sur la ligne est nettement moins précis que de l'intégrer en présence de tous les autres pools.

Le plan général de la construction de la ligne fonctionnelle est donné en annexe (III.1).

III.2.2 Construction de la ligne opérationnelle

En réalité le concept de ligne opérationnelle est beaucoup plus pratique que théorique. C'est au niveau d'une application industrielle que le passage de la ligne fonctionnelle vers la ligne opérationnelle est nécessaire, pour tenir compte des problèmes de charge/capacité pouvant se poser pour un atelier.

Ce passage se fait par l'éclatement des pools, et la distribution des machines le long de la ligne fonctionnelle, ce qui aura pour premier effet de réduire les retours en arrière dont souffre la ligne fonctionnelle. L'exemple suivant nous permettra de l'illustrer :

Considérant la ligne fonctionnelle [m2 m3 m4 m1], et soit p1 une pièce dont la gamme de fabrication est : (m2 m1 m4), le passage de cette pièce dans la ligne engendre un retour en arrière et par la duplication de machines, ce retour sera éliminé et la ligne aurait la configuration suivante :

Duplication de m1 : m2 m1 m3 m4 m1

Duplication de m4 : m2 m3 m4 m1 m4

Il est à noter que la nouvelle position de la machine dupliquée prend en compte toutes les gammes, même celle ne causant pas de retours, et la condition de duplication est la disponibilité de la machines dupliquée (pool contenant plus d'une machine).

III.2.2.1. Algorithme de distribution

Un algorithme de nature améliorative servira à la distribution des machines dans la ligne. En effet partant de la ligne fonctionnelle finale obtenue à l'étape 3 de l'heuristique, on construit une ligne opérationnelle tenant compte de la disponibilité des machines ainsi que de l'adéquation charge/capacité sur les machines distribuées.

Pour l'application de l'algorithme, nous devons déterminer ce que nous désignerons par "pools distribuables", et tout au long de l'opération, la distribution ne concernera que ces pools, ce qui réduit la complexité de l'algorithme.

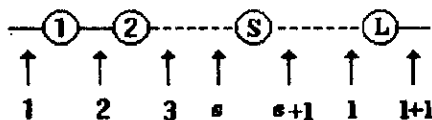
Ainsi, à chaque itération, un de ces pools sera distribué dans l'une des position d'insertion possible. La position d'insertion la plus favorable pour la distribution de ce pool sera déterminée au moyen de la matrice de contribution telle que nous l'avons défini dans la partie "construction de la ligne fonctionnelle".

III.2.2.1.1. Positions d'insertion possible

Soit la ligne courante L, qui comporte k pools (parmi lesquels on peut trouver des machines déjà distribuées), les positions d'insertions dans cette ligne sont pour chaque pool de l'ordre de $(k+1) - 2$, où $k+1$ représente la nouvelle longueur de la ligne, et 2 représente les deux positions de part et d'autre de la position originelle du pool à distribuer.

Exemple :

Soit à l'itération k une ligne courante de longueur L, et p le pool à distribuer (dupliquer), dont la position originelle est S : La ligne courante est :



(s et s+1 sont les deux positions où l'insertion ne se fera pas).

Après l'insertion de ce pool dans l'une de ces positions, sa contribution dans la ligne sera calculée en consultant tous les produits déterminant ainsi un nouveau ,taux du flux (c.à.d nombre de retours et de sauts).

Ainsi pour chaque pool distribuable (nombre de machines >1), on aura à l'itération K, L+K-2 positions d'insertion et pour chacune d'elle la contribution de ce pool, ce qui nous permet de construire la matrice de contribution suivante (la ligne fonctionnelle étant de longueur L) :

A l'itération k :

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{cccc}
 & 1 & 2 & i & L+K \\
 1 & & & & \\
 P & & & \text{Cont}(p,i) & \\
 NP & & & &
 \end{array}
 \end{array}$$

(NP étant le nombre de pools distribuable à l'itération K).

Cont (p,i) est la contribution résultant de l'insertion d'une machine du pool p dans la position i. Elle représente le nombre de retours engendrés par cette duplication qui n'est autre que la différence entre le nombre de retours éliminés et le nombre de retours créés. Cette modification influe sur les autres paramètres, tels que, les sauts, la distance du flux et le backtracking.

Tout les éléments de la matrice de contribution étant calculés, nous déterminons, alors, leur maximum, et dans le cas d'un litige,c'est à dire d'égalité de la contribution pour différents éléments de la matrice, le recours à d'autres critères de partage sera nécessaire. Nous gardons le même ordre de priorité des sous-critères défini par le vecteur de contribution. Lorsque l'élément Cont (p,i) est choisi, la distribution du pool p dans la position K ne se fera que si le test d'adéquation charge / capacité est respecté.

Comme il a déjà été mentionné, l'algorithme étant de nature itérative, nous avons établi le test d'arrêt suivant :

Si pour tous les éléments de la matrice de contribution, la contribution à l'itération k est inférieure à celle de l'itération k-1, la ligne ne peut être améliorée.

III.2.1.2. Algorithme

Etape 0 :

initialisation
- ligne fonctionnelle (L)
- pools distribuables (np)
- contribution = 0.

Etape 1 :

```
faire {test d'amélioration }
de i = 1 à np
  faire { test disponibilité }
  si disponibilité ( i ) > 1 alors
    faire
      de j = 1 à L+1
        faire { test d'insertion }
        si position d'insertion alors
          faire
            calculer cont( i , j )
            si non adéquation ( i , j ) alors
              cont ( i , j ) = 0
            sinon
              cont ( i , j ) = 0
          fin,
        fin,
      fin,
    fin,
  fin,
determination maximum Cont ( i , j ).
si cont ( i , j ) > contribution alors
  faire
    réaffectation des produits.
    distribuer i dans la position { actualisation de la ligne }
    disponibilite( i ) = disponibilite ( i ) -1
    l = l +1
    contribution = cont ( i , j )
    test d'amélioration = vrai
  sinon
    test d'amélioration = faux
  tant que amelioration = vrai

fin { ligne opérationnelle obtenue }
```

III.2.3. Réaffectation des produits

La réaffectation des produits se fait non seulement du pool distribuables vers les machines distribuées ,mais également entre ces dernières.

Ce cas de figure peut être illustré dans le cas d'une pièce dont la réaffectation vers une nouvelle machine distribuée a réduit le nombre de retours qu'une nouvelle réaffectation réduit davantage.

III.2.4. Adéquation charge/capacite

Soit un pool p comportant n machines ayant des similarités techniques, la charge totale sur ce pool (notée CHT (P)) est celle relative aux opérations effectuées sur les produits le sollicitant.

On ne parle alors d'adéquation charge / capacité que par rapport à un seuil $S\%$, que seule l'entreprise peut définir. On peut considérer le rapport charge / capacité d'un pool comme acceptable même s'il dépasse le seuil (S), car l'éventualité de l'achat de nouvelles machines augmentera la capacité actuelle. On peut avoir deux, par rapport au seuil acceptable deux situations :

- situation 1 : une charge totale inférieure à $S\%$;
- situation 2 : une charge totale supérieur à $S\%$.

Définissons les différents paramètres permettant permettant le calcul de l'adéquation charge / capacité :

CHTF (p) : la charge totale sur le pool p , à sa position originelle (dans la ligne fonctionnelle).

CAP (p) : la capacité totale du pool

CAP1 (p): la capacité d'une seul machine .

CHTA (p) : la charge totale sur le pool p pour sa position originelle apres distribution.

CHTK (p) : la charge totale sur la machine distribuée dans la position K.

CHRA (p) : la charge relative aux pièces réaffectées de cette position vers celle nouvellement créée (notons que cette charge n'est pas nécessairement égale à CHTK (P) comme il a été indiqué dans le paragraphe de réaffectation des pièces).

Situation 1:

L'adéquation est respectée si :

$$\text{CHTK (p) / CAP1 (P)} < S \%$$

et

$$[\text{CHTA (p) - CHRA (p)}] / [\text{CAP (p) - CAP1 (p)}] < S \%$$

Situation 2 :

L'adéquation est respectée si :

$$\text{CHTK (p) / CAP1 (p)} > S \%$$

et

$$[\text{CHTA (p) - CHRA (p)}] / [\text{CAP (p) - CAP1 (p)}] > S \%$$

Exemple d'illustration :

Soit un pool qui dispose initialement de 3 machines et qui n'a pas encore été distribué et donc, pour lequel $\text{CHTA (p)} = \text{CHTF (p)}$.

$$\text{CHTF (p)} = 1000 \text{ (u.t)}$$

$$\text{CHRA (p)} = 200 \text{ (u.t)}$$

$$\text{CHTK (p)} = 350 \text{ (u.t)}$$

$$\text{CAP1 (p)} = 400 \text{ (u.t)}$$

$$\text{CAP (p)} = 1200 \text{ (u.t)}$$

$$\text{CHTF (p) / CAP (p)} = 1000 / 1200 = 83 \%$$

ce qui nous ramène à la deuxième situation :

$$\begin{aligned} [\text{CHTA (p)} - \text{CHRA (p)}] / [\text{CAP (p)} - \text{CAP1 (p)}] &= 800 / 800 = 100 \% \\ \text{CHTK (p)} / \text{CAP1 (p)} &= 350 / 400 = 87.5 \% \end{aligned}$$

Ainsi l'adéquation charge / capacité est respectée puisque le taux d'occupation du pool est toujours supérieure à 80 % (100 %) et de même pour celui de la machine nouvellement distribuée (87 %).

Le pool p sera donc distribué dans cette position.

Si la capacité d'une seule machine avait été de 450 (u.t) on aurait :

$$\begin{aligned} \text{CAP (p)} &= 1350 \text{ (u.t)} \\ \text{CHTF (p)} / \text{CAP (p)} &= 1000 / 1350 = 74 \% \end{aligned}$$

ce qui nous ramène à la première situation

$$\begin{aligned} [\text{CHTA (p)} - \text{CHRA (p)}] / [\text{CAP (p)} - \text{CAP1 (p)}] &= 800 / 900 = 88 \% \\ \text{CHTK (p)} / \text{CAP1 (p)} &= 350 / 450 = 77 \% \end{aligned}$$

L'adéquation charge / capacité n'est donc pas respectée , puisque le pool p a un taux d'occupation supérieur à 80 %, car sa capacité a diminué beaucoup plus qu'il n'a été déchargé. Le pool p ne sera donc pas distribué dans cette position.

III.2.5. Marge d'adéquation charge / capacité

Compte tenu de l'importance de la notion d'adéquation charge / capacité dans la construction de la ligne opérationnelle (la distribution ne se faisant que si le test d'adéquation charge / capacité est vérifié), nous avons rendu le test moins rigide en introduisant une marge d'acceptation au lieu d'une valeur limite.

Nous avons défini un intervalle à l'intérieur duquel on considère que l'adéquation est respectée, ce qui donne au test une certaine flexibilité. Cette nouvelle situation ne nous éloigne pas de la réalité, puisqu'il existe la possibilité de réaffecter des opérations d'une machine à une autre, sans que cela n'affecte la configuration actuelle du flux.

Exemple :

Soit un pool contenant 4 machines ayant un taux d'occupation est de 90 % et dont la distribution dans la ligne donne lieu, à une machine un taux d'occupation de 60 % et à une autre un taux de 55 %, en augmentant celui du pool à 120%. Par rapport au test utilisant une valeur limite, l'adéquation n'est pas vérifiée et par conséquent ce pool ne sera pas distribué.

Si on suppose que le pool contient des opérations appartenants à des pièces pouvant être réaffectées et qu'elles représenteraient 20 % de la charge totale du pool, ce qui représente 80 % de la capacité d'une seule machine, il est donc possible de réaffecter ces opérations sur les deux machines en augmentant ainsi leurs taux d'occupation de 35% pour la machine 1 et de 35% pour la machine 2, ce qui répartira la charge comme suit :

pool initial : 85 %

machine 1 : 95 %

machine 2 : 95 %

le test d'adéquation sera donc vérifié.

Compte tenu de cela, nous procéderons à la distribution de la ligne fonctionnelle pour différentes valeurs de la marge d'acceptation en tenant compte des possibilités offertes par chaque pool.

Nous obtiendrons, alors, des lignes opérationnelles de longueurs différentes. La qualité de la ligne en terme de retours engendrés sera inversement proportionnelle à cette longueur.

Le choix de la ligne opérationnelle se fera principalement sur la base de l'analyse de l'adéquation charge / capacité.

Chapitre IV :

Application industrielle

IV.1. Présentation de l'atelier 'Ferrures'

IV.2. Construction de la ligne fonctionnelle

IV.2.1. Notions utilisées

IV.2.1.1. La notion d'échange

IV.2.1.2. Les retours engendrés

IV.2.1.3. Distance de flux et backtracking

IV.2.2. Étapes de construction de la ligne

IV.2.2.1. Ligne initiale

IV.2.2.2. Ligne intermédiaire

IV.2.2.3. Ligne finale

IV.3. Construction de la ligne opérationnelle

IV.3.1. Présentation des données

IV.3.2. Résultats obtenus

IV.3.3. Ligne opérationnelle

IV.4. Résultats

IV.4.1. Ligne de 16 pools

IV.4.2. Ligne des 20 pools

IV.5. Programme informatique

Chapitre IV : Application industrielle

IV.1. Présentation de l'atelier "Ferrures"

L'atelier "Ferrures" se situe au centre du bâtiment mécanique du C.V.I de Rouiba. Il est spécialisé dans la fabrication de pièces destinées à être montées sur des châssis de camions ou de bus [2], [10].

Effectif :

Un ensemble de 71 travailleurs représente l'effectif de cet atelier:

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

Machines :

Un total de 46 machines forme l'implantation actuelle de l'atelier, elle sont réparties comme suit :

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

Produits :

Il sont classifiés de la manière suivante:

- La classe A : comporte les produits lancés 11 fois par an (1 fois par mois).
- La classe B : contient les pièces lancées 6 fois par an (1 fois par deux mois).
- La classe C : comporte les pièces lancées 1 seule fois par an [2].

Processus :

Les commandes du service d'ordonnancement sont reçues par le centre de montage qui lance la fabrication selon le schéma suivant :

- 1- Réception du lot sous forme de brut .
 - 2- Transporter le lot du lieu de stockage vers la machine qui effectue la première opération de la gamme, et ce par le biais d'un chariot élévateur.
 - 3- Transporter ce lot vers la prochaine machine pour subir la deuxième opération de la gamme de fabrication.
- Répéter ce procédé jusqu'au traitement final du lot entier [2], [10].

Organisation actuelle :

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

Cette organisation se répercute essentiellement sur les éléments de performances relatifs au déroulement de la production:

- Des attentes longues.
- Le suivi de production pénible.
- Les accidents de travail fréquents.
- L'espaces de stockage étroit.
- La qualité moindre.
- La perte de productivité.

Synthèse :

L'organisation actuelle de l'atelier est à la source de maintes difficultés accompagnant le déroulement du processus de fabrication.

Une réorganisation des moyens de production pourrait apporter l'amélioration des éléments de performance et améliorer le processus productif.

IV.2. Construction de la ligne fonctionnelle

La méthode de mise en ligne proposée nécessite les données suivantes :

1. La liste des machines implantées au sein de l'atelier ainsi que la disponibilité de chacune.
2. Les données relatives aux pièces fabriquées:
 - . Les gammes de fabrication.
 - . Les temps alloués aux opérations d'usinage, qui sont nécessaires pour le calcul des capacités et des charges des différents moyens de production.
 - . Les nombres de lancements annuels (classe), pour permettre une analyse réelle du flux de production.

IV.2.1. Notions utilisées

Une étape préalable à la mise en ligne consiste à regrouper le dispositif de machines en pools. Les similarités techniques caractérisant les quarante six machines de l'atelier ont permis leur regroupement en vingt pools (Annexe IV.1).

Les mots clefs de l'approche de résolution seront traités de la manière suivante :

IV.2.1.1. La notion d'échange

L'échange entre deux pools est calculé sur la base de la considération du flux de pièces échangées. Ainsi les échanges de deux pools faisant partie de la gamme de fabrication d'une pièce seront calculés en utilisant les formules suivantes:

a) Echange-présence :

L'échange-présence entre les pools i et j noté $E_{i,j}$ est donné par :

$$E_{i,j} = \sum_{k=1}^P CL_k \times K_{i,j} \quad (IV.1)$$

tel que :

$K_{i,i} = 1$ si le couple de pools (i, j) est présent dans la gamme de fabrication du produit K ,

$K_{i,i} = 0$, sinon.

CL_k : la classe du produit K ; $CL_k = \{1, 6, 11\}$.

b) échange-adjacence :

$$E_{i,j} = \sum_{k=1}^P CL_k \times K_{i,j} \quad (IV.2)$$

tel que :

$K_{i,i} = 1$ si les pools i et j sont adjacents dans la gamme de fabrication du produit K ,

$K_{i,i} = 0$ sinon.

CL_k : la classe du produit K ; $CL_k = \{1, 6, 11\}$.

Cette manière de calculer les échanges entre les pools permet de considérer le flux réel des pièces, en effet, un lancement par an représente un seul échange entre les pools sollicités par sa gamme de fabrication, alors qu'une pièce lancée 6 fois par an présentera 6 échanges entre les machines sollicitées par sa gamme de fabrication.

Exemple :

Soient 4 pièces sollicitant 4 pools selon les gammes suivantes :

| Pièce | Gamme | Classe |
|-------|-------------|----------|
| P1 | 2 - 3 - 1 | classe B |
| P2 | 3 - 4 - 1 | classe A |
| P3 | 1 - 2 - 3 4 | classe B |
| P4 | 1 - 3 - 4 | classe C |

Echange - présence :

$$E_{1,2} = 6$$

$$E_{1,3} = 6 + 1 = 7.$$

$$E_{1,4} = 6 + 1 = 7.$$

Ainsi, on obtient la matrice suivante :

| | | | | |
|---|----|---|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | 0 | 6 | 7 | 7 |
| 2 | 6 | 0 | 12 | 6 |
| 3 | 17 | 0 | 0 | 18 |
| 4 | 11 | 0 | 0 | 0 |

Echanges - adjacence :

$$E_{1,2} = 6$$

$$E_{1,3} = 1$$

$$E_{1,4} = 0$$

La matrice d'adjacence est la suivante :

$$\begin{array}{c} \begin{matrix} & 1 & 2 & 3 & 4 \\ 1 & \left[\begin{array}{cccc} 0 & 6 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 12 & 0 \\ 6 & 0 & 0 & 18 \\ 11 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right] \end{matrix} \end{array}$$

IV.2.1.2. Les retours engendrés

Le calcul des retours engendrés par le flux de production se réfère, lui aussi au flux réel des pièces fabriquées. Ainsi, un retour engendré par une pièce lancée K fois par an, est considéré comme K retours. Le nombre total des retours engendrés par la ligne obtenue se calcule par l'expression suivante :

$$R = \sum_{k=1}^P CL_k \times N_k \quad (IV.3)$$

tel que :

N_k représente le nombre de retours engendrés par la gamme de la pièce K.

CL_k : Classe de la pièce K = {1, 6, 11}.

Reprenons l'exemple précédent, en supposant que l'on ait la mise en ligne suivante :



$$P1 : N_1 = 1 \text{ retour}$$

$$P2 : N_2 = 1 \text{ retour}$$

$$P3 : N_3 = 0 \text{ retour}$$

$$P4 : N_4 = 0 \text{ retour}$$

d'où $R = 6 \times 1 + 11 \times 1 = 17$ retours

IV.2.1.3. Distance du flux - Backtracking

Le même principe est appliqué pour le calcul du backtracking engendré par la ligne :

$$B = \sum_{k=1}^P \sum_{i=1}^{N_k} D_i CL_k \quad (IV.4)$$

tel que :

D_i est la distance du flux (distance théorique) créée par le retour i .

N_k nombre total de retours engendré par la gamme du produit K

P nombre total de produits fabriqués.

Le backtracking engendré par la ligne de l'exemple précédant se calcule comme suit :

Ligne de flux :

$$\begin{aligned} N_1 &= 1 & D_1 &= 2 \\ N_2 &= 1 & D_2 &= 3 \\ (N_3 = N_4 &= 0, \text{ alors } D_3 = D_4 = 0). \end{aligned}$$

IV.2.2. Etapes de construction de la ligne

La démarche suivie consiste à sélectionner un pool parmi l'ensemble des vingt pools formant le processus productif de l'atelier. Ce pool représentera une 'ligne' initiale du flux de production. A partir de cette 'ligne' de départ, un processus de construction mènera à une ligne fonctionnelle intermédiaire à partir de laquelle le processus amélioratif aboutira à une ligne fonctionnelle finale.

IV.2.2.1. Ligne initiale

Les critères de choix retenus pour la détermination d'un pool initial, à partir duquel la ligne sera construite au fur et à mesure, sont :

- Une présence significative du pool retenu dans l'ensemble des gammes fabriquées.
- Une homogénéité de répartition de ses échanges avec les pools restant.

Ces règles de sélection nécessitent l'analyse des deux données calculées à partir des gammes de fabrication des pièces :

- a) Les degrés de sollicitation des 20 pools de l'atelier,
- b) La matrice des échanges mutuels des 20 pools.

a) Degrés de sollicitation des pools

La figure suivante indique la présence de chaque pool dans les gammes de production des 273 pièces (Annexe IV.2).

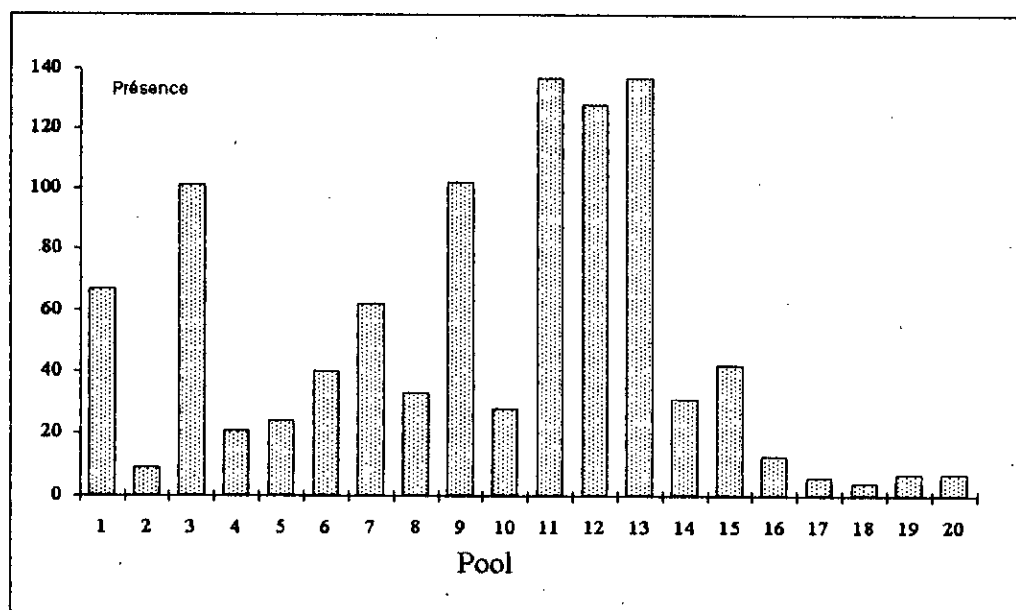


Figure IV.1 : Degrés de sollicitation des pools

On remarque que les pools 3, 9, 11 et 13 sont les plus sollicités, le choix sera donc porté sur l'un d'eux (Le tableau des présences des pools est donné en annexe IV.3)..

b) Matrice des échanges

Deux manières de calcul de la matrice des échanges se sont présentées :

- Le calcul échange-adjacence.
- Le calcul échange-présence.

Cette deuxième manière est retenue pour le calcul des échanges. Ce choix est adopté parce qu'il donne le maximum d'informations relatives aux interactions entre les pools. En d'autres termes, la matrice d'échange-présence contient implicitement celle des échanges-adjacence, et elle nous informe sur la position d'un pool par rapport à un autre même s'ils ne sont pas adjacents.

La matrice d'échange-présence est donnée ci-dessous :

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
|----|-----|----|-----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|----|----|----|----|
| 1 | 0 | 11 | 86 | 11 | 0 | 0 | 59 | 12 | 135 | 0 | 61 | 12 | 107 | 28 | 0 | 33 | 11 | 0 | 6 | 0 |
| 2 | 22 | 0 | 44 | 11 | 0 | 0 | 22 | 44 | 66 | 22 | 22 | 33 | 11 | 22 | 33 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 87 | 22 | 0 | 0 | 66 | 0 | 46 | 56 | 125 | 11 | 211 | 84 | 88 | 211 | 55 | 0 | 0 | 28 | 0 | 0 |
| 4 | 7 | 0 | 22 | 0 | 33 | 0 | 0 | 0 | 33 | 39 | 39 | 11 | 22 | 22 | 22 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 13 | 0 | 78 | 0 | 0 | 0 | 48 | 50 | 0 | 6 | 43 | 0 | 6 | 1 | 0 | 0 | 6 | 0 | 6 | 0 |
| 6 | 61 | 0 | 202 | 89 | 0 | 0 | 34 | 11 | 100 | 106 | 200 | 147 | 222 | 133 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 40 | 0 | 12 | 0 | 6 | 0 | 0 | 29 | 50 | 0 | 69 | 0 | 52 | 34 | 0 | 18 | 12 | 0 | 6 | 0 |
| 8 | 17 | 0 | 22 | 0 | 0 | 0 | 28 | 0 | 78 | 33 | 120 | 0 | 29 | 44 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 130 | 0 | 56 | 50 | 0 | 0 | 147 | 95 | 0 | 39 | 252 | 68 | 190 | 56 | 12 | 11 | 11 | 6 | 0 | 0 |
| 10 | 23 | 0 | 0 | 67 | 0 | 0 | 18 | 28 | 22 | 0 | 144 | 0 | 80 | 33 | 6 | 0 | 0 | 0 | 6 | 0 |
| 11 | 135 | 0 | 56 | 11 | 6 | 0 | 150 | 23 | 86 | 33 | 0 | 80 | 187 | 172 | 6 | 34 | 11 | 0 | 0 | 8 |
| 12 | 205 | 0 | 429 | 128 | 73 | 133 | 165 | 127 | 391 | 213 | 468 | 0 | 384 | 89 | 90 | 52 | 0 | 0 | 0 | 6 |
| 13 | 107 | 22 | 399 | 190 | 6 | 67 | 143 | 101 | 324 | 94 | 559 | 102 | 0 | 253 | 0 | 18 | 11 | 0 | 0 | 1 |
| 14 | 11 | 0 | 0 | 22 | 0 | 0 | 18 | 0 | 22 | 0 | 22 | 0 | 22 | 0 | 0 | 11 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | 34 | 0 | 350 | 23 | 44 | 167 | 11 | 17 | 41 | 0 | 175 | 179 | 83 | 100 | 0 | 0 | 0 | 33 | 0 | 0 |
| 16 | 0 | 0 | 11 | 0 | 0 | 0 | 12 | 11 | 6 | 11 | 6 | 0 | 33 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 17 | 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6 | 0 | 11 | 22 | 33 | 0 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11 |
| 18 | 0 | 0 | 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 19 | 0 | 0 | 33 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11 | 2 | 17 | 0 | 23 | 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 12 | 6 | 11 | 11 | 45 | 0 | 17 | 0 | 0 | 6 | 11 | 0 | 0 | 0 |

La matrice des échanges-présence nous permet d'évaluer l'homogénéité de répartition des échanges de chacun des pools avec les autres

Le choix du pool initial se fait sur le pool ayant le plus grand rapport (présence / nombre de "zéro"). Ce critère nous permet de retenir comme pool initial, le pool 13.

Les figures IV.2 et IV.3 indiquent le nombre de zéros et le rapport (présence / nombre de "zéro") pour les vingt pools (Annexe iv.4 et IV.5).

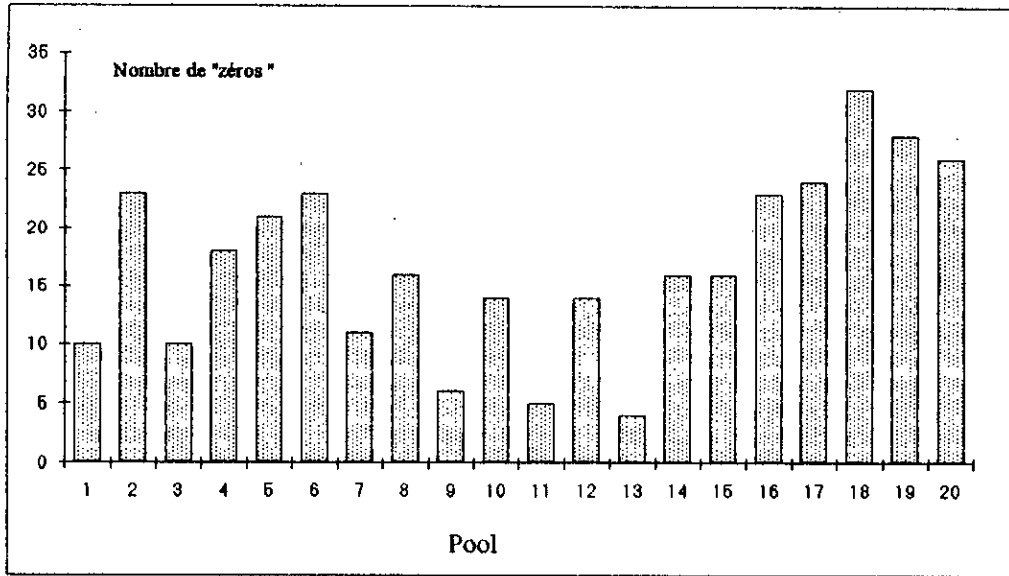


Figure IV.2 : Homogénéité des répartitions

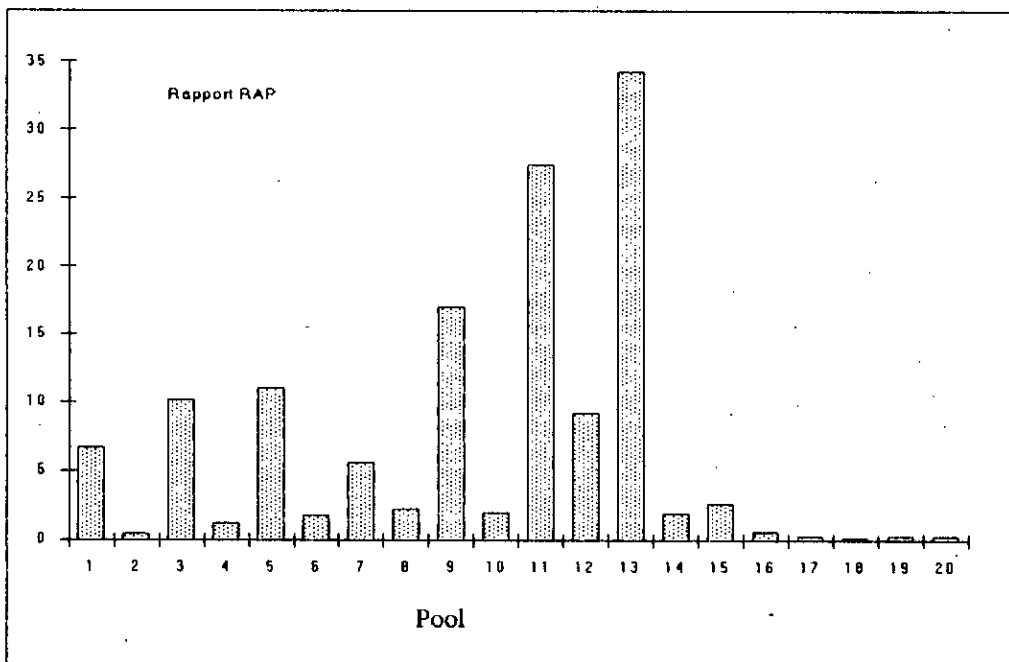


Figure IV.3 : Rapport présence / nombre de zéros

IV.2.2.2. Ligne fonctionnelle intermédiaire

La ligne fonctionnelle intermédiaire nous offre la possibilité de réunir les pools d'une manière cohérente. Elle ne représente qu'une étape de passage à la ligne finale.

a) Détermination de l'ordre d'intégration des pools

Pour l'algorithme proposé, nous avons retenu les critères suivants :

- Intégration du pool ayant le maximum d'échange avec les pools de la ligne courante.
- Dans le cas d'égalité, sélectionner (parmi ces choix égaux) celui qui a le minimum d'échange avec les pools restant .

Le vecteur suivant résume l'ordre d'intégration des 19 pools :

Tableau IV.2 : Ordre d'intégration des pools

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

Ainsi, le premier pool intégré est le pool '19', sa position d'insertion est donné par un premier vecteur de contribution. La première ligne du processus de construction est présentée comme suit :

—19—13—

b) Ligne obtenue

La ligne fonctionnelle intermédiaire obtenue après l'intégration de tous les pools, est donnée par la figure IV-4.

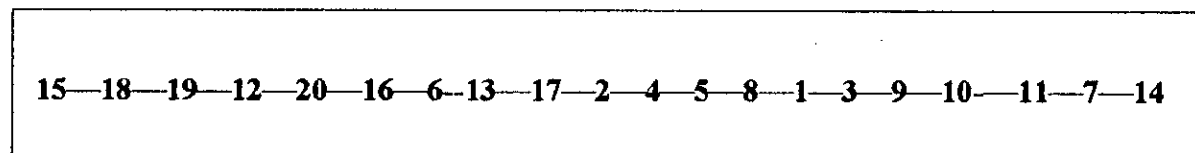


Figure IV-4 : Ligne fonctionnelle intermédiaire de l'exemple industriel

Il est à noter que cette ligne n'est pas de mauvaise qualité. En effet le nombre de retours engendrés par cette ligne est de 1851 retours, ce qui est très satisfaisant et ce qui conforte notre analyse (la construction de la ligne intermédiaire par la matrice de contribution a donnée une ligne de 2125 retours).

Le passage à la ligne fonctionnelle finale n'est qu'un passage amélioratif.

IV.2.2.3. Ligne fonctionnelle finale

Afin d'améliorer la qualité de la ligne fonctionnelle intermédiaire obtenue, l'algorithme proposé procède par un réagencement des pools en les éliminant de la ligne au fur et à mesure, et en les réintégrant dans une position qui donne un maximum de contribution.

L'ordre de réintégration des pools est le même que celui utilisé lors de la construction de la ligne fonctionnelle intermédiaire.

Première itération

On élimine le pool 19 de la ligne actuelle (le pool 19 étant le premier à réintégrer). La figure IV-5 illustre les positions d'insertion possibles pour le pool 19.

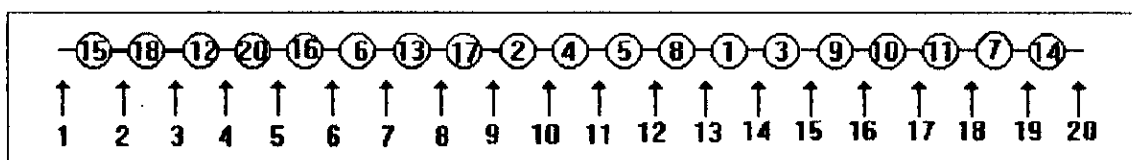


Figure IV.5 : Positions d'insertion possible du pool 19 (1ère itération de réintégration).

Le calcul des contributions de l'insertion du pool 19 à chacune des 20 positions indique un minimum de retours correspondant à la position ' 1 ' de la ligne actuelle. Ainsi, la ligne résultant de la première itération se présente comme suit :

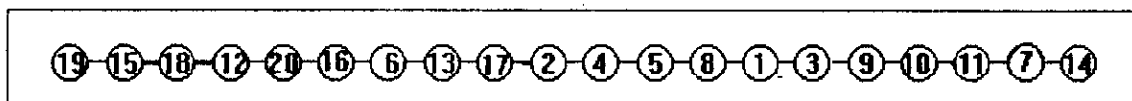


Figure IV 6 : Ligne résultant de la première itération

Après la réintégration des 19 pools, et la clôture du processus amélioratif. Nous avons obtenu la ligne fonctionnelle finale suivante :

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

Figure IV 7 : Ligne fonctionnelle finale de l'exemple industriel

Analyse du flux de production

La ligne fonctionnelle finale a les caractéristiques suivantes:

Tableau IV.3. : Analyse du flux traversant la ligne fonctionnelle finale.

| Types de mouvements | Nombre | Pourcentage |
|------------------------|-------------|---------------|
| Retours en arrière | 1714 | 27.20 |
| Passages en succession | 737 | 11.52 |
| Sauts en avant | 3872 | 61.24 |
| Total | 6323 | 100.00 |

IV.3. Construction de la ligne opérationnelle

La phase finale de la mise en ligne de l'atelier "Ferrures" est la construction de la ligne opérationnelle.

IV.3.1. Présentation des données

Les données nécessaires à la construction de la ligne opérationnelle sont les mêmes que celle du premier volet de la construction de la ligne auxquelles il faut ajouter de nouvelles données concernant la partie du calcul de la charge.

IV.3.2.1. Adéquation charge / capacité

Cette partie de l'algorithme de distribution, nécessite les données suivantes :

NP : nombre de produits fabriqués.

P : nombre de pools définis.

Seq_{i,j} : la j opération du produit i.

Chg_{i,j} : la charge de l'opération j du produit i.

Nop_i : nombre d'opérations sur le produit i.

CHT_i : charge totale sur le pool i.

CHI_i : charge relative aux opérations contenant une seule séquence.

CAP_i : la capacité du pool i.

CL_i : la classe du produit i.

Dm_i : la demande sur le produit i.

Remarque : Comme il a été souligné précédemment, nous avons tenu compte de l'aspect dynamique du problème, ce qui nous amène à considérer le nombre de lancements des produits sur l'année. Aussi, nous effectuerons les calculs qui vont suivre de la même manière.

a) Charge totale :

La charge totale sur le pool, est obtenue en sommant les charges relatives aux opérations contenues dans les pièces et dont la gamme nécessite le passage sur ce pool.

Algorithme de calcul :

de i=1 à P faire

 début

 de j=1 à NP faire

 début

 de k=1 à Nop_j

 si Seq_{j,k} = i

 faire

 CHT_i = CHT_i + Chg_{j,k} x Cl_j

fin,

fin.

fin.

b) Charge '1' opération :

Elle représente la charge sur le pool, où s'effectuent des opérations appartenant à des pièces ne contenant qu'une seule séquence (il faut noter que nous n'avons pas tenu compte de ces pièces là dans l'analyse du flux de production car elle ne touche pas à la qualité de la ligne).

Algorithme de calcul :

de $i=1$ à P faire

début

de $j=1$ à $NP1$

faire

$$CH1_{i,j} = CH1_{i,j-1} + Chg_{i,j}$$

fin,

c) Capacité totale :

Elle désigne la capacité réelle d'un pool P , dont la détermination tient compte des différents paramètres aléatoires ou d'ajustement qui peuvent influencer le bon fonctionnement des machines, telle que les pannes et les réglages.

Calcul :

$$CAP_i = Pob_i - Prt_i$$

$$Pob_i = 60 \times Njo \times Nhr \times Dis_i$$

$$Prt_i = \text{Pertes prévisionnelles}$$

où :

Pob_i : potentiel brut du pool i .

Njo : Nombre de jours ouvrables.

Nhr : Nombre d'heures de travail

Dis_i : Disponibilité dans le pool i (nombre de machines dans ce pool).

d) Taux d'occupation :

C'est le rapport entre la charge totale et la capacité d'un pool donné. Par exemple pour le cas où :

$$CAP_1 = 560012$$

$$CHT_1 = 323529$$

le taux d'occupation = 57.80 %

e) Taux de charge à réaffecter :

Il représente la partie relative aux pièces ayant une seule séquence. elle représente la charge à répartir sur les machines appartenant à ce pool et qui ont été distribuées le long de la ligne.

Le calcul de toutes ces données a été fait par un programme informatique. Les résultats obtenus sont indiqués dans le tableau IV.4.

Tableau IV.4 : Charge, capacité, taux de charge et charge à réaffecter pour les vingt pools.

| Pool | Charge totale | Charge 1 opération | Capacité | Taux d'occupation | Surcharge | Taux à réaffecter |
|------|---------------|--------------------|----------|-------------------|-----------|-------------------|
| 1 | 323769 | 24089 | 560012 | 57.8 | | 4.3 |
| 2 | 251230 | - | 216722 | 115.9 | * | - |
| 3 | 1135598 | 74625 | 1360235 | 3.5 | * | 5.5 |
| 4 | 286588 | 78734 | 433775 | 56.1 | | 18.2 |
| 5 | 102852 | - | 191462 | 53.7 | | - |
| 6 | 295424 | 108640 | 452761 | 65.3 | | 24.0 |
| 7 | 667677 | 545907 | 895494 | 74.6 | | 61.0 |
| 8 | 397970 | 108964 | 455564 | 87.4 | * | 23.9 |
| 9 | 863436 | 380764 | 871130 | 99.1 | * | 43.7 |
| 10 | 490466 | 240050 | 422360 | 116.1 | * | 56.8 |
| 11 | 816927 | 338156 | 894967 | 91.3 | * | 37.8 |
| 12 | 707473 | 214564 | 735026 | 96.3 | * | 29.2 |
| 13 | 1010839 | 410514 | | 99.8 | * | 40.2 |
| 14 | 104278 | - | 179072 | 58.2 | | - |
| 15 | 378452 | - | 433775 | 87.2 | * | - |
| 16 | 8374 | - | 231072 | 3.6 | | - |
| 17 | 54322 | - | 221014 | 24.6 | | - |
| 18 | 93150 | - | 154234 | 60.4 | | - |
| 19 | 54039 | - | 231072 | 23.4 | | - |
| 20 | 15042 | - | 220072 | 6.8 | | - |

Les figures IV-8 et IV-9 illustrent les différentes données du tableau IV-4.

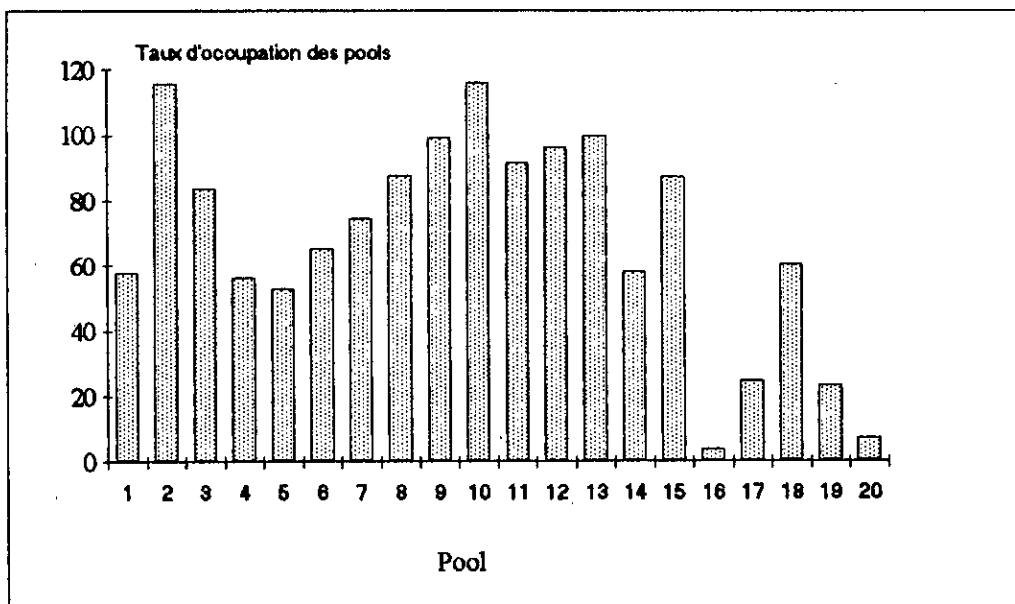


Figure IV.8 : Taux d'occupation des vingt pools

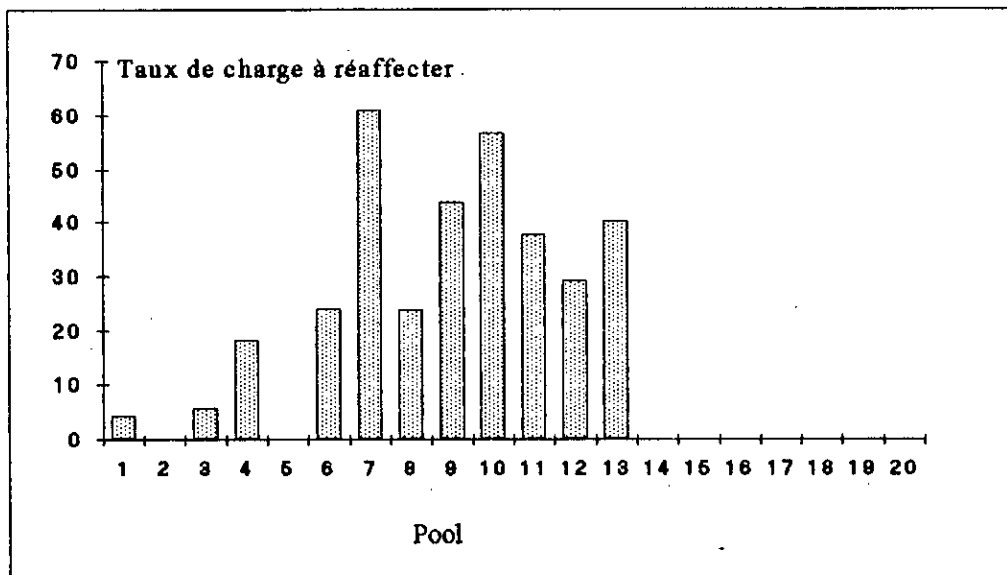


Figure IV.9 : Taux de charge à réaffecter

Remarque : L'atelier "Ferrures" a un problème de surcharge. En effet, parmi les 46 machines dont il dispose, 29 ont un taux d'occupation supérieur à 80 %.

IV.3.2. Résultats obtenus

L'obtention d'une ligne opérationnelle avec le minimum de retours possible est le but à atteindre, cependant; il est important que la ligne opérationnelle vérifie une bonne adéquation charge / capacité, tout en ayant une longueur minimale (minimum de machines).

Dans le but de déterminer le rapport entre la longueur de la ligne, le nombre de retours et la marge d'acceptation du taux de charge, nous avons distribué la ligne fonctionnelle pour différentes valeurs de cette marge.

Les résultats obtenus après l'exécution du programme de distribution pour des valeurs de la marge d'acceptation du taux de charge allant de 10% à 45%, sont présentés sur le tableau IV.5

Tableau IV.5 : Variation de la qualité de la ligne en fonction de la marge d'acceptation du taux de charge.

| MA | 10% | 15% | 20% | 25% | 30% | 35% | 40% | 45% |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|----------|----------|
| Retours | 1024 | 901 | 846 | 710 | 630 | 529 | 507 | 490 |
| Adéquation | Bonne | Bonne | Bonne | Bonne | Bonne | Bonne | Mauvaise | Mauvaise |
| Nombre de pools | 28 | 30 | 32 | 33 | 34 | 36 | 38 | 40 |

(MA désigne l'intervalle d'acceptation du taux de charge)

Il est à remarquer que le nombre de retours est inversement proportionnel à MA, ce qui était prévisible car l'utilité de MA était de rendre moins rigide le test d'adéquation. Ainsi pour de petites marges d'acceptation, le test reste restrictif et le processus itératif de distribution s'arrête rapidement (pour les valeurs de MA < 10 %, la distribution était impossible).

Les valeurs de $MA > 35\%$ donnent plus de possibilités à la distribution, engendrant un nombre de retours très bas et auxquelles est associé une longueur de la ligne importante (beaucoup de pools sont distribués).

Pour les valeurs de $MA \geq 50\%$, nous estimons que ce cas de figure nous éloigne des possibilités réelles de réaffectation des charges, aussi nous nous sommes arrêtés la valeur de $MA = 45\%$.

Compte tenu de ces observations et pour rester dans le cadre de la pratique, nous avons retenu la distribution obtenue pour $MA = 35\%$.

La répartition des taux d'occupation dans la ligne opérationnelle est donnée dans le tableau IV.6.

Tableau IV-6 : Taux d'occupation dans la ligne opérationnelle

| Pool | Position 1 | | Position 2 | | Position 3 | |
|------|------------|------|------------|------|------------|------|
| | NM | taux | NM | taux | NM | taux |
| 1 | 1 | 68 | 1 | 80 | 1 | 25 |
| 2 | 1 | 116 | | - | | - |
| 3 | 4 | 91 | 1 | 92 | 1 | 46 |
| 4 | 1 | 72 | 1 | 60 | | - |
| 5 | 1 | 54 | | - | | - |
| 6 | 2 | 65 | | - | | - |
| 7 | 2 | 84 | 1 | 65 | 1 | 65 |
| 8 | 1 | 96 | 1 | 79 | | - |
| 9 | 2 | 104 | 1 | 88 | 1 | 100 |
| 10 | 1 | 113 | 1 | 119 | | - |
| 11 | 2 | 98 | 1 | 91 | 1 | 78 |
| 12 | 2 | 99 | 1 | 91 | | - |
| 13 | 2 | 107 | 1 | 92 | 1 | 90 |
| 14 | 1 | 58 | | | | |
| 15 | 2 | 87 | | | | |

Suite du tableau IV-6 : Taux d'occupation dans la ligne opérationnelle

| Pool | Position 1 | | Position 2 | | Position 3 | |
|------|------------|------|------------|------|------------|------|
| | NM | taux | NM | taux | NM | taux |
| 16 | 1 | 4 | | | | |
| 17 | 1 | 25 | | | | |
| 18 | 1 | 60 | | | | |
| 19 | 1 | 23 | | | | |
| 20 | 1 | 7 | | | | |

(NM désigne le nombre de machines)

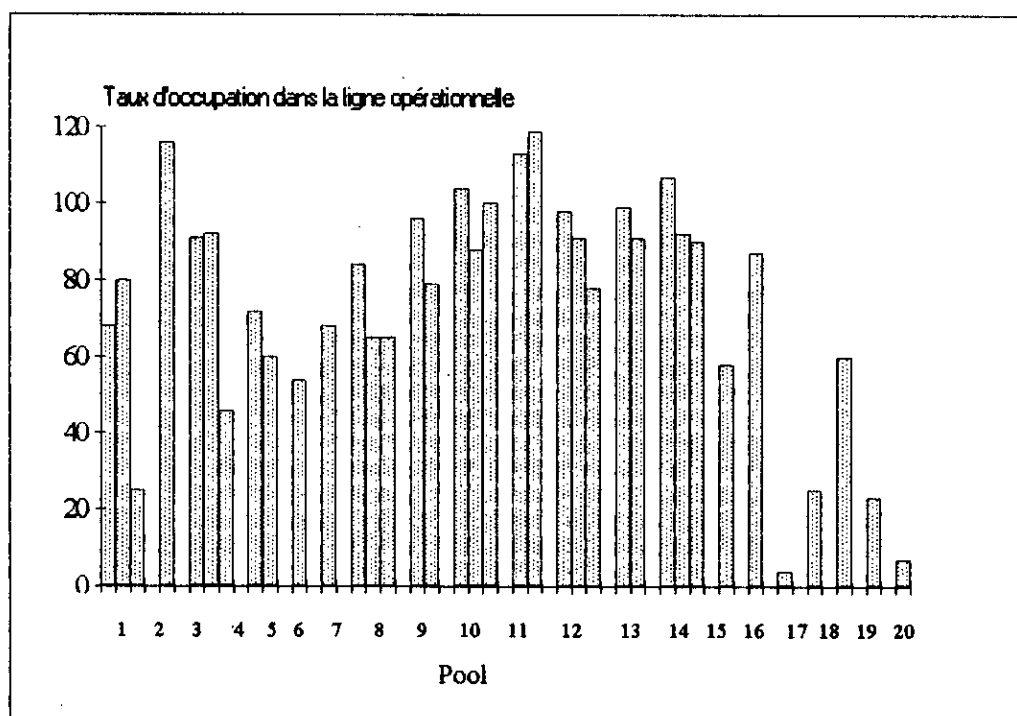


Figure IV. 10 : Taux d'occupation dans la ligne opérationnelle

IV.3.3. Ligne finale

La ligne finale obtenue après la distribution est la suivante :

Tableau IV-7 : Ligne opérationnelle de l'exemple industriel

| Position | N° | Pool | Position | N° | Pool | Position | N° | Pool |
|----------|----|------|----------|----|------|----------|----|------|
| 1 | 3 | 7 | 13 | 1 | 5 | 25 | 3 | 9 |
| 2 | 3 | 13 | 14 | 1 | 16 | 26 | 2 | 10 |
| 3 | 1 | 19 | 15 | 1 | 8 | 27 | 2 | 1 |
| 4 | 1 | 2 | 16 | 1 | 3 | 28 | 2 | 3 |
| 5 | 1 | 15 | 17 | 1 | 9 | 29 | 1 | 14 |
| 6 | 1 | 12 | 18 | 2 | 12 | 30 | 2 | 11 |
| 7 | 1 | 6 | 19 | 1 | 10 | 31 | 1 | 18 |
| 8 | 1 | 1 | 20 | 1 | 11 | 32 | 2 | 9 |
| 9 | 1 | 13 | 21 | 1 | 7 | 33 | 2 | 7 |
| 10 | 1 | 17 | 22 | 2 | 13 | 34 | 3 | 11 |
| 11 | 1 | 20 | 23 | 2 | 4 | 35 | 3 | 1 |
| 12 | 1 | 4 | 2 | 2 | 8 | 36 | 3 | 3 |

IV.3.4. Analyse du flux de production

Le flux de production dans la ligne opérationnelle est résumé dans le tableau IV-8.

Tableau IV-8: Flux de production traversant la ligne opérationnelle.

| Mouvements | Nombre | Pourcentage |
|--------------|--------|-------------|
| P.successifs | 825 | 13.05 |
| Sauts | 4969 | 78.59 |
| Retours | 529 | 8.37 |
| flux total | 6323 | 100.00 |

IV.4. Résultats

Afin d'évaluer les résultats obtenus par l'heuristique, nous avons comparé nos résultats avec ceux obtenus à l'aide du modèle mathématique, et avec ceux obtenus par la combinaison du modèle mathématique et de la matrice de contribution [2].

Les résultats sont présentés dans les tableaux IV-9 et IV.10.

IV.4.1. Ligne des 16 pools

Tableau IV.9 : Comparaison avec les résultats du modèle mathématique [2]

| Méthode | Modèle mathématique | | Méthode Heuristique | |
|----------------|---------------------|----------|---------------------|----------|
| | Retours | Longueur | Retours | Longueur |
| Ligne 16 pools | 1633 | 16 | 1681 | 16 |

L'application de l'heuristique aux 16 pools pris en compte dans le modèle mathématique (en écartant les pools 17, 18, 19 et 20), a donné une ligne de 1681 retours.

La comparaison de ce résultat avec celui obtenu par le modèle mathématique dont le nombre de retours est de 1633, permet de conclure que l'heuristique donne une solution très rapproché de la solution exacte.

Ceci conforte notre analyse concernant le problème d'interaction entre les machines (une première ébauche de construction de la ligne par la matrice de contribution a donné une ligne de mauvaise qualité, où le nombre de retours était supérieur à deux milles !).

IV.4. 2. Ligne des 20 pools

Tableau IV.10 : Comparaison avec les résultats du modèle mathématique et la matrice de contribution[2]

| Méthode | Modèle mathématique et matrice de contribution | | Méthode Heuristique | |
|----------------|--|----------|---------------------|----------|
| | Retours | Longueur | Retours | Longueur |
| Ligne 20 pools | 1724 | 20 | 1714 | 20 |

La ligne des 20 pools obtenue par l'heuristique, engendre moins de retours que celle élaborée par la combinaison du modèle mathématique et de la matrice de contribution. Ceci peut s'expliquer comme suit :

La ligne des 16 pools obtenue par le modèle mathématique, est une solution optimale du sous problème (16 parmi 20 pools), et ne peut être considérée comme solution optimale du problème en entier. En effet, l'agencement des 16 pools dans cette ligne, s'est fait en éliminant les quatre pools écartés des séquences des produits, ignorant ainsi leur interaction avec les seize autres pools pris en considération.

Le passage de la ligne des 16 pools à la ligne de 20 pools n'est pas optimal du fait de l'utilisation de la matrice de contribution.

IV.5. Programme informatique

L'implémentation de l'heuristique élaborée a été faite en langage de programmation Turbo-Pascal version 6.0 [5]. Le programme informatique est sous la forme d'un programme principal faisant appel à différentes unités selon la structure suivante :

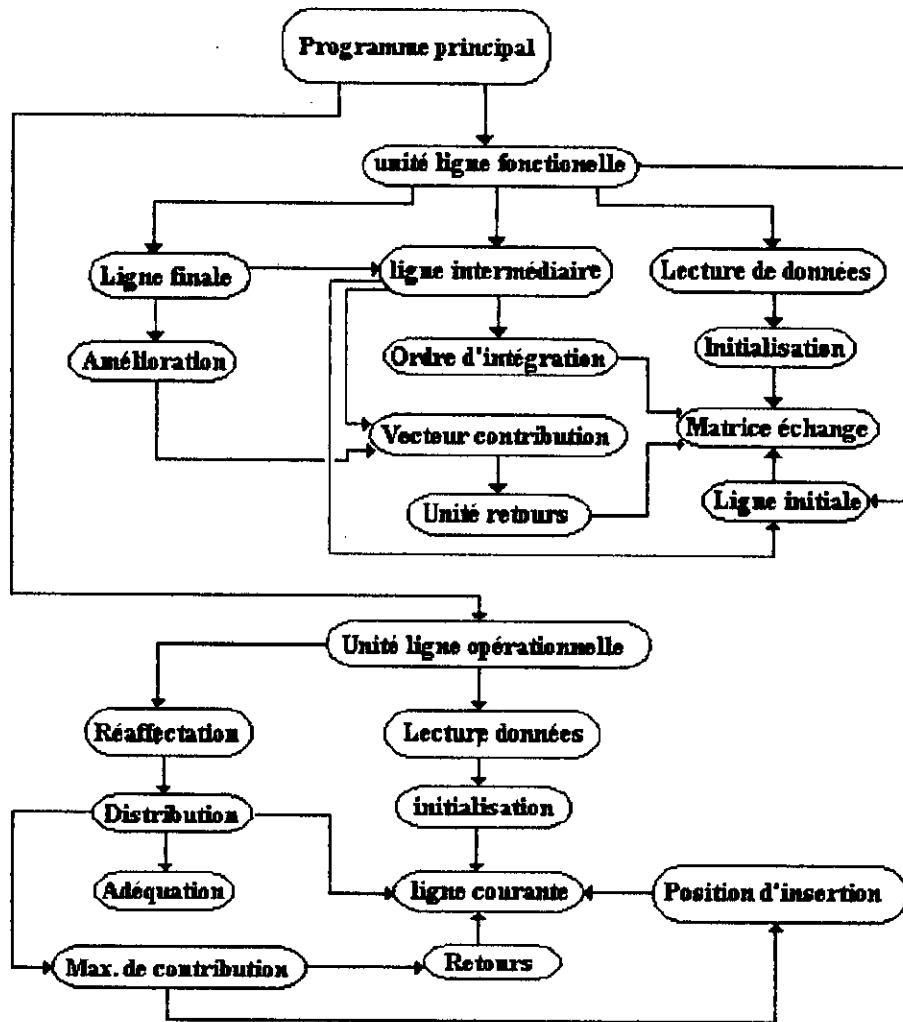


Figure IV.11 : Structure du programme

La résolution de l'exemple industrielle par le programme de calcul sur un PC DX4 100MHz a demandé un temps d'exécution de 2.2 secondes et un espace mémoire alloué aux variables du programme de 200 Ko.

Conclusion générale

Nous avons présenté une approche de résolution pour la mise en ligne des ateliers multi-produits.

Cette approche est basée sur une méthode heuristique. Notre travail a essentiellement pour objectif, l'élaboration d'une heuristique permettant l'obtention d'une manière simple et fiable, d'une ligne, ce qui permet de donner une première information sur la possibilité de mise en ligne d'un atelier donné.

L'heuristique élaborée est basée sur un algorithme combinant les deux types d'algorithmes approchés, à savoir les algorithmes itératifs et gloutons. Cette combinaison se traduit d'une part, par un nombre fixe d'itérations, égal au nombre de machines à mettre en ligne, ce qui assure la convergence de l'algorithme. D'autre part, le passage d'une étape à une autre se fait suivant des critères de sélection assurant les choix les plus judicieux.

L'heuristique présentée, se soucie principalement des interactions mutuelles et globales définies entre les machines (moyens de production). Ces interactions traduisent les relations qui existent entre chaque couple de machines, présent dans les gammes de fabrication des produits et ce en qualifiant les échanges entre ces deux machines.

La construction de la ligne se fait sur la base des interactions entre les machines. La première étape de cette construction est le choix d'un pool initial représentant le pool ayant la meilleure répartition des échanges avec les autres pools. La deuxième étape est la

Conclusion générale

construction d'une ligne intermédiaire en définissant un ordre d'intégration basé sur la notion d'échange maximal avec la ligne courante. La dernière étape est de nature améliorative, elle consiste à réintégrer les pools dans de nouvelles positions, pour l'obtention d'une ligne fonctionnelle finale

L'application de l'heuristique à un exemple industriel (atelier "Ferrures" C.V.I Rouiba, comportant 273 pièces, de gammes de fabrication allant de deux à dix opération d'usinage), nous a permis de tester sa fiabilité quand au nombre de retours engendrés par la ligne fonctionnelle obtenu. On a obtenu 1714 retours, ce qui est très satisfaisant.

Cette application a permis également de tester les performances de cette heuristique, à savoir, un temps d'exécution de 2.20 secondes et un espace mémoire alloué pour la déclaration des variables, de 200 K.octets.

La démarche suivie pour tenir compte de la notion d'interaction entre les machines, permet de choisir d'autres critère de sélection soit lors de la construction de la ligne initiale, ou pour la définition de l'ordre d'intégration des pools. Ceci offre la possibilité de définir d'autres aspects constructifs et amélioratifs, pouvant se référer à d'autres critères, ce qui peut faire l'objet d'une multitude de travaux futurs.

Bibliographie

- [1] Barth M
"Contribution méthodologique à la réorganisation des ateliers de production mécaniques"
Thèse de doctorat de l'UFR en génie des systèmes industriels de l'Institut Normal Polytechnique de Lorraine, Dec 1991

- [2] Benosman A, Sahraoui Y
"Méthode de résolution du problème de mise en ligne du flux dans un atelier multi-produits, basée sur un modèle mathématique; application : Atelier Ferrures"
Projet de Fin d'Etudes soutenu a l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger,
Juin 1995

- [3] 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

- [4] De Guio
" Contribution a l'organisation d'ateliers en îlots de fabrication "
Thèse de doctorat sutenu a l'Université Louis Pasteur de Strasbourg, 1991

- [5] Delannoy C : " Maitriser Turbo Pascal 6.0 et la Programmation Orientée Objet "
Edition Eyrolles

- [6] Delfosse N
"Organisation industrielle "
volume 2 " Les implantations et les manutentions "
Entreprise moderne d'édition

Bibliographie

- [7] Greif M, Baglin G, Bruel O, Garreau A
" Management Industriel et Logistique "
Edition Economica 1990
- [8] 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
- [9] 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
- [10] Menia F, Berrached
" Mise en ligne du flux de production dans l'atelier ferrures "
Projet de Fin d'Etudes soutenu a l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Juin 1988
- [11] Minoux M, Gordrau M
"Graphes et algorithmes"
Edition Eyrolles, Paris 1979
- [12] Mokhtari S, Tayebi M,
"Contribution à la réorganisation de l'atelier Ferrures en îlots de fabrication"
Projet de Fin d'Etudes soutenu a l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger,
Juin 1994
- [13] Souilah A : " La séquence globale minimale "
Rapport de recherche no.1328 de l'unité de recherche de l'INRIA Lorraine,
Octobre 1990

Liste des tableaux

| Tableau | Titre | Page |
|---------|--|------|
| I.1 | Désignation des pièces de l'exemple | 5 |
| IV.1 | Echange-présence | |
| IV.2 | Ordre d'intégration des pools | 80 |
| IV.3 | Analyse du flux traversant la ligne fonctionnelle finale | 82 |
| IV.4 | Charge, capacité, taux de charge et charge à réaffecté pour les vingt pools | 85 |
| IV.5 | Variation de la qualité de la ligne opérationnelle avec la marge d'acceptation du taux de charge | 87 |
| IV.6 | Taux d'occupation dans la ligne opérationnelle | 88 |
| IV.7 | Ligne opérationnelle de l'exemple industriel | 90 |
| IV.8 | Analyse du flux traversant la ligne opérationnelle | 90 |
| IV.9 | Comparaison avec les résultats du modèle mathématique | 91 |
| IV.10 | Comparaison avec les résultats du modèle mathématique et la matrice de contribution | 92 |

Liste des figures

| Figure | Titre | Page |
|--------|---|------|
| I.1 | Implantation en sections homogènes | 6 |
| I.2 | Implantation en ligne | 7 |
| I.3 | Types de mouvements dans une ligne | 8 |
| I.4 | Passage des pièces de l'exemple dans la ligne | 9 |
| II.1 | Passage des pièces dans la SGM | 15 |
| IV.1 | Degrés de sollicitation des pools | 77 |
| IV.2 | Homogénéité de répartition | 79 |
| IV.3 | Rapport présence/nombre de zéros | 79 |
| IV.4 | Ligne fonctionnelle intermédiaire de l'exemple industriel | 80 |
| IV.5 | Positions d'insertion possible du pool 19 (1 ^{ère} itération de réintégration) | 81 |
| IV.6 | Ligne résultante de la première itération | 81 |
| IV.7 | Ligne fonctionnelle finale de l'exemple industriel | 82 |
| IV.8 | Taux d'occupation des vingts pools | 86 |
| IV.9 | Taux de charge à réaffecter | 86 |
| IV.10 | Taux d'occupation dans la ligne opérationnelle | 89 |
| IV.11 | Structure du programme | 89 |

Liste des annexes

Annexe III.1 : Plan général de l'heuristique

Annexe IV.1 : Regroupement en pools des machines de l'atelier "Ferrures"

Annexe IV.2 : Liste des pièces

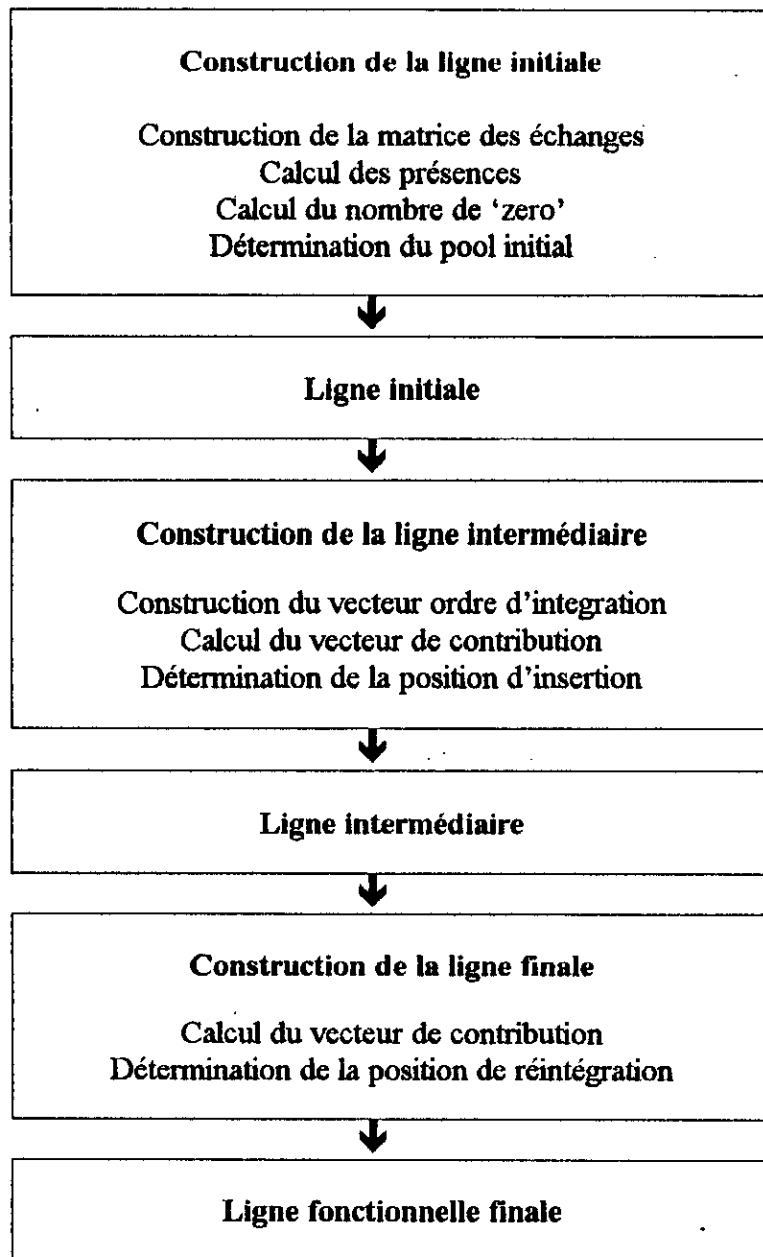
Annexe IV.3 : Degrés de sollicitation des pools

Annexe IV.4 : Homogénéité de répartition

Annexe IV.5 : Rapport présence / nombre de zéros

Annexe IV.6 : Passage des pièces dans la ligne opérationnelle.

Annexe III.1 : Plan général de l'heuristique



Annexe IV.1 :

Regroupements, des machines en pool de l'atelier Ferrures

| Pool | Nombre de machines | désignation | Matricule SONACOM | Fonction |
|------|--------------------|--------------------------|--|--|
| 1 | 3 | Tour a.m.c P240 | C006251 C006401 C008101 | Tour universel |
| 2 | 1 | Tour Vle Graffenstaden | C009601 | Tour pour la fabrication des pièces à grand précision. |
| 3 | 6 | Perceuse GSP 450 K 150 | C000721 C007641 C011091 C008631 C011101 C003111 | Perceuses pouvant effectuer plusieurs opérations en même temps, au moyen d'un chariot porte foret. |
| 4 | 2 | Perceuse GSP Rle407 Q17 | C008111 C011111 | Perceuses spécialisées dans l'usinage des pièces de grande tailles. |
| 5 | 1 | Fraiseuse unv Gambin | C008121 | Fraiseuse à caractère universel, effectuant des déplacements dans toutes les directions. |
| 6 | 2 | Perceuse trosseille | C003161 C015951 | Pool constitué de deux perceuses identiques. |
| 7 | 4 | Perceuse Rochelet 4 bras | C0063301 C0103411 C007771 C0097721 | Perceuses multi-broches, effectuant plusieurs opérations dans un plans horizontal. |
| 8 | 2 | Perceuse GSP 2407s | C006261 C0011061 | Perceuses destinées pour l'usinage des pièces de grandes formes. |
| 9 | 4 | Perceuse GSO 250R | C006291 C011081 C009801 C000931 | Perceuses équipées d'une table à mouvements croisés |

Annexes

| Pool | Nombre de machines | Désignation | Matricule SONACOM | Fonction |
|-------------|---------------------------|------------------------------|---|---|
| 10 | 2 | Perceuse GSP 25RB | C003251 C003241 | Perceuses identiques à celle du pool 9, mais destinées à usiner les pièces de grande forme. |
| 11 | 4 | Perceuse GSP 25 | C006271 C006281 C011071 C0098611 | Perceuses identiques à ceux du pool 8, sauf qu'elles peuvent usiner des pièces de formes différentes. |
| 12 | 3 | Fraiseuse forest V | C003151 C006321 C008781 | Fraiseuses |
| 13 | 4 | Fraiseuse Rouchaud Fh80 | C006341 C009731 C006331 C006351 | Fraiseuse semi-automatiques. |
| 14 | 1 | Fraiseuse à levier Fh40 | C003261 | Petite fraiseuse effectuant des opérations de sciage mécanique. |
| 15 | 2 | Fraiseuse forest H500 | C003531 C003131 | Fraiseuses semi-automatiques. |
| 16 | 1 | Tour et mape- meule Huard | C006361 | Petite meule spécialisée dans la préparation de l'état de surface. |
| 17 | 1 | Fraiseuse Almo Fh80 | C015141 | Fraiseuse à utilisation restreinte à cause d'un taux de panne élevé. |
| 18 | 1 | Fraiseuse aléseuse CNC Wotan | C3141 | Usinage des pivots. |
| 19 | 1 | Machine à dresser | C006371 | Machine spécialisée dans l'opération de dressage-face. |
| 20 | 1 | Fraiseuse Almo Fv80 | C030111 | Fraiseuse à utilisation élevée à cause d'un taux de panne élevé. |

Annexe IV.2 :

Liste des pièces fabriquées dans l'atelier Ferrures de CVI-Rouiba

| Pièces | Séquences | Charge | Classe | Quantité |
|--------|-------------------|------------------------------------|--------|----------|
| P1 | 12 9 7 11 7 | 1.75 2.30 1.10 2.20 0.80 | 6 | 380 |
| P2 | 11 7 | 8.69 1.00 | 11 | 1470 |
| P3 | 9 10 | 2.85 1.60 | 6 | 1470 |
| P4 | 12 9 1 9 | 2.00 2.10 4.90 4.50 | 6 | 1630 |
| P5 | 11 7 | 8.69 1.00 | 11 | 1800 |
| P6 | 11 13 1 | 2.95 2.10 0.85 | 6 | 4200 |
| P7 | 13 8 9 13 | 1.25 6.25 4.50 2.50 | 6 | 1000 |
| P8 | 2 9 10 8 | 5.40 11.90 1.30 7.50 | 11 | 180 |
| P9 | 2 9 10 8 | 5.40 11.90 1.30 7.50 | 11 | 180 |
| P10 | 2 9 8 11 7 9 | 4.00 13.00 5.50 1.20 2.20 1.80 | 11 | 180 |
| P11 | 11 7 13 | 1.60 0.30 0.70 | 6 | 850 |
| P12 | 9 11 | 14.50 4.30 | 11 | 1200 |
| P13 | 11 9 | 0.80 4.05 | 11 | 1200 |
| P14 | 9 8 | 5.25 2.80 | 11 | 3260 |
| P15 | 9 7 | 2.50 1.50 | 6 | 500 |
| P16 | 9 13 3 12 11 | 3.80 4.00 18.50 3.80 0.80 | 11 | 250 |
| P17 | 16 3 13 8 10 | 1.50 10.00 1.95 5.00 1.80 | 11 | 500 |
| P18 | 11 1 | 3.30 2.50 | 6 | 630 |
| P19 | 12 3 8 | 4.00 3.00 11.00 | 6 | 360 |
| P20 | 12 3 7 8 9 | 5.20 3.00 1.00 6.00 3.00 | 6 | 180 |
| P21 | 13 3 9 13 3 11 14 | 6.10 3.50 1.20 2.80 7.40 0.80 0.80 | 11 | 360 |
| P22 | 12 6 10 13 9 1 | 2.90 2.60 1.50 4.60 4.05 2.10 | 11 | 720 |
| P23 | 15 3 | 15.00 53.90 | 11 | 360 |
| P24 | 12 9 11 | 2.50 7.90 6.00 | 11 | 360 |
| P25 | 15 3 12 11 9 | 10.00 7.50 3.00 4.00 12.50 | 6 | 180 |
| P26 | 3 1 | 29.80 6.00 | 11 | 360 |
| P27 | 1 13 17 11 | 1.40 1.50 1.55 2.20 | 11 | 1440 |
| P28 | 15 3 12 11 9 | 10.00 7.50 3.00 4.00 12.50 | 6 | 180 |
| P29 | 12 9 7 | 2.40 2.10 1.50 | 11 | 360 |
| P30 | 12 15 6 7 | 3.00 2.50 3.30 3.00 | 11 | 720 |
| P31 | 12 6 9 13 9 1 | 2.50 2.60 1.50 3.80 4.20 4.50 | 11 | 360 |
| P32 | 1 9 | 6.00 3.20 | 6 | 360 |
| P33 | 15 3 18 | 10.50 25.00 120.00 | 11 | 180 |
| P34 | 12 9 11 | 2.40 3.20 1.20 | 11 | 720 |
| P35 | 15 18 | 10.50 120.00 | 11 | 180 |
| P36 | 13 11 | 5.00 2.80 | 11 | 720 |
| P37 | 11 13 | 2.50 2.50 | 11 | 720 |

Annexes

| Pièces | Séquences | Charge | Classe | Quantité |
|--------|-----------------|-----------------------------------|--------|----------|
| P38 | 12 16 | 2.40 0.35 | 1 | 100 |
| P39 | 1 9 | 2.30 2.85 | 11 | 2350 |
| P40 | 11 12 13 | 2.15 1.30 2.05 | 11 | 2180 |
| P41 | 7 11 | 2.00 2.10 | 11 | 760 |
| P42 | 13 3 11 | 1.95 2.15 7.00 | 6 | 200 |
| P43 | 13 3 11 | 1.95 2.15 7.00 | 6 | 200 |
| P44 | 11 1 11 7 | 1.10 3.00 3.00 1.00 | 6 | 200 |
| P45 | 1 9 7 13 | 4.20 2.00 0.40 3.00 | 11 | 200 |
| P46 | 19 13 11 | 0.85 2.00 3.00 | 6 | 500 |
| P47 | 12 8 13 8 11 | 1.00 2.30 6.20 4.60 3.20 | 6 | 200 |
| P48 | 12 8 13 8 11 | 1.00 2.30 6.20 4.60 3.20 | 6 | 200 |
| P49 | 6 13 9 3 12 | 3.00 4.00 3.25 18.50 3.80 | 6 | 200 |
| P50 | 8 11 | 2.95 1.00 | 6 | 250 |
| P51 | 8 11 | 2.70 1.20 | 6 | 250 |
| P52 | 16 9 | 0.80 2.00 | 6 | 1000 |
| P53 | 12 13 | 1.10 0.90 | 11 | 5470 |
| P54 | 12 13 | 1.10 0.90 | 11 | 5470 |
| P55 | 12 3 9 13 9 | 2.40 9.50 2.80 4.35 5.80 | 11 | 250 |
| P56 | 12 9 11 8 11 1 | 2.25 5.00 0.60 7.25 0.90 13.35 | 6 | 500 |
| P57 | 12 13 11 7 | 3.15 2.00 3.70 1.20 | 11 | 500 |
| P58 | 15 3 1 3 11 | 6.95 4.50 8.00 3.50 2.00 | 6 | 250 |
| P59 | 13 3 13 11 | 4.50 9.90 2.50 2.50 | 11 | 400 |
| P60 | 3 9 12 | 33.00 12.20 4.00 | 11 | 250 |
| P61 | 15 11 13 9 | 3.80 4.65 4.00 12.60 | 6 | 250 |
| P62 | 12 5 3 5 8 3 | 20.50 6.50 35.00 17.75 8.00 9.50 | 11 | 250 |
| P63 | 12 5 3 5 8 3 | 20.50 6.50 35.00 17.75 8.00 9.50 | 11 | 250 |
| P64 | 13 1 9 7 | 3.80 6.00 8.00 8.00 | 11 | 250 |
| P65 | 13 1 9 7 | 3.80 6.00 8.00 8.00 | 11 | 250 |
| P66 | 12 11 7 | 3.00 6.30 2.00 | 11 | 500 |
| P67 | 12 13 3 | 16.95 2.70 8.00 | 11 | 500 |
| P68 | 12 9 | 4.40 2.30 | 6 | 500 |
| P69 | 12 9 | 4.40 2.30 | 6 | 500 |
| P70 | 12 1 4 | 24.60 12.00 5.55 | 11 | 250 |
| P71 | 12 9 13 8 | 2.00 3.40 3.30 12.80 | 6 | 250 |
| P72 | 5 7 | 4.00 2.40 | 6 | 500 |
| P73 | 13 12 7 5 | 2.00 1.50 10.00 10.20 | 6 | 250 |
| P74 | 13 3 | 6.75 6.00 | 11 | 500 |
| P75 | 4 5 | 39.00 16.00 | 11 | 1350 |
| P76 | 4 5 | 12.00 15.45 | 11 | 750 |
| P77 | 12 11 1 16 13 | 1.40 2.15 0.80 0.20 1.55 | 11 | 4230 |
| P78 | 12 11 1 16 13 | 1.40 2.15 0.80 0.20 1.55 | 11 | 4230 |
| P79 | 12 8 | 7.00 4.50 | 11 | 1080 |
| P80 | 13 8 9 1 | 2.70 4.25 8.50 4.60 | 11 | 2700 |
| P81 | 9 7 | 3.15 2.25 | 11 | 2660 |
| P82 | 4 5 | 12.00 15.50 | 11 | 880 |
| P83 | 11 1 13 11 | 1.20 2.00 2.00 4.25 | 6 | 250 |
| P84 | 20 11 7 8 11 | 1.00 3.30 1.20 2.20 2.20 | 6 | 250 |
| P85 | 19 3 13 11 3 14 | 19.00 3.00 13.00 11.00 3.00 14.00 | 11 | 2660 |

Annexes

| Pièces | Séquences | Charge | Classe | Quantité |
|--------|------------------------|---|--------|----------|
| P86 | 12 9 11 13 11 | 3.85 2.80 5.60 2.20 0.60 | 11 | 1330 |
| P87 | 13 9 12 11 | 13.00 9.00 12.00 11.00 | 11 | 1330 |
| P88 | 13 9 12 11 | 3.20 3.65 3.20 4.40 | 11 | 1330 |
| P89 | 13 9 13 11 | 1.35 3.20 1.35 1.98 | 11 | 2660 |
| P90 | 19 10 | 0.60 1.40 | 1 | 450 |
| P91 | 12 9 1 13 9 | 2.10 4.00 3.00 5.00 3.70 | 11 | 2840 |
| P92 | 2 15 12 4 15 3 15 12 3 | 5450 1050 800 1600 750 3990 1650 850 1000 | 11 | 2840 |
| P93 | 12 3 1 3 | 4.20 3.50 8.50 8.00 | 11 | 1080 |
| P94 | 12 6 1 9 | 6.75 2.80 9.50 6.65 | 11 | 1620 |
| P95 | 5 10 1 7 19 13 | 2.60 3.70 1.00 1.00 0.20 6.20 | 6 | 1470 |
| P96 | 13 11 7 | 1.60 3.35 0.80 | 6 | 3800 |
| P97 | 13 11 7 | 1.10 1.30 2.00 | 1 | 1500 |
| P98 | 12 9 7 1 9 | 2.40 2.50 1.50 6.00 4.50 | 11 | 1100 |
| P99 | 16 7 | 0.90 0.60 | 6 | 250 |
| P100 | 16 7 11 | 1.00 1.05 6.10 | 6 | 250 |
| P101 | 11 12 13 11 | 4.75 8.00 2.50 5.00 | 6 | 500 |
| P102 | 12 10 | 1.80 3.90 | 11 | 180 |
| P103 | 2 13 3 | 8.00 2.25 6.00 | 11 | 500 |
| P104 | 15 4 | 5.50 28.00 | 6 | 180 |
| P105 | 13 10 9 13 4 | 3.00 5.50 1.20 2.00 4.85 | 11 | 180 |
| P106 | 13 9 13 4 | 2.20 3.80 2.30 5.10 | 6 | 260 |
| P107 | 12 4 9 4 | 3.00 2.60 0.80 17.10 | 11 | 180 |
| P108 | 13 12 13 3 11 | 5.25 2.10 2.10 16.90 1.00 | 11 | 250 |
| P109 | 7 16 | 0.50 0.80 | 1 | 250 |
| P110 | 13 11 | 4.50 2.10 | 11 | 2160 |
| P111 | 6 13 9 | 2.50 6.75 3.00 | 11 | 2160 |
| P112 | 13 6 13 12 3 7 3 | 7.05 3.00 8.40 2.20 6.80 0.80 5.85 | 1 | 1000 |
| P113 | 12 9 12 | 2.60 7.70 1.40 | 11 | 600 |
| P114 | 5 8 | 3.00 5.50 | 6 | 300 |
| P115 | 12 3 12 8 | 2.70 6.50 2.35 5.95 | 11 | 1080 |
| P116 | 12 3 | 2.35 12.50 | 11 | 1080 |
| P117 | 12 3 | 2.35 12.50 | 11 | 1080 |
| P118 | 5 1 | 1.55 1.85 | 6 | 2080 |
| P119 | 1 3 | 33.00 8.20 | 11 | 300 |
| P120 | 1 8 | 5.40 1.80 | 6 | 1080 |
| P121 | 12 3 7 1 | 1.40 2.00 1.80 4.20 | 6 | 1080 |
| P122 | 12 15 3 13 3 | 6.60 3.00 23.10 4.00 24.00 | 11 | 2160 |
| P123 | 15 6 12 3 14 | 8.65 3.60 3.35 10.10 1.00 | 1 | 2160 |
| P124 | 13 7 | 1.40 2.60 | 6 | 550 |
| P125 | 13 7 | 1.40 2.60 | 6 | 550 |
| P126 | 13 11 | 1.40 2.00 | 6 | 1100 |
| P127 | 15 3 | 11.55 56.30 | 11 | 1040 |
| P128 | 5 11 14 7 | 3.20 3.80 0.80 2.10 | 1 | 250 |
| P129 | 11 1 14 7 | 2.80 0.90 0.80 2.70 | 6 | 250 |
| P130 | 7 13 | 1.80 0.35 | 1 | 250 |
| P131 | 12 11 | 2.25 2.40 | 11 | 3260 |
| P132 | 13 3 9 | 6.00 3.50 2.00 | 6 | 1080 |
| P133 | 12 6 | 2.10 0.90 | 11 | 1080 |

Annexes

| Pièces | Séquences | Charge | Classe | Quantité |
|--------|-----------------------------|---|--------|----------|
| P134 | 19 9 | 0.70 3.55 | 11 | 2660 |
| P135 | 9 1 | 1.30 2.00 | 11 | 450 |
| P136 | 7 9 11 | 3.20 3.00 1.00 | 11 | 7140 |
| P137 | 5 11 | 2.60 1.60 | 1 | 500 |
| P138 | 13 6 3 | 4.55 3.40 3.00 | 11 | 720 |
| P139 | 12 6 10 15 4 | 3.00 2.60 0.60 2.20 6.00 | 6 | 180 |
| P140 | 13 8 10 11 14 | 1.85 17.50 11.00 0.80 0.55 | 11 | 3260 |
| P141 | 12 6 12 10 13 4 10 11 | 2.75 1.80 2.70 7.75 1.50 5.70 3.95 1.95 | 11 | 1080 |
| P142 | 12 11 13 11 | 1.40 4.00 1.50 2.70 | 11 | 2720 |
| P143 | 17 11 1 | 3.10 4.60 5.70 | 11 | 1000 |
| P144 | 15 6 12 3 14 | 8.65 3.00 3.35 10.10 1.00 | 11 | 2660 |
| P145 | 13 6 13 12 3 7 3 | 7.05 3.00 8.35 2.20 6.80 0.80 5.85 | 11 | 1760 |
| P146 | 12 6 12 10 13 4 10 11 | 2.75 1.80 2.70 6.55 1.50 5.70 3.95 1.95 | 6 | 250 |
| P147 | 10 13 | 5.50 6.00 | 1 | 1300 |
| P148 | 12 6 12 10 11 10 13 4 10 11 | 2.75 1.80 2.70 3.40 1.10 4.35 1.50 5.70 3.95 1.95 | 11 | 1470 |
| P149 | 12 1 13 | 1.50 1.00 3.50 | 6 | 800 |
| P150 | 12 1 13 | 1.50 1.00 3.50 | 6 | 800 |
| P151 | 12 11 1 13 | 1.50 1.40 1.00 3.50 | 6 | 420 |
| P152 | 9 13 3 | 3.00 4.00 2.50 | 6 | 420 |
| P153 | 9 1 | 1.00 1.00 | 1 | 800 |
| P154 | 12 9 | 2.00 6.50 | 6 | 420 |
| P155 | 12 9 15 8 11 | 2.05 3.40 3.15 2.40 2.40 | 6 | 550 |
| P156 | 12 9 15 | 2.05 3.40 3.15 | 6 | 550 |
| P157 | 12 6 12 10 13 4 10 11 | 2.75 1.80 2.70 7.75 1.50 5.70 3.95 1.95 | 11 | 3860 |
| P158 | 13 3 12 9 1 3 | 6.40 11.30 2.20 4.00 10.00 6.30 | 11 | 120 |
| P159 | 12 3 7 | 1.50 10.00 6.30 | 11 | 1630 |
| P160 | 15 6 13 3 14 | 5.10 3.50 2.50 10.00 0.70 | 11 | 1630 |
| P161 | 15 6 13 3 14 | 5.10 3.50 2.50 10.00 0.70 | 11 | 1630 |
| P162 | 15 6 12 11 12 | 5.85 2.60 1.55 3.75 2.70 | 11 | 1630 |
| P163 | 15 6 12 11 12 | 5.85 2.60 1.55 3.75 2.70 | 11 | 1630 |
| P164 | 13 6 13 4 14 13 9 4 | 8.00 3.20 3.20 8.65 1.00 2.75 6.50 2.85 | 11 | 1630 |
| P165 | 13 6 13 4 14 13 9 4 | 8.00 3.20 3.20 8.65 1.00 2.75 6.50 2.85 | 11 | 1630 |
| P166 | 12 11 15 9 11 | 2.50 3.20 2.00 3.50 5.00 | 6 | 3700 |
| P167 | 12 9 11 1 11 9 | 1.70 4.70 6.75 5.80 2.50 3.25 | 6 | 250 |
| P168 | 12 10 7 1 8 7 | 2.70 2.10 1.80 6.00 9.50 3.50 | 6 | 250 |
| P169 | 5 11 | 2.00 9.50 | 11 | 420 |
| P170 | 15 6 13 3 11 14 | 6.20 2.20 1.80 7.75 0.83 0.40 | 11 | 1680 |
| P171 | 15 6 | 3.00 2.20 | 11 | 440 |
| P172 | 15 3 18 3 15 | 10.50 25.00 105.00 12.00 7.50 | 11 | 440 |
| P173 | 19 3 | 0.60 6.00 | 11 | 880 |
| P174 | 15 6 13 3 11 14 | 5.80 2.20 2.80 9.50 1.00 0.65 | 11 | 3260 |
| P175 | 13 11 20 | 3.20 1.00 1.90 | 1 | 500 |
| P176 | 20 11 13 11 | 2.20 2.50 1.50 2.70 | 11 | 1000 |
| P177 | 3 1 | 4.00 2.50 | 1 | 650 |
| P178 | 12 3 1 3 | 3.50 7.00 4.20 3.00 | 6 | 880 |
| P179 | 13 3 | 11.50 4.00 | 11 | 1100 |
| P180 | 12 8 | 3.00 2.60 | 1 | 220 |
| P181 | 9 1 | 2.15 4.15 | 1 | 200 |

Annexes

| Pièces | Séquences | Charge | Classe | Quantité |
|--------|--------------------|-------------------------------------|--------|----------|
| P182 | 12 13 11 | 3.50 3.50 8.00 | 11 | 320 |
| P183 | 2 9 8 11 7 9 | 5.90 13.00 5.50 1.20 2.20 1.80 | 11 | 420 |
| P184 | 13 6 13 3 7 | 7.05 3.00 8.35 6.80 0.80 | 11 | 900 |
| P185 | 12 9 11 13 11 | 3.85 2.80 5.60 2.20 2.60 | 6 | 250 |
| P186 | 11 1 | 3.50 6.00 | 1 | 250 |
| P187 | 15 6 11 12 1 3 9 | 6.00 2.50 1.80 2.50 10.00 5.00 3.00 | 6 | 500 |
| P188 | 15 6 11 12 11 | 6.00 3.00 1.50 1.50 5.60 | 6 | 250 |
| P189 | 12 9 12 | 3.00 5.00 13.00 | 6 | 250 |
| P190 | 12 13 3 9 | 17.85 4.00 16.00 7.00 | 6 | 250 |
| P191 | 12 13 9 | 15.10 4.00 7.00 | 6 | 250 |
| P192 | 12 10 13 | 2.00 2.30 10.00 | 1 | 250 |
| P193 | 19 10 | 0.60 1.40 | 1 | 200 |
| P194 | 3 11 | 10.00 0.50 | 6 | 150 |
| P195 | 1 3 11 | 3.80 6.50 1.20 | 1 | 250 |
| P196 | 1 3 11 | 3.80 6.50 1.20 | 1 | 250 |
| P197 | 12 13 3 | 24.75 2.70 8.00 | 1 | 250 |
| P198 | 12 3 | 3.50 4.00 | 6 | 250 |
| P199 | 12 13 16 | 2.60 7.60 1.00 | 6 | 100 |
| P200 | 13 4 1 | 1.50 3.00 7.70 | 1 | 250 |
| P201 | 13 4 1 | 1.50 3.00 7.70 | 6 | 250 |
| P202 | 12 13 3 | 1.50 1.40 4.50 | 6 | 250 |
| P203 | 9 7 | 3.20 0.50 | 6 | 3800 |
| P204 | 11 12 20 13 16 | 1.55 0.50 0.70 0.70 0.60 | 6 | 1800 |
| P205 | 11 12 13 16 | 1.55 0.90 1.70 0.60 | 6 | 1800 |
| P206 | 11 12 | 2.05 0.65 | 6 | 1800 |
| P207 | 5 7 17 7 | 1.35 1.10 3.35 0.60 | 6 | 1800 |
| P208 | 13 11 7 11 | 3.90 6.20 1.20 0.66 | 11 | 1470 |
| P209 | 15 6 11 1 3 | 6.00 2.50 2.00 9.80 5.75 | 11 | 1470 |
| P210 | 12 9 7 8 13 | 1.55 2.30 2.00 6.20 2.80 | 11 | 1470 |
| P211 | 13 11 7 | 1.70 9.00 1.40 | 11 | 1470 |
| P212 | 7 17 13 | 1.90 30.00 2.80 | 6 | 1300 |
| P213 | 12 6 11 | 1.30 1.70 0.80 | 11 | 7200 |
| P214 | 12 6 | 1.90 1.70 | 11 | 5880 |
| P215 | 12 7 13 14 11 7 | 1.30 2.50 1.50 1.20 3.50 1.00 | 11 | 1470 |
| P216 | 13 10 11 14 | 2.60 18.20 0.89 1.10 | 11 | 3600 |
| P217 | 15 9 11 13 8 | 4.85 2.50 0.63 1.40 6.45 | 11 | 3600 |
| P218 | 13 6 13 3 11 14 11 | 5.80 2.60 1.65 5.65 0.60 0.60 0.80 | 11 | 3600 |
| P219 | 12 9 | 1.05 1.50 | 11 | 7600 |
| P220 | 13 8 10 11 14 | 2.60 8.65 7.20 0.60 0.90 | 11 | 3600 |
| P221 | 15 6 12 3 14 | 3.70 1.75 1.75 0.75 0.75 | 11 | 3600 |
| P222 | 15 11 12 3 11 14 | 1.50 2.50 2.00 5.20 1.15 0.75 | 11 | 3600 |
| P223 | 12 6 13 3 11 14 | 6.80 2.20 1.80 7.75 0.83 0.80 | 11 | 2940 |
| P224 | 15 6 13 3 11 14 | 6.30 2.05 1.80 6.85 2.03 0.80 | 11 | 2940 |
| P225 | 15 6 12 3 11 14 | 5.45 2.25 2.35 6.35 0.83 0.80 | 11 | 5880 |
| P226 | 13 8 9 11 14 | 3.50 8.85 6.45 0.45 0.55 | 11 | 2940 |
| P227 | 13 8 9 11 14 | 1.95 7.85 8.10 0.60 0.55 | 11 | 3300 |
| P228 | 15 6 11 1 3 | 5.80 2.50 0.80 10.00 4.85 | 11 | 1800 |
| P229 | 12 9 7 14 1 16 | 1.20 1.50 0.80 2.00 3.50 0.60 | 11 | 3270 |

Annexes

| Pièces | Séquences | Charge | Classe | Quantité |
|--------|------------------|----------------------------------|--------|----------|
| P230 | 6 8 9 | 1.30 5.50 1.55 | 11 | 7540 |
| P231 | 10 11 | 3.65 1.25 | 11 | 5300 |
| P232 | 1 9 1 | 3.00 3.50 2.20 | 11 | 3270 |
| P233 | 20 7 | 1.50 1.10 | 6 | 3000 |
| P234 | 9 11 13 | 1.70 2.40 4.90 | 11 | 3270 |
| P235 | 12 1 | 12.00 1.00 | 11 | 2940 |
| P236 | 1 13 9 13 | 2.55 1.65 1.80 1.70 | 11 | 6540 |
| P237 | 1 2 | 2.55 5.20 | 11 | 6540 |
| P238 | 5 7 | 1.50 1.80 | 11 | 5000 |
| P239 | 9 7 14 | 1.75 2.00 1.90 | 6 | 1000 |
| P240 | 9 7 14 | 1.75 2.00 1.90 | 6 | 1000 |
| P241 | 9 12 | 3.10 1.10 | 1 | 120 |
| P242 | 11 1 7 11 | 3.20 5.00 1.20 1.50 | 1 | 250 |
| P243 | 7 1 | 1.50 3.60 | 6 | 250 |
| P244 | 13 7 | 2.70 3.35 | 6 | 250 |
| P245 | 1 12 9 7 | 6.50 1.95 4.50 1.70 | 1 | 180 |
| P246 | 3 13 2 1 3 14 | 43.25 8.00 41.00 16.00 6.00 8.00 | 11 | 800 |
| P247 | 3 13 2 1 12 14 | 43.25 8.00 41.00 16.00 3.50 8.00 | 11 | 500 |
| P248 | 15 12 3 15 3 5 | 6.00 11.00 24.70 6.00 70.10 4.00 | 11 | 250 |
| P249 | 15 12 3 15 3 5 | 6.00 11.00 24.70 6.00 70.10 4.00 | 11 | 250 |
| P250 | 11 20 | 5.65 1.40 | 1 | 1630 |
| P251 | 13 3 | 8.50 20.85 | 11 | 2600 |
| P252 | 12 3 11 1 9 | 1.80 4.00 0.90 6.00 5.00 | 11 | 1100 |
| P253 | 13 9 13 9 | 2.50 4.00 3.00 4.00 | 6 | 1100 |
| P254 | 17 20 9 11 17 10 | 1.20 2.00 2.85 3.00 1.00 2.75 | 11 | 1800 |
| P255 | 12 3 9 3 | 2.00 4.00 2.00 3.00 | 11 | 1100 |
| P256 | 12 9 13 9 | 3.00 4.50 1.50 0.50 | 11 | 1100 |
| P257 | 12 3 | 3.80 4.70 | 6 | 250 |
| P258 | 3 9 18 9 | 25.00 11.00 15.00 6.00 | 6 | 250 |
| P259 | 13 11 13 11 | 2.50 2.20 1.40 7.50 | 11 | 250 |
| P260 | 13 11 13 11 | 2.50 2.20 1.40 7.50 | 6 | 250 |
| P261 | 5 11 5 7 11 | 0.90 1.90 5.80 1.00 1.80 | 6 | 1470 |
| P262 | 5 11 | 3.00 9.40 | 11 | 1470 |
| P263 | 12 3 1 11 | 3.00 12.00 7.00 4.00 | 1 | 250 |
| P264 | 11 13 1 | 3.50 1.50 1.50 | 6 | 250 |
| P265 | 12 5 3 11 1 | 3.00 2.50 12.00 4.00 7.00 | 1 | 250 |
| P266 | 11 3 | 1.60 7.20 | 6 | 200 |
| P267 | 1 11 | 3.20 2.30 | 11 | 1040 |
| P268 | 1 11 | 3.20 2.30 | 11 | 1040 |
| P269 | 3 14 | 3.20 2.50 | 6 | 200 |
| P270 | 6 3 | 2.50 3.00 | 11 | 1080 |
| P271 | 5 3 | 1.50 3.00 | 11 | 1100 |
| P272 | 3 14 | 2.80 1.60 | 6 | 500 |
| P273 | 7 16 | 0.50 0.80 | 6 | 250 |

Annexe IV-3 : Degré de sollicitation des pools

| | | | | | | | | | | |
|-----------------|----|---|-----|----|----|----|----|----|-----|----|
| Pool | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Présence | 67 | 9 | 101 | 21 | 24 | 40 | 62 | 35 | 102 | 28 |

| | | | | | | | | | | |
|-----------------|-----|-----|-----|----|----|----|----|----|----|----|
| Pool | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| Présence | 137 | 128 | 137 | 31 | 42 | 13 | 6 | 4 | 7 | 7 |

Annexe IV-4 : Homogénéité de répartition (nombre de zéro)

| | | | | | | | | | | |
|----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|
| Pool | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Nombre de "0" | 10 | 23 | 10 | 18 | 21 | 23 | 11 | 16 | 6 | 14 |

| | | | | | | | | | | |
|----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Pool | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| Nombre de "0" | 5 | 14 | 4 | 16 | 16 | 23 | 24 | 32 | 28 | 26 |

Annexe IV-5 : Rapport de la présence et du nombre de zéros

| | | | | | | | | | | |
|----------------|-----|-----|------|-----|----|-----|-----|-----|----|-----|
| Pool | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Rapport | 6.7 | 0.4 | 10.1 | 1.2 | 11 | 1.7 | 5.6 | 2.2 | 17 | 2.0 |

| | | | | | | | | | | |
|----------------|------|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Pool | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| Rapport | 27.4 | 9.1 | 34.2 | 1.9 | 2.6 | 0.6 | 0.3 | 0.1 | 0.3 | 0.3 |

Annexe IV.6 :

Passage des pièces dans la ligne opérationnelle

| Pièces | Séquences | Passage dans la ligne |
|--------|-------------------|-----------------------|
| P1 | 12 9 7 11 7 | 6 17 21 30 33 |
| P2 | 11 7 | 20 21 |
| P3 | 9 10 | 17 19 |
| P4 | 12 9 1 9 | 6 17 27 32 |
| P5 | 11 7 | 20 21 |
| P6 | 11 13 1 | 20 22 27 |
| P7 | 13 8 9 13 | 9 15 17 22 |
| P8 | 2 9 10 8 | 4 17 19 24 |
| P9 | 2 9 10 8 | 4 17 19 24 |
| P10 | 2 9 8 11 7 9 | 4 17 24 33 21 32 |
| P11 | 11 7 13 | 20 21 22 |
| P12 | 9 11 | 17 20 |
| P13 | 11 9 | 20 32 |
| P14 | 9 8 | 17 24 |
| P15 | 9 7 | 17 21 |
| P16 | 9 13 3 12 11 | 17 22 28 18 20 |
| P17 | 16 3 13 8 10 | 14 16 22 24 26 |
| P18 | 11 1 | 20 27 |
| P19 | 12 3 8 | 6 16 24 |
| P19 | 12 3 7 8 9 | 6 16 21 24 25 |
| P20 | 13 3 9 13 3 11 14 | 9 16 17 22 28 33 29 |
| P21 | 12 6 10 13 9 1 | 6 7 19 22 32 35 |
| P22 | 15 3 | 5 16 |
| P24 | 12 9 11 | 6 17 20 |
| P25 | 15 3 12 11 9 | 5 16 18 20 32 |
| P26 | 3 1 | 16 27 |
| P27 | 1 13 17 11 | 8 9 10 20 |
| P28 | 15 3 12 11 9 | 5 16 18 20 32 |
| P29 | 12 9 7 | 6 17 21 |
| P29 | 12 15 6 7 | 6 5 7 21 |
| P30 | 12 6 9 13 9 1 | 6 7 17 22 32 35 |
| P31 | 1 9 | 8 17 |
| P32 | 15 3 18 | 5 16 31 |
| P34 | 12 9 11 | 6 17 20 |
| P35 | 15 18 | 5 31 |
| P36 | 13 11 | 9 20 |
| P37 | 11 13 | 20 22 |

Annexes

| Pièces | Séquences | Passage dans la ligne |
|--------|----------------|-----------------------|
| P38 | 12 16 | 6 14 |
| P39 | 1 9 | 8 17 |
| P40 | 11 12 13 | 20 6 9 |
| P41 | 7 11 | 21 30 |
| P42 | 13 3 11 | 9 16 20 |
| P43 | 13 3 11 | 9 16 20 |
| P44 | 11 1 11 7 | 20 27 30 33 |
| P45 | 1 9 7 13 | 8 17 21 22 |
| P46 | 19 13 11 | 4 9 20 |
| P47 | 12 8 13 8 11 | 6 15 22 24 33 |
| P48 | 12 8 13 8 11 | 6 15 22 24 33 |
| P49 | 6 13 9 3 12 | 7 9 17 28 18 |
| P50 | 8 11 | 15 20 |
| P51 | 8 11 | 15 20 |
| P52 | 16 9 | 14 17 |
| P53 | 12 13 | 6 9 |
| P54 | 12 13 | 6 9 |
| P55 | 12 3 9 13 9 | 6 16 17 22 32 |
| P56 | 12 9 11 8 11 1 | 6 17 20 24 33 35 |
| P57 | 12 13 11 7 | 6 9 20 21 |
| P58 | 15 3 1 3 11 | 5 16 27 28 33 |
| P59 | 13 3 13 11 | 9 16 22 30 |
| P60 | 3 9 12 | 16 17 18 |
| P61 | 15 11 13 9 | 5 20 22 32 |
| P62 | 12 5 3 5 8 3 | 6 14 16 14 15 16 |
| P63 | 12 5 3 5 8 3 | 6 14 16 14 15 16 |
| P64 | 13 1 9 7 | 9 27 32 33 |
| P65 | 13 1 9 7 | 9 27 32 33 |
| P66 | 12 11 7 | 6 20 21 |
| P67 | 12 13 3 | 6 9 16 |
| P68 | 12 9 | 6 17 |
| P69 | 12 9 | 6 17 |
| P70 | 12 1 4 | 6 8 12 |
| P71 | 12 9 13 8 | 6 17 22 24 |
| P72 | 5 7 | 14 21 |
| P73 | 13 12 7 5 | 9 18 21 14 |
| P74 | 13 3 | 9 16 |
| P75 | 4 5 | 12 14 |
| P76 | 4 5 | 12 14 |
| P77 | 12 11 1 16 13 | 6 20 27 14 22 |
| P78 | 12 11 1 16 13 | 6 20 27 14 22 |
| P79 | 12 8 | 6 15 |
| P80 | 13 8 9 1 | 9 15 17 27 |
| P81 | 9 7 | 17 21 |
| P82 | 4 5 | 12 14 |
| P83 | 11 1 13 11 | 20 27 9 20 |
| P84 | 19 11 7 8 11 | 11 20 21 24 33 |

Annexes

| Pièces | Séquences | Passage dans la ligne |
|--------|------------------------|-----------------------|
| P85 | 19 3 13 11 3 14 | 4 16 22 30 36 29 |
| P86 | 12 9 11 13 11 | 6 17 20 22 30 |
| P87 | 13 9 12 11 | 9 17 18 20 |
| P88 | 13 9 12 11 | 9 17 18 20 |
| P89 | 13 9 13 11 | 9 17 22 30 |
| P90 | 19 10 | 4 19 |
| P91 | 12 9 1 13 9 | 6 17 27 9 17 |
| P92 | 2 15 12 4 15 3 15 12 3 | 4 5 6 12 5 16 5 6 16 |
| P93 | 12 3 1 3 | 6 16 27 28 |
| P94 | 12 6 1 9 | 6 7 8 17 |
| P95 | 5 10 1 7 19 13 | 14 19 27 33 4 9 |
| P96 | 13 11 7 | 9 20 21 |
| P97 | 13 11 7 | 9 20 21 |
| P98 | 12 9 7 1 9 | 6 17 21 27 32 |
| P99 | 16 7 | 14 21 |
| P100 | 16 7 11 | 14 21 30 |
| P101 | 11 12 13 11 | 20 6 9 20 |
| P102 | 12 10 | 6 19 |
| P103 | 2 13 3 | 4 9 16 |
| P104 | 15 4 | 5 12 |
| P105 | 13 10 9 13 4 | 9 19 32 22 24 |
| P106 | 13 9 13 4 | 9 17 22 24 |
| P107 | 12 4 9 4 | 6 12 17 24 |
| P108 | 13 12 13 3 11 | 9 18 22 28 33 |
| P109 | 7 16 | 1 14 |
| P110 | 13 11 | 9 20 |
| P111 | 6 13 9 | 7 9 17 |
| P112 | 13 6 13 12 3 7 3 | 3 7 9 18 28 33 36 |
| P113 | 12 9 12 | 6 17 18 |
| P114 | 5 8 | 14 15 |
| P115 | 12 3 12 8 | 6 16 18 24 |
| P116 | 12 3 | 6 16 |
| P117 | 12 3 | 6 16 |
| P118 | 5 1 | 14 27 |
| P119 | 1 3 | 8 16 |
| P119 | 1 8 | 8 15 |
| P120 | 12 3 7 1 | 6 16 21 27 |
| P121 | 12 15 3 13 3 | 6 5 16 22 28 |
| P122 | 15 6 12 3 14 | 5 7 18 28 29 |
| P124 | 13 7 | 9 21 |
| P125 | 13 7 | 9 21 |
| P126 | 13 11 | 9 20 |
| P127 | 15 3 | 5 16 |
| P128 | 5 11 14 7 | 14 20 29 33 |
| P129 | 11 1 14 7 | 20 27 29 33 |
| P129 | 7 13 | 21 22 |
| P130 | 12 11 | 6 20 |
| P131 | 13 3 9 | 9 16 17 |

Annexes

| Pièces | Séquences | Passage dans la ligne |
|--------|-----------------------------|-----------------------------|
| P132 | 12 6 | 6 7 |
| P134 | 19 9 | 4 17 |
| P135 | 9 1 | 17 27 |
| P136 | 7 9 11 | 21 32 33 |
| P137 | 5 11 | 14 20 |
| P138 | 13 6 3 | 3 7 16 |
| P139 | 12 6 10 15 4 | 6 7 19 5 12 |
| P140 | 13 8 10 11 14 | 9 15 19 20 29 |
| P141 | 12 6 12 10 13 4 10 11 | 6 7 18 19 22 24 26 20 |
| P142 | 12 11 13 11 | 6 20 22 30 |
| P143 | 17 11 1 | 10 20 27 |
| P144 | 15 6 12 3 14 | 5 7 18 28 29 |
| P145 | 13 6 13 12 3 7 3 | 3 7 9 18 28 33 36 |
| P146 | 12 6 12 10 13 4 10 11 | 6 7 18 19 22 24 26 20 |
| P147 | 10 13 | 19 22 |
| P148 | 12 6 12 10 11 10 13 4 10 11 | 6 7 18 19 20 26 22 24 26 20 |
| P149 | 12 1 13 | 6 8 9 |
| P150 | 12 1 13 | 6 8 9 |
| P151 | 12 11 1 13 | 6 20 27 9 |
| P152 | 9 13 3 | 17 22 28 |
| P153 | 9 1 | 17 27 |
| P154 | 12 9 | 6 17 |
| P155 | 12 9 15 8 11 | 6 17 5 15 20 |
| P156 | 12 9 15 | 6 17 5 |
| P157 | 12 6 12 10 13 4 10 11 | 6 7 18 19 22 24 26 20 |
| P158 | 13 3 12 9 1 3 | 9 16 18 32 35 36 |
| P159 | 12 3 7 | 6 16 21 |
| P160 | 15 6 13 3 14 | 5 7 9 16 29 |
| P161 | 15 6 13 3 14 | 5 7 9 16 29 |
| P162 | 15 6 12 11 12 | 5 7 18 20 6 |
| P163 | 15 6 12 11 12 | 5 7 18 20 6 |
| P164 | 13 6 13 4 14 13 9 4 | 3 7 9 12 29 9 17 24 |
| P165 | 13 6 13 4 14 13 9 4 | 3 7 9 12 29 9 17 24 |
| P166 | 12 11 15 9 11 | 6 20 5 17 20 |
| P167 | 12 9 11 1 11 9 | 6 17 20 27 30 32 |
| P168 | 12 10 7 1 8 7 | 6 19 21 27 15 21 |
| P169 | 5 11 | 14 20 |
| P170 | 15 6 13 3 11 14 | 5 7 9 16 20 29 |
| P171 | 15 6 | 5 7 |
| P172 | 15 3 18 3 15 | 5 16 31 36 5 |
| P173 | 19 3 | 4 16 |
| P174 | 15 6 13 3 11 14 | 5 7 9 16 20 29 |
| P175 | 13 11 19 | 9 20 11 |
| P176 | 19 11 13 11 | 11 20 22 30 |
| P177 | 3 1 | 16 27 |
| P178 | 12 3 1 3 | 6 16 27 28 |
| P179 | 13 3 | 9 16 |
| P180 | 12 8 | 6 15 |
| P181 | 9 1 | 17 27 |

Annexes

| Pièces | Séquences | Passage dans la ligne |
|--------|--------------------|-----------------------|
| P182 | 12 13 11 | 6 9 20 |
| P183 | 2 9 8 11 7 9 | 4 17 24 33 21 32 |
| P184 | 13 6 13 3 7 | 3 7 9 16 21 |
| P185 | 12 9 11 13 11 | 6 17 20 22 30 |
| P186 | 11 1 | 20 27 |
| P187 | 15 6 11 12 1 3 9 | 5 7 20 6 8 16 17 |
| P188 | 15 6 11 12 11 | 5 7 20 6 20 |
| P189 | 12 9 12 | 6 17 18 |
| P190 | 12 13 3 9 | 6 9 16 17 |
| P191 | 12 13 9 | 6 9 17 |
| P192 | | 2 9 12 |
| P193 | 19 10 | 4 19 |
| P194 | 3 11 | 16 20 |
| P195 | 1 3 11 | 8 16 20 |
| P196 | 1 3 11 | 8 16 20 |
| P197 | 12 13 3 | 6 9 16 |
| P198 | 12 3 | 6 16 |
| P199 | 12 13 16 | 6 9 14 |
| P190 | 13 4 1 | 9 12 27 |
| P191 | 13 4 1 | 9 12 27 |
| P192 | 12 13 3 | 6 9 16 |
| P193 | 9 7 | 17 21 |
| P194 | 11 12 19 13 16 | 20 6 11 22 14 |
| P195 | 11 12 13 16 | 20 6 9 14 |
| P196 | 11 12 | 20 6 |
| P197 | 5 7 17 7 | 14 21 10 21 |
| P198 | 13 11 7 11 | 9 20 21 30 |
| P199 | 15 6 11 1 3 | 5 7 20 27 28 |
| P200 | 12 9 7 8 13 | 6 17 21 24 22 |
| P201 | 13 11 7 | 9 20 21 |
| P202 | 7 17 13 | 1 10 22 |
| P203 | 12 6 11 | 6 7 20 |
| P204 | 12 6 | 6 7 |
| P205 | 12 7 13 14 11 7 | 6 21 22 29 30 33 |
| P206 | 13 10 11 14 | 9 19 20 29 |
| P207 | 15 9 11 13 8 | 5 17 20 22 24 |
| P208 | 13 6 13 3 11 14 11 | 3 7 9 16 20 29 30 |
| P209 | 12 9 | 6 17 |
| P209 | 13 8 10 11 14 | 9 15 19 20 29 |
| P210 | 15 6 12 3 14 | 5 7 18 28 29 |
| P212 | 15 11 12 3 11 14 | 5 20 6 16 20 29 |
| P213 | 12 6 13 3 11 14 | 6 7 9 16 20 29 |
| P214 | 15 6 13 3 11 14 | 5 7 9 16 20 29 |
| P215 | 15 6 12 3 11 14 | 5 7 18 28 33 29 |
| P216 | 13 8 9 11 14 | 9 15 17 20 29 |
| P217 | 13 8 9 11 14 | 9 15 17 20 29 |
| P218 | 15 6 11 1 3 | 5 7 20 27 28 |
| P219 | 12 9 7 14 1 16 | 6 17 21 29 35 14 |

Annexes

| Pièces | Séquences | Passage dans la ligne |
|---------------|------------------|------------------------------|
| P220 | 6 8 9 | 7 15 17 |
| P221 | 10 11 | 19 20 |
| P222 | 1 9 1 | 8 17 27 |
| P223 | 19 7 | 11 21 |
| P224 | 9 11 13 | 17 20 22 |
| P225 | 12 1 | 6 8 |
| P226 | 1 13 9 13 | 8 9 17 22 |
| P227 | 1 2 | 8 4 |
| P228 | 5 7 | 14 21 |
| P229 | 9 7 14 | 17 21 29 |
| P240 | 9 7 14 | 17 21 29 |
| P241 | 9 12 | 17 18 |
| P242 | 11 1 7 11 | 20 27 33 33 |
| P243 | 7 1 | 21 27 |
| P244 | 13 7 | 9 21 |
| P245 | 1 12 9 7 | 8 18 32 33 |
| P246 | 3 13 2 1 3 14 | 16 22 4 8 16 29 |
| P247 | 3 13 2 1 12 14 | 16 22 4 8 18 29 |
| P248 | 15 12 3 15 3 5 | 5 6 16 5 16 14 |
| P249 | 15 12 3 15 3 5 | 5 6 16 5 16 14 |
| P250 | 11 19 | 20 11 |
| P251 | 13 3 | 9 16 |
| P252 | 12 3 11 1 9 | 6 16 20 27 32 |
| P253 | 13 9 13 9 | 9 17 22 32 |
| P254 | 17 19 9 11 17 10 | 10 11 17 20 10 19 |
| P255 | 12 3 9 3 | 6 16 17 28 |
| P256 | 12 9 13 9 | 6 17 22 32 |
| P257 | 12 3 | 6 16 |
| P258 | 3 9 18 9 | 16 17 31 32 |
| P259 | 13 11 13 11 | 9 20 22 30 |
| P260 | 13 11 13 11 | 9 20 22 30 |
| P261 | 5 11 5 7 11 | 14 20 14 21 30 |
| P262 | 5 11 | 14 20 |
| P263 | 12 3 1 11 | 6 16 27 30 |
| P264 | 11 13 1 | 20 22 27 |
| P265 | 12 5 3 11 1 | 6 14 16 20 27 |
| P266 | 11 3 | 20 28 |
| P267 | 1 11 | 8 20 |
| P268 | 1 11 | 8 20 |
| P269 | 3 14 | 16 29 |
| P270 | 6 3 | 7 16 |
| P271 | 5 3 | 14 16 |
| P272 | 3 14 | 16 29 |
| P273 | 7 16 | 1 14 |