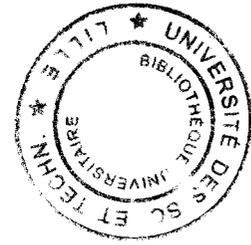


920006205

N° d'ordre :



# THESE

présentée à

L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE

en

PRODUCTIQUE,

AUTOMATIQUE et INFORMATIQUE INDUSTRIELLE

par

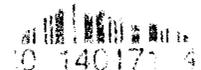
Matthieu DELAVAL

## SEQUENCEMENT DES LIGNES D'ASSEMBLAGE

### A MODELES MELANGES

Soutenue le 30 Octobre 1997

Devant la Commission d'examen :



M. Y. FREIN	Rapporteur	Professeur à l'INP de Grenoble
M. C. PROUST	Rapporteur	Professeur à l'E3I de Tours
M. E. CASTELAIN	Directeur de thèse	Maître de Conférences, H.d.R. à l'EC Lille
M. J.C. GENTINA	Examineur	Professeur à l'Ecole Centrale de Lille
M. J.P. CASSAR	Examineur	Professeur à l'Université de Lille I
M. P. BONNEAU	Invité	Docteur, Ingénieur Projet à PSA Peugeot Citroën
M. H. OHL	Invité	Docteur, Ingénieur à Andersen Consulting

# Remerciements

---

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été effectués au Laboratoire d'Automatique et d'Informatique Industrielle de Lille (LAIL) dans le pôle Production Flexible Manufacturière (PFM) dirigé par le Professeur Jean-Claude GENTINA, directeur de l'École centrale de Lille. Je tiens à le remercier pour m'avoir accueilli au sein de son équipe.

Je remercie tout particulièrement mon directeur de recherche, Emmanuel CASTELAIN, pour la confiance et les conseils qu'il m'a accordés tout au long de ces trois ans.

Je tiens très sincèrement à remercier les deux rapporteurs, qui malgré leurs nombreuses responsabilités et occupations ont accepté d'évaluer ce travail :

- Monsieur Yannick FREIN, Professeur à l'Institut National Polytechnique de Grenoble, Directeur du laboratoire GILCO,
- Monsieur Christian PROUST, Professeur et directeur de l'E3I de Tours.

Je remercie de leur présence dans ce jury :

- Monsieur Patrick BONNEAU, Docteur, Ingénieur Projet chez P.S.A. Peugeot Citroën,
- Monsieur Jean-Philippe CASSARD, Professeur à l'Université de Lille I,

Je remercie, Monsieur Harald OHL, Docteur, Ingénieur à Andersen Consulting pour sa présence dans ce jury et pour l'intérêt qu'il continue de porter à des travaux auxquels il participa au sein du LAIL.

Merci aussi à tous mes collègues du LAIL et plus particulièrement à l'équipe dirigée par Pascal YIM pour avoir accepté un intrus dans leur bureau et à Hervé CAMUS qui a eu la gentillesse de consacrer une partie de son temps à la relecture scrupuleuse de mon manuscrit.

Je tiens enfin à exprimer ma gratitude envers ma famille, mon amie et mes amis pour leur soutien, leur intérêt et par-dessus tout pour leur affection.



# Résumé

---

Cette thèse est consacrée à l'étude des problèmes de séquençement des lignes d'assemblage à modèles mélangés. Ce type de ligne est utilisé pour produire simultanément plusieurs articles relativement différents. La ligne d'assemblage automobile en est un exemple classique. Les contraintes de ce genre d'organisation se résument en deux points : il faut lisser le plus possible la charge des différents postes de travail qui composent la ligne et il faut synchroniser les flux de composants nécessaires à l'assemblage avec le flux des véhicules présents sur la ligne.

Une utilisation efficace d'une ligne d'assemblage à modèles mélangés nécessite donc que deux problèmes indépendants soient résolus : l'équilibrage de la ligne et le séquençement des véhicules. L'équilibrage de la ligne est une procédure qui affecte le travail aux opérateurs afin de répartir équitablement le travail entre les différents postes. La procédure de séquençement détermine l'ordre spécifique selon lequel les différents modèles sont lancés sur la ligne. Dans le cas d'une ligne de construction automobile, cet ordonnancement prévisionnel doit tenir compte des exigences et des contraintes spécifiques, parfois antagonistes, des trois ateliers constituant la ligne : les ateliers de ferrage, de peinture et de montage. Ainsi, en peinture, l'objectif est de minimiser les changements de teinte et donc de traiter les véhicules par rafales de couleurs, tandis qu'au montage, l'objectif est de lisser la charge de travail des opérateurs et de garantir un taux de consommation constant des pièces et composants utilisés. L'ordonnancement prédictif étant impossible à maintenir tout au long du processus de fabrication à cause de nombreux aléas, celui-ci est adapté, de manière réactive, selon les contraintes et les aléas des ateliers traversés. Des stocks de gestion intermédiaires, appelés buffers, permettent d'assurer des ré-ordonnements du flux avant l'entrée dans l'atelier.

Dans cette thèse, nous nous concentrons sur le problème du re-séquencement dynamique des véhicules en entrée de l'atelier de montage. Pratiquement, il s'agit de déterminer de façon périodique en vue de certaines contraintes quel sera le prochain véhicule présent dans le buffer de re-séquencement à lancer en montage. Deux modélisations du flux des véhicules en montage sont dans un premier temps présentées : la modélisation de la charge effective des postes de travail et la modélisation par espacement de critères. C'est cette dernière, plus intuitive et plus simple à manipuler, qui sera utilisée dans notre méthode de re-séquencement. La prise en compte des contraintes juste-à-temps est ensuite décrite. Parmi plusieurs approches de résolution envisageables pour traiter notre problème, deux méthodes émergent : la recherche par faisceau et le recuit simulé. Les résultats obtenus sur des jeux d'essais de taille industrielle par chacune des deux méthodes sont comparés et une analyse de l'influence de la taille de l'autostockeur sur la qualité du re-séquencement réalisé est effectuée.



# Table des matières

---

INTRODUCTION .....	11
<b>1 LE PROBLÈME DE SÉQUENCÉMENT DES LIGNES D'ASS. À MODÈLES MÉLANGÉS .....</b>	<b>17</b>
1.1 INTRODUCTION .....	19
1.2 CONTEXTE DE L'ÉTUDE: ANALYSE DE L'INDUSTRIE AUTOMOBILE .....	19
1.2.1 Introduction .....	19
1.2.2 La production artisanale.....	20
1.2.3 La production de masse .....	21
1.2.4 La production au plus juste.....	22
1.2.5 La production réfléchie.....	25
1.2.6 Evolution des modes de production .....	27
1.2.7 Conclusion .....	28
1.3 PRÉSENTATION D'UNE LIGNE DE PRODUCTION AUTOMOBILE .....	29
1.3.1 Introduction .....	29
1.3.2 L'atelier de peinture.....	30
1.3.3 L'atelier de montage.....	31
1.3.3.1 Caractéristiques de l'atelier de montage.....	31
1.3.3.2 Les différents types de tâches de montage.....	32
1.3.3.3 Les différentes pertes d'efficacité de l'opérateur - contrainte de lissage la charge.....	34
1.3.3.4 La contrainte juste-à-temps .....	36
1.3.3.5 Conclusion sur les contraintes de l'atelier de montage .....	37
1.3.4 Avantages et inconvénients de la ligne d'assemblage cadencée.....	37
1.3.5 Conclusion .....	38
1.4 LE SÉQUENCÉMENT D'UNE LIGNE DE PRODUCTION À MODÈLES MÉLANGÉS .....	39
1.4.1 Introduction .....	39
1.4.2 Le problème d'équilibrage de la ligne de production .....	39

1.4.3	<i>Le problème de séquençement de la ligne de production</i> .....	42
1.4.3.1	Les différents types de contraintes. ....	42
1.4.3.2	Le problème statique .....	45
1.4.3.3	Problème dynamique.....	47
1.4.4	<i>Conclusion</i> .....	50
1.5	LES PROBLÈMES ÉTUDIÉS DANS LA LITTÉRATURE .....	50
1.5.1	<i>Introduction</i> .....	50
1.5.2	<i>Revue critique et détaillée de la littérature</i> .....	51
1.5.3	<i>Synthèse et discussion</i> .....	66
1.5.4	<i>Comparaison avec d'autres problèmes d'ordonnancement</i> .....	70
1.6	CONCLUSION .....	71
<b>2</b>	<b>DÉFINITION ET FORMALISATION DU PROBLÈME</b> .....	<b>73</b>
2.1	INTRODUCTION.....	75
2.2	DÉFINITION DU PROBLÈME ÉTUDIÉ ET OBJECTIFS DU RE-SÉQUENCEMENT .....	75
2.2.1	<i>Définition du problème étudié</i> .....	75
2.2.2	<i>Causes d'un mauvais re-séquençement</i> .....	76
2.2.3	<i>Conséquences d'un mauvais re-séquençement</i> .....	77
2.2.4	<i>Objectifs du re-séquençement</i> .....	78
2.2.5	<i>Prise en compte de l'aspect dynamique</i> .....	79
2.2.5.1	Les interdits de montage .....	80
2.2.5.2	Le roulement de stock .....	80
2.2.5.3	Conséquences sur la méthode de re-séquençement .....	80
2.2.6	<i>Conclusion</i> .....	82
2.3	MODÉLISATION DU FLUX DES VÉHICULES EN MONTAGE.....	83
2.3.1	<i>Introduction</i> .....	83
2.3.2	<i>Modélisation de la charge effective des postes de travail</i> .....	83
2.3.2.1	Introduction.....	83
2.3.2.2	Charge effective d'un poste de travail.....	83
2.3.2.3	Fonction de coût.....	87
2.3.2.4	Cas multi-postes.....	88

2.3.2.5	Identification de postes critiques.....	88
2.3.2.6	Critique de la modélisation par postes de travail.....	89
2.3.3	<i>Modélisation par espacement de critères.....</i>	90
2.3.3.1	Introduction.....	90
2.3.3.2	Définition des espacements.....	91
2.3.3.3	Contraintes croisées.....	95
2.3.3.4	Principe de la fonction de coût associée.....	97
2.3.3.5	Critique de la modélisation par espacement.....	98
2.3.4	<i>Prise en compte des contraintes juste-à-temps.....</i>	99
2.3.4.1	Prise en compte des contraintes juste-à-temps dans la modélisation par postes.....	99
2.3.4.2	Prise en compte des contraintes juste-à-temps dans la modélisation par espacement.....	103
2.3.5	<i>Conclusion.....</i>	103
2.4	COMPLEXITÉ DU PROBLÈME.....	104
2.4.1	<i>Introduction.....</i>	104
2.4.2	<i>Complexité du problème dans le cas d'un autostockeur.....</i>	105
2.4.3	<i>Comparaison avec la complexité dans le cas d'une architecture à tiroirs.....</i>	105
2.4.3.1	Nombre de séquences possibles.....	106
2.4.3.2	Affectation des véhicules dans les tiroirs.....	108
2.4.3.3	Conclusion.....	112
2.5	CONCLUSION.....	113
<b>3</b>	<b>APPROCHES DE RÉOLUTION.....</b>	<b>115</b>
3.1	INTRODUCTION.....	117
3.2	APPROCHES DE RÉOLUTION ENVISAGEABLES.....	118
3.2.1	<i>Méthodes par voisinage.....</i>	118
3.2.1.1	Introduction.....	118
3.2.1.2	Descente stochastique.....	120
3.2.1.3	Recuit simulé.....	122
3.2.1.4	Méthode Tabou.....	125
3.2.2	<i>Méthodes liées à l'intelligence artificielle.....</i>	128
3.2.2.1	Introduction.....	128
3.2.2.2	Systèmes Experts.....	129

3.2.2.3	Programmation Logique sous Contraintes .....	130
3.2.2.4	Algorithmes génétiques.....	132
3.2.3	<i>Méthodes arborescentes</i> .....	135
3.2.3.1	Introduction.....	135
3.2.3.2	Méthode par séparation et évaluation.....	136
3.2.3.3	Recherche par faisceau.....	139
3.2.4	<i>Conclusion sur le choix des méthodes résolution</i> .....	142
3.3	MISE EN ŒUVRE DES MÉTHODES DE RÉOLUTION RETENUES .....	143
3.3.1	<i>Introduction</i> .....	143
3.3.2	<i>Métrique évaluative</i> .....	144
3.3.2.1	Introduction.....	144
3.3.2.2	Présentation de la métrique évaluative.....	145
3.3.2.3	Cas des espacements non entiers.....	150
3.3.3	<i>Mise en œuvre de la recherche par faisceau</i> .....	152
3.3.3.1	Introduction.....	152
3.3.3.2	Choix de l'espacement cible .....	152
3.3.3.3	Algorithme .....	155
3.3.3.4	Métrique générative .....	156
3.3.3.5	Indicateurs de paramétrage de l'algorithme .....	160
3.3.3.6	Résumé de la démarche.....	164
3.3.3.7	Conclusion .....	165
3.3.4	<i>Mise en œuvre du recuit simulé</i> .....	165
3.3.4.1	Introduction.....	165
3.3.4.2	Les différents types de modifications élémentaires utilisés.....	167
3.3.4.3	Métrique générative .....	168
3.3.4.4	Configuration initiale.....	174
3.3.4.5	Plans de recuit utilisés.....	175
3.3.4.6	Conclusion .....	177
3.4	CONCLUSION .....	177
<b>4</b>	<b>RÉSULTATS</b> .....	<b>179</b>
4.1	INTRODUCTION.....	181

4.2 JEUX D’ESSAIS UTILISÉS ET PROCESSUS EXPÉRIMENTAL.....	182
4.2.1 <i>Jeux d’essais utilisés</i> .....	182
4.2.2 <i>Processus expérimental</i> .....	183
4.3 COMPARAISON DES RÉSULTATS OBTENUS PAR LES DEUX MÉTHODES DE RE-SÉQUENCÉMENT SUR DEUX JEUX D’ESSAIS REPRÉSENTATIFS .....	184
4.3.1 <i>Introduction</i> .....	184
4.3.2 <i>Résultats sur le jeu d’essai de taille industrielle</i> .....	185
4.3.2.1 Jeu d’essai utilisé .....	185
4.3.2.2 Résultats obtenus par la méthode par recherche par faisceau.....	186
4.3.2.3 Résultats obtenus par recuit simulé.....	192
4.3.3 <i>Résultats sur l’ensemble de jeux d’essais de petite taille</i> .....	194
4.3.3.1 Ensemble de jeux d’essais utilisé.....	194
4.3.3.2 Comparaison et analyse des résultats obtenus.....	194
4.3.4 <i>Conclusion</i> .....	195
4.4 ANALYSE DE L’INFLUENCE DE LA TAILLE DE L’AUTOSTOCKEUR .....	196
4.4.1.1 Introduction.....	196
4.4.1.2 Présentation et analyse des résultats obtenus .....	196
4.5 CONCLUSION .....	199
<b>CONCLUSION</b> .....	<b>203</b>
<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b> .....	<b>209</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	<b>219</b>



# INTRODUCTION



# Introduction

---

Comme la plupart des industries, l'industrie automobile a longtemps reposé sur une économie d'échelle. Les constructeurs automobiles, utilisant les principes de production de masse développés par Ford, avaient pour souci essentiel de fabriquer des véhicules en séries énormes afin de minimiser le coût de production unitaire. Les produits fabriqués étant très standardisés, les constructeurs ne produisaient alors qu'un seul modèle de voiture en une seule couleur. Le système de production induit par ce mode de production est la ligne cadencée. Ces lignes d'assemblage sont composées de plusieurs centaines de postes de travail, chacun de ces postes correspondant à une portion continue de la ligne d'assemblage dans laquelle un ou plusieurs opérateurs sont affectés. Les véhicules passent d'un poste à l'autre grâce à un convoyeur se déplaçant à vitesse constante. Les véhicules ne sont pas retirés du convoyeur, les opérateurs se déplacent donc à côté du véhicule tout en réalisant leurs opérations et il n'y a pas de stock entre les postes de travail. La ligne cadencée permet de piloter simplement la production, de rationaliser le travail et de réduire les en-cours et les temps de manutention. L'inconvénient majeur de la production de masse est qu'elle rigidifie considérablement le système de production. Ce problème a peu d'importance en période d'excès d'offre mais l'industrie automobile est soumise depuis une vingtaine d'années à une rude concurrence due à la surcapacité générale. Dans un marché de ce type, la demande du client entraîne une réduction de la durée de vie des modèles et une augmentation de la diversité des véhicules construits. Aujourd'hui, la notion d'économie d'échelle n'est plus pertinente, nous sommes passés à une économie de variété. Bien que le nombre de modèles proposés par les constructeurs soit toujours limité, la présence d'options choisies par le client augmente considérablement le nombre de types de véhicules produits. Etant donné le coût des installations, ces modèles différents sont tous assemblés sur la même ligne d'assemblage. Ces lignes de production sont appelées **lignes d'assemblage à modèles mélangés** (« mixed-model assembly line ») et elles permettent d'abaisser la frontière entre la grande et la moyenne série. Les constructeurs peuvent ainsi satisfaire les demandes diversifiées de leurs clients sans, pour autant, avoir de grands stocks de produits finis. Sur une même ligne se succèdent alors un véhicule à moteur diesel, un modèle à moteur turbo, un autre nécessitant un toit ouvrant. La quantité de travail nécessaire à l'assemblage d'un véhicule peut donc varier d'un modèle à l'autre, créant ainsi une irrégularité du flux. Les contraintes des lignes d'assemblage à modèles mélangés se résument en deux points :

- il faut lisser le plus possible la charge des différents postes de travail,
- il faut synchroniser les flux de composants nécessaires à l'assemblage avec le flux des véhicules présents sur la ligne.

La réalisation du premier point nécessite que deux problèmes indépendants soient résolus : l'équilibrage de la ligne et le séquençement des véhicules. L'équilibrage de la ligne est une procédure qui affecte le travail aux opérateurs d'assemblage afin de répartir équitablement le travail entre les différents postes. Cette allocation des tâches nécessaires à l'assemblage des véhicules aux postes de travail est une procédure de planification à long terme. Dans la procédure de séquençement, l'attention est portée sur l'ordre spécifique selon lequel les différents modèles sont enlignés, c'est à dire lancés sur la ligne de production. Ce problème doit être résolu quotidiennement pour tenir compte du programme de production établi à partir des commandes des clients. Cet ordonnancement prévisionnel, ou statique, doit tenir compte des exigences et des contraintes spécifiques, parfois antagonistes, des trois ateliers constituant la ligne de construction automobile : les ateliers de ferrage, de peinture et de montage. Ainsi, en peinture, l'objectif est de minimiser les changements de teinte et donc de traiter les véhicules par rafales de couleurs, tandis qu'au montage, l'objectif est de lisser la charge de travail des opérateurs de la ligne. Beaucoup d'aléas perturbateurs peuvent se produire pendant la construction et certains véhicules sont retirés momentanément de la séquence afin d'être retouchés puis ré-injectés dans le flux. L'ordonnancement prédictif optimal étant impossible à maintenir tout au long du processus de fabrication, celui-ci est adapté, de manière réactive, selon les contraintes et les aléas des différents ateliers traversés. Des stocks de gestion intermédiaires, appelés buffers de re-séquencement, permettent d'assurer des ré-ordonnements locaux du flux avant l'entrée dans l'atelier.

Dans cette thèse, nous nous concentrons sur le problème du re-séquencement dynamique des véhicules en entrée de l'atelier de montage en supposant qu'une solution satisfaisante au problème d'équilibrage ait été donnée. Ce problème de gestion de stock tampon est un problème d'autant plus complexe qu'il est sujet à des contraintes temps réel. Pratiquement, il s'agit de déterminer de façon périodique (de l'ordre d'une décision par minute) en vue de certaines contraintes quel sera le prochain véhicule présent dans le buffer de re-séquencement à lancer en montage. Traditionnellement, ces décisions sont prises par un opérateur humain mais la complexité du problème n'est prise en compte que de façon incomplète. En garantissant une meilleure régularité du flux des véhicules dans l'atelier de montage, l'automatisation de la gestion du buffer de re-séquencement doit permettre de mieux maîtriser :

- les objectifs de production en qualité et en volume,
- l'approvisionnement en pièces,
- les coûts de fabrication.

La première partie de cette thèse présente de façon générale les problèmes de séquencements statiques et dynamiques des lignes d'assemblage à modèles mélangés. Le contexte de l'étude est décrit et une analyse de l'industrie automobile mondiale est faite. Les caractéristiques physiques et les contraintes des différents ateliers constituant d'une ligne de production automobile sont présentées. Les problèmes d'équilibrage, de séquencement statique et de re-séquencement dynamique sont ensuite exposés. Enfin, une revue critique et détaillée de l'existant est présentée.

La deuxième partie propose une formalisation mathématique du problème de re-séquencement dynamique en entrée de l'atelier de montage. Les causes et les conséquences d'un mauvais re-séquencement sont tout d'abord analysées et les objectifs de notre procédure de re-séquencement en sont déduits. Deux modélisations du flux des véhicules en montage sont ensuite présentées : la modélisation de la charge effective des postes de travail et la modélisation par espacement de critères. C'est cette dernière, plus intuitive et plus simple à manipuler, qui sera utilisée dans notre méthode de re-séquencement. La prise en compte des contraintes juste-à-temps est ensuite décrite. Enfin, la complexité du problème de re-séquencement selon la nature du buffer de re-séquencement (autostockeur ou architecture à tiroirs) est étudiée.

Les approches de résolution envisageables pour traiter notre problème sont exposées et critiquées dans la troisième partie. Trois types de méthodes sont présentés : les méthodes par voisinage, les méthodes liées à l'intelligence artificielle et les méthodes arborescentes. Deux méthodes émergent de cette analyse : la recherche par faisceau et le recuit simulé. La mise en œuvre des deux méthodes de résolution retenues est ensuite présentée. Les métriques génératives et évaluatives que nous avons développées sont introduites.

La quatrième partie présente les résultats obtenus lors de simulations réalisées sur un ensemble de jeux d'essais, le buffer de re-séquencement considéré étant l'autostockeur. Les résultats obtenus par chacune des deux méthodes sont comparés et une analyse de l'influence de la taille de l'autostockeur sur la qualité du re-séquencement réalisé est effectuée.



## CHAPITRE 1

---

# LE PROBLÈME DE SÉQUENCÉMENT DES LIGNES D'ASSEMBLAGE À MODÈLES MÉLANGÉS



# Chapitre 1

## Le problème de séquençement des lignes d'assemblage à modèles mélangés

---

### 1.1 Introduction

Ce chapitre a pour objet la présentation du problème de séquençement des lignes d'assemblage à modèles mélangés<sup>1</sup>. C'est ce type de ligne de production qui est utilisé dans les usines de construction automobile. La première partie de ce chapitre est consacrée à l'analyse de l'industrie automobile mondiale et à son évolution au cours du temps. La ligne de production automobile est ensuite présentée dans sa globalité et le problème de séquençement est introduit. Une revue critique et détaillée de la littérature conclut ce chapitre.

### 1.2 Contexte de l'étude : Analyse de l'industrie automobile

#### 1.2.1 Introduction

L'importance de l'industrie automobile dans l'économie mondiale est évidente. En effet, 50 millions de voitures neuves sont produites chaque année dans le monde. Aux États-Unis, les constructeurs automobiles et leurs fournisseurs sont à l'origine d'un emploi manufacturier sur 12 [RIF 96]. Si General Motors, Ford et Chrysler étaient des pays, ils auraient un PNB respectivement plus grand que celui de l'Inde, de l'Arabie Saoudite et de l'Irlande [BOU 97]. Baptisée « industrie des industries » par Peter Drucker juste après la guerre, la construction automobile est toujours l'activité industrielle la plus importante au monde. Elle est à l'origine des deux plus importantes évolutions des méthodes de production : le passage à la production de masse puis le développement de la production au plus juste [WOM 90]. Ces deux évolutions se sont produites, bien au-delà de l'industrie automobile, dans tous les secteurs industriels.

---

<sup>1</sup> Appelé « mixed-model assembly lines sequencing problem » dans la littérature anglo-saxonne.

Étudions, dans un premier temps, les 4 façons différentes de construire des voitures. Ces 4 méthodes de fabrication sont :

- la production artisanale,
- la production de masse (« mass production »),
- la production au plus juste (« lean production » ou « just-in-time production »),
- la production réfléchie (« reflective production »).

Jusqu'au début du 20<sup>ème</sup> siècle, les voitures étaient fabriquées de façon artisanale. Ce mode de production fut rapidement détrôné par la production de masse. Cette nouvelle façon de construire des voitures, imaginée par Ford puis modifiée par Sloan va vite devenir la norme industrielle. Cette norme mondiale est depuis quelques années remise en cause dans les pays occidentaux à cause de la réussite économique du Japon et de son mode de production baptisé production au plus juste ou production juste-à-temps. Un autre mode de production, représentant une alternative à la ligne d'assemblage classique, est apparu en Suède au milieu des années 80 : la production réfléchie. Les 4 modes de production cités vont être maintenant brièvement décrits. Une analyse très détaillée de l'industrie automobile, et notamment du système de production au plus juste, figure dans le livre de Womack et al. [WOM 90].

## 1.2.2 La production artisanale

La vente des premières automobiles remonte au milieu du 19<sup>ème</sup> siècle. A cette époque, les véhicules sont fabriqués de manière artisanale par des ouvriers hautement qualifiés. La production mondiale annuelle est de l'ordre du millier de voitures, toutes différentes les unes des autres, étant donné le mode de production artisanal. Chaque pièce est fabriquée suivant des spécifications approximatives et le travail le plus important est effectué par les ajusteurs qui rectifient les pièces afin de pouvoir les assembler correctement. Seule une clientèle aisée a accès à ce mode de transport car les coûts de production sont très élevés et ceux-ci ne diminuent pas avec le nombre de commandes. Chaque voiture étant un prototype, la qualité des finitions est remarquable mais la fiabilité des véhicules produits est aléatoire. De plus, la production étant répartie entre plusieurs petits constructeurs, les développements technologiques sont difficiles, voire quasi impossibles. Il ne reste plus que quelques producteurs de très haut de

gamme<sup>1</sup> qui produisent encore de nos jours de façon artisanale mais, faute de pouvoir bénéficier des innovations technologiques, ils ont dû s'associer à de grands constructeurs seuls capables de consacrer les sommes nécessaires au développement et à la recherche. La plupart des constructeurs artisanaux ont disparu après la première guerre mondiale, avec l'avènement de la production en série et les seuls survivants sont de nos jours de plus en plus concurrencés par les producteurs japonais qui s'intéressent de façon croissante à la production des voitures de luxe.

### 1.2.3 La production de masse

La première voiture produite en série a été la Ford Model T, en 1908. Cette voiture a été conçue par Ford pour pouvoir être produite en masse et donc proposée à une grande partie de la population. Ce qui a rendu possible la production en série de la Ford T n'est pas la chaîne de montage en continu<sup>2</sup> mais la standardisation des pièces et leur facilité de montage. La construction ne nécessitant plus d'ajustage, l'ouvrier n'accomplit plus alors qu'une seule tâche de montage et se déplace d'un véhicule à l'autre. Le cycle de travail de l'ouvrier Ford passe alors de 514 minutes à 2,3 minutes [WOM 90]. Se rendant compte des problèmes posés par les déplacements des ouvriers (perte de temps, embouteillage) et repensant au mécanisme utilisé dans les abattoirs de Chicago, Ford introduit la chaîne de montage en continu permettant aux ouvriers de travailler dans un poste fixe. Les ouvriers sont donc obligés de suivre la cadence imposée par la chaîne, ce qui a pour conséquence une augmentation de leur rythme de production. Le rythme de travail plus soutenu et l'économie réalisée sur les temps de déplacement ont permis de faire passer le cycle de travail de 2,3 minutes à 1,2 minutes [WOM 90]. Les ouvriers n'effectuant plus qu'une seule opération répétitive, Ford peut alors embaucher des ouvriers peu qualifiés.

Grâce à l'apparition de nouvelles machines capables de travailler le métal avec une grande précision, les pièces fabriquées sont rigoureusement identiques et donc interchangeable. Ces machines, conçues pour produire un seul objet, fabriquent alors en très grosses quantités les pièces, permettant ainsi d'en réduire le coût. Cependant, les machines-outils étant hyper-spécialisées, la conception d'un nouveau véhicule s'accompagne automatiquement d'une modification totale de la ligne de montage. Le système est donc particulièrement rigide et coûteux à faire évoluer.

Dans les années 20, devant la rigidité du système, General Motors, par l'intermédiaire de Sloan, est amené à apporter quelques améliorations. L'ambition de Sloan est de concilier la standardisation de pièces nécessaire pour

---

<sup>1</sup> Aston Martin par exemple.

<sup>2</sup> La chaîne de montage en continu a été introduite en 1913.

maintenir un faible coût de production et la demande de plus en plus diversifiée des consommateurs, de plus en plus exigeants. Il décide de standardiser le plus possible la plupart des composants mécaniques. Ces composants, identiques sur tous les modèles de la gamme, sont fabriqués en séries énormes afin d'en minimiser le coût. Parallèlement, il introduit le concept d'options et change régulièrement l'apparence extérieure de ces véhicules, afin de renouveler fréquemment la gamme dans l'esprit des clients. Le terme de « production de masse » correspond au système de Sloan. C'est ce système de production qui est ensuite adopté par les constructeurs européens dans les années 50. Ce mode de production va devenir la norme industrielle et il ne sera pas remis en cause avant la découverte des méthodes de production au plus juste employées par les constructeurs japonais.

### 1.2.4 La production au plus juste

Devant les difficultés rencontrées par l'entreprise Toyota à la fin des années 40, Eiji Toyoda et Taiichi Ohno partirent visiter les usines Ford de Détroit. Ils revinrent au Japon avec l'idée que le système de production de masse serait difficilement applicable au Japon et avec le sentiment qu'une nouvelle approche pouvait exister.

La première idée de Ohno, le père des concepts Kanban et juste-à-temps, est de réduire le temps nécessaire au changement des matrices utilisées dans les presses pour emboutir les différentes pièces. Ce temps très nettement raccourci permet de changer plus fréquemment les matrices et donc de fabriquer les pièces en plus petite quantité. Les coûts de stockage sont donc réduits et l'ampleur des problèmes de production diminue car les lots concernés par des éventuels défauts sont plus petits. Le système employé par Ohno tourne sur environ deux heures de stock et nécessite donc une main d'œuvre qualifiée et irréprochable, capable d'anticiper les problèmes éventuels. Ohno considère qu'il est irresponsable de laisser « filer » les défauts en fin de chaîne de production afin de maintenir coûte que coûte la chaîne en mouvement. Cette méthode comporte selon lui plusieurs inconvénients :

- elle déresponsabilise les ouvriers obnubilés par l'idée que le chaîne ne doit pas s'arrêter et qui ne signalent même pas les erreurs qu'ils ont commises et qui seront de toute façon réparées en bout de ligne,
- elle génère de la valeur ajoutée sur des véhicules défectueux,
- les retouches coûteuses réalisées sur les véhicules finis, constituent un travail difficile, nécessitant parfois le démontage quasi complet du véhicule,
- elle rend plus difficile l'analyse des causes de défauts.

Une détection plus précoce est donc synonyme d'économie importante et d'amélioration de la qualité. Ohno décide donc de permettre à chaque ouvrier d'arrêter immédiatement la chaîne dès qu'un problème important apparaît et d'introduire des dispositifs d'auto-contrôle simples appelés « poka-yoke » [MOL 89].

Une autre innovation introduite par Toyota concerne la coordination du flux des pièces dans l'usine et au sein du système d'approvisionnement. Ohno s'aperçoit en effet que les fluctuations du marché entraînent des commandes irrégulières aux fournisseurs qui se traduisent en stocks énormes chez ceux-ci. Il pense que ces coûts de stockage et cette surproduction peuvent être évités. Il introduit alors le concept de juste-à-temps baptisé kanban chez Toyota. L'idée est que les fournisseurs ne produisent les pièces que si l'étape suivante en a immédiatement besoin. Cette idée élémentaire en soi, est extraordinairement difficile à appliquer car elle supprime les stocks et place ainsi la chaîne en position d'équilibre, équilibre immédiatement rompu si une pièce quelconque arrive à manquer puisque la chaîne doit s'arrêter. Cette absence de marge de sécurité nécessite un approvisionnement sans faille et une anticipation des problèmes avant que ceux-ci ne deviennent trop sérieux. Mais si cette idée est parfaitement mise en œuvre, elle permet des gains énormes en productivité et en qualité, car la diminution drastique des stocks produit un dégagement de trésorerie et permet une réaction plus rapide aux évolutions. Les procédures d'amélioration de la production conduites par Ohno ont permis de :

- réduire les temps de changement de série en modifiant les presses (zéro temps de changement de série),
- réduire les défauts en permettant d'arrêter le convoyeur et en instaurant l'auto-contrôle (zéro défaut),
- réduire les délais en ne fabriquant que ce qui est nécessaire au moment nécessaire (zéro délai, zéro stock),
- réduire le taux de panne en développant la maintenance préventive et en ayant parfois des capacités de production excédentaires (zéro panne).

Ces différents objectifs<sup>1</sup> ne sont pas indépendants [ROG 92]. L'objectif zéro stock est une conséquence directe des autres objectifs. Quand les pannes sont réduites, quand les défauts diminuent, quand les livraisons ne sont pas en retard, les stocks peuvent être réduits. Pour illustrer cette dépendance, les japonais utilisent la métaphore de la rivière (cf. Figure 1.1).

Les problèmes sont représentés par les rochers et le niveau de stock est symbolisé par le niveau de l'eau. Quand un problème est résolu, un rocher est enlevé, le niveau des stocks baisse naturellement. On peut donner une autre interprétation à cette figure : les stocks masquent les problèmes et empêchent leur identification et leur résolution.

---

<sup>1</sup> Les cinq zéros : zéro temps de changement de série, zéro défaut, zéro délai, zéro stock, zéro panne.

Cette seconde interprétation peut être dangereuse car si l'on diminue les stocks sans auparavant traiter les causes, on s'expose à des ruptures de production.

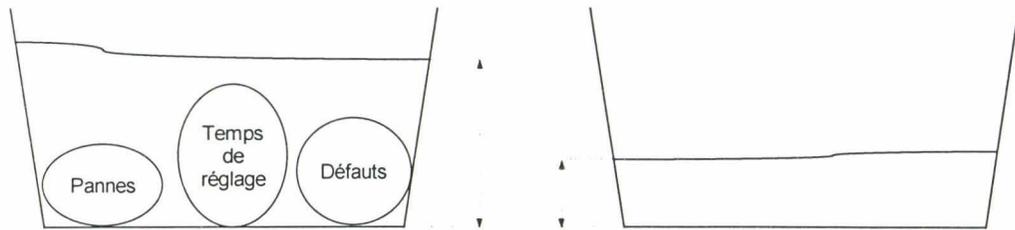


Figure 1.1 - Relation entre le niveau de stock et les problèmes de production

Un autre avantage du système créé par Toyota est la souplesse. Cette souplesse fait que le système est parfaitement adapté pour répondre rapidement et efficacement à la demande de plus en plus diversifiée de la clientèle. Les changements de production sont beaucoup moins coûteux que dans les systèmes de production de masse. Les entreprises au plus juste peuvent ainsi proposer un renouvellement plus fréquent des modèles et une gamme plus variée. La prise de conscience de ce fait par les entreprises occidentales est relativement récente et s'explique par le fait que les entreprises japonaises ont, dans un premier temps, proposé une faible diversité de modèles à l'exportation afin de réduire les coûts de distribution et de publicité. C'est cela qui fit penser aux industriels occidentaux que la réussite des japonais était due à une grande standardisation de leurs produits et à un haut degré d'automatisation. Cette erreur de diagnostic (les gammes sont en fait très variées et le niveau technologique des installations n'est guère supérieur) a amené les industriels à ne pas étudier les techniques de production japonaises et ce n'est qu'après la crise pétrolière du milieu des années 70 que les américains ont essayé de savoir pourquoi les entreprises japonaises semblaient épargnées.

On trouve dans le livre de Womack et al. [WOM 90] une comparaison entre une usine de production de masse (usine de Framingham - General Motors) et une usine de production au plus juste (usine de Takaoka - Toyota).

<i>Framingham (General Motors)</i>	<i>Takaoka (Toyota)</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Énorme espace consacré aux véhicules défectueux en bout de chaîne.</li> <li>• Énormes quantités de carrosseries vides attendant d'être lancées en montage après leur passage dans les cabines de peinture.</li> <li>• Énormes stocks de pièces en provenance des fournisseurs.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pratiquement aucun atelier de retouche.</li> <li>• Pratiquement pas d'attente entre les postes de soudure et les cabines de peinture, puis entre la peinture et les postes d'assemblage final.</li> <li>• Pas de magasins de pièces. Les pièces sont acheminées à intervalles réguliers sur la chaîne, venant directement de chez le fournisseur où elles viennent d'être fabriquées.</li> </ul>

Tableau 1-1 - Comparaison entre une usine de production de masse et une usine de production au plus juste

La production au plus juste est finalement l'application d'idées simples et pragmatiques. On confond souvent production au plus juste et production juste-à-temps mais le juste-à-temps n'est qu'une partie de la production au plus juste. Ce n'est que grâce à la diminution des stocks, donc grâce à la diminution des pannes, des défauts, des coûts de changement de production, que la procédure d'ordonnancement décentralisé, le kanban, c'est à dire le juste-à-temps, peut être mise en place. On ne fabrique alors que ce qui est nécessaire au moment nécessaire, juste-à-temps. Molet donne, dans son livre [MOL 89], les trois principes de base de l'approche au plus juste :

- étudier toujours les causes génératrices des aléas,
- faire que tous les acteurs concernés par les aléas participent à leurs analyses,
- chercher à améliorer sans cesse la situation même si elle est apparemment satisfaisante.

Si ces idées sont simples, leurs applications et leurs mises en œuvre peuvent ne pas l'être car elles remettent en cause le fonctionnement global de l'entreprise et les habitudes de travail.

### 1.2.5 La production réfléchie

L'industrie suédoise, et notamment Volvo, propose depuis quelques années une alternative à la ligne d'assemblage en introduisant un nouveau système de production baptisé production réfléchie. Un système de production réfléchie est un système très parallélisé dans lequel des équipes de travail autonomes, constituées d'une dizaine d'opérateurs, assemblent complètement les véhicules de façon indépendante. Les tâches affectées aux équipes comprennent par conséquent un nombre important d'opérations. Le travail d'assemblage dans les systèmes de production réfléchie nécessite de la part des opérateurs des compétences étendues. En plus des travaux

d'assemblage, les opérateurs sont responsables du contrôle des matériaux, du contrôle des outils, du nettoyage de leur atelier, du contrôle qualité, des ajustements, de certaines tâches administratives, de leur planning de production et de la formation. D'où le nom de production réfléchie. Le temps de cycle, qui est l'intervalle de temps au bout duquel l'opérateur répète la même série d'opérations, est de plusieurs heures<sup>1</sup>. Chaque équipe fabrique en moyenne quatre voitures par jour. Un des problèmes importants rencontrés dans ce type d'usine est la livraison des pièces aux différentes équipes [JOH 90].

Les défenseurs du système de production réfléchie affirment que les conditions socio-économiques suédoises sont telles que pour garder une main d'œuvre de qualité, les constructeurs sont obligés d'attirer les employés en créant des emplois satisfaisants, sans toutefois compromettre la productivité. En effet, l'augmentation de salaires visant à garder des opérateurs compétents créent de forts différentiels ou des salaires individualisés qui ne sont pas acceptables pour les syndicats suédois. Le mode de production réfléchie est basé sur des pré-conditions humaines et les principes d'apprentissage sont basés sur le mode naturel de l'être humain<sup>2</sup> [ELL 92].

Ce système de production est qualifié de néo-artisanat par Womack et al. [WOM 90]. Les auteurs de cette critique sont « sceptiques sur les capacités de ce nouvel artisanat à être aussi gratifiant que la production au plus juste ». Le fait que les temps de cycle soient plus longs et que des rectifications et des ajustages, inutiles dans une production au plus juste, soient nécessaires ne participent pas, selon eux, à l'enrichissement du travail. Ce qualificatif de néo-artisanat est un peu réducteur car malgré les ressemblances indéniables qu'il présente avec l'artisanat, le système de production réfléchie utilise des technologies avancées, notamment pour l'approvisionnement des composants. L'efficacité économique du système peut toutefois être remise en cause dans le cas d'une fabrication de véhicules de bas et de moyenne gamme.

Le concept de production réfléchie, bien qu'étant un concept avancé permettant sans doute d'améliorer la qualité de vie au travail, ne semble en effet applicable qu'à la production de voitures de luxe pour lesquelles la qualité est plus importante que la réduction des temps d'assemblages.

---

<sup>1</sup> Contre 1 minute pour la production de masse et la production au plus juste

<sup>2</sup> Méthode d'apprentissage fonctionnelle.

## 1.2.6 Évolution des modes de production

Chacun des différents modes de production présentés a ses racines dans un pays particulier. La production de masse est originaire des États-Unis, la production au plus juste, du Japon et la production réfléchie, de Suède. Il est intéressant de noter que chaque système reflète les conditions socio-économiques du pays dont il est originaire [ELL 92].

Les constructeurs américains, General Motors, Ford et Chrysler, surnommés les Big Three américains ont longtemps joui de leur supériorité sur leurs concurrents étrangers et ont totalement dominé leur marché intérieur, le plus grand du monde. Du point de vue des constructeurs occidentaux, l'industrie automobile reposait sur une économie d'échelle. Le passage d'une économie d'échelle à une économie de variété a quelque peu modifié leur jugement. Ils ont pris conscience du retard qu'ils avaient sur les constructeurs japonais les plus performants et commencent donc à adopter le mode de production au plus juste. Cette transition se fait d'ailleurs avec plus ou moins de réussite selon qu'il s'agit, respectivement, d'installations entièrement nouvelles ou de transformations d'installations déjà existantes.

La production de masse traditionnelle semble avoir vécu et l'exemple de la Corée du Sud est, sur ce point, intéressant [WOM 90] : au début des années 80, les constructeurs coréens ont décidé de passer à la production en grande série en utilisant une stratégie simple : fabriquer les voitures en très grande quantité et en utilisant une main d'œuvre très bon marché afin de pouvoir vendre moins cher que la concurrence, japonaise notamment. Cette stratégie s'avéra parfaitement efficace avant de s'effondrer totalement à la fin des années 80 pour deux raisons :

- le renforcement de la monnaie coréenne, synonyme de forte hausse du salaire des ouvriers,
- la qualité des voitures produites, les clients découvrant après un certain temps que bien qu'asiatiques, les voitures coréennes ne bénéficiaient pas de la qualité japonaise au plus juste.

A terme, il apparaît que les constructeurs des pays industrialisés ou en développement, sont amenés à adopter pour différentes raisons, principalement la qualité de fabrication, la production au plus juste. Cette prise de conscience a été quelque peu tardive chez les constructeurs européens, l'Europe restant incontestablement la patrie de la production de masse. Les firmes européennes commencent toutefois à perfectionner leur production de masse en y incorporant des éléments 'au plus juste'.

La révolution au plus juste n'est cependant pas encore d'actualité. Ainsi la variété d'offres proposées par les constructeurs européens progresse peu et le nombre de modèles proposés aux clients reste constant. La tendance

actuelle chez certaines firmes est même la réduction des gammes pour certains véhicules<sup>1</sup>. Pendant ce temps, les producteurs au plus juste continuent de diversifier leurs gammes et de réagir rapidement aux fluctuations du marché tout en maintenant une qualité de production irréprochable.

La production au plus juste présente cependant des inconvénients. Le fait que le système fonctionne en Kanban avec des stocks minimaux génère immédiatement des perturbations en cas de problème. Une grève chez un des fournisseurs peut bloquer rapidement toute l'usine [MOL 89]. De plus, même si la production au plus juste rend le travail des opérateurs plus gratifiant en leur déléguant davantage de responsabilité et en les faisant participer à l'amélioration constante du processus de fabrication, elle présente des défauts similaires à la production de masse : travail répétitif, discipline etc. Il ne faut pas non plus oublier que la production est également au plus juste car le nombre d'employés est minimum et que des heures supplémentaires sont par conséquent fréquemment nécessaires [ELL 92]. Si les constructeurs européens se convertissent à la production au plus juste sans augmenter leurs parts de marché, il est utopique de penser pouvoir éviter des licenciements massifs [WOM 90]. La production réfléchie quant à elle, même si elle peut sembler plus gratifiante pour les opérateurs, ne semble applicable que dans le cas d'une fabrication de voitures de luxe à faible volume.

## 1.2.7 Conclusion

Les modes de production concernés par cette thèse sont les deux modes les plus répandus<sup>2</sup> : la production de masse et la production au plus juste. Ces deux modes de production, contrairement à la production artisanale et à la production réfléchie, utilisent des lignes de production cadencées. Les lignes d'assemblage cadencées permettent de rationaliser le travail et de réduire les en-cours mais elles nécessitent un soin important dans la détermination de l'ordre dans lequel les produits sont fabriqués. Les problèmes d'ordonnancement rencontrés dans les usines de production de masse et dans les usines de production au plus juste sont de nature semblable. Avant de décrire précisément ces problèmes de séquençement, nous allons, dans la prochaine partie, présenter de façon générale la ligne de production automobile qui est un type particulier de ligne d'assemblage à modèles mélangés.

---

<sup>1</sup> Renault Twingo, Ford Ka, véhicules en série limitée, etc.

<sup>2</sup> Plus de 90% des usines de production automobile existantes utilisent soit un mode de production de masse, soit un mode de production juste-à-temps.

## 1.3 Présentation d'une ligne de production automobile

### 1.3.1 Introduction

Une usine de construction automobile s'identifie à un processus de fabrication enchaînée dont le cycle de fabrication est relativement court<sup>1</sup>. La ligne de production est composée de 3 ateliers consécutifs : l'atelier de ferrage, l'atelier de peinture et l'atelier de montage (cf. Figure 1.2).

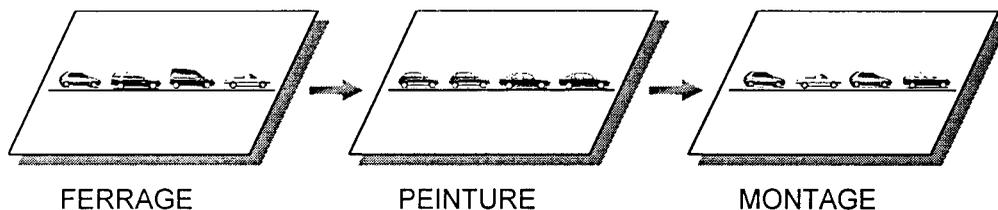


Figure 1.2 - Flux global d'une usine de production automobile

Dans l'atelier de ferrage, les pièces en tôle embouties sont assemblées afin d'obtenir une caisse nue avec tous les ouvrants. Cet atelier est en général fortement automatisé. Dans l'atelier de peinture, la caisse est traitée puis peinte. Enfin, des milliers de pièces mécaniques, électriques ou de garniture sont fixées sur la caisse pour former le véhicule final. Ces opérations s'effectuent dans l'atelier de montage.

Les véhicules assemblés sur une ligne de production automobile sont très variés. Les voitures sont en effet de plus en plus personnalisées pour répondre à la demande de plus en plus exigeante des clients. Cette personnalisation des véhicules est obtenue en augmentant le nombre d'options proposées. Le nombre considérable de combinaisons d'options est tel que chaque véhicule est presque unique. Weiner [WEI 85] souligne par exemple qu'il y avait potentiellement 2,5 millions de configurations possibles pour la Ford Escort. Wester et Kilbridge [WES 64] présente le cas d'une usine de fabrication de camions dont la production annuelle est de 130.000 unités. En tenant compte de toutes les options proposées aux clients, le nombre de modèles différents s'élève à 13 milliards, sans inclure les teintes. Si chaque client commande un camion différent, ce qui est presque le cas en pratique, l'entreprise peut donc produire pendant plusieurs centaines de siècles sans sortir deux véhicules identiques. La présence ou l'absence de ces options rend la charge de travail très variable d'un véhicule à l'autre. Le flux de véhicules qui passe consécutivement dans les trois ateliers est donc très irrégulier. Nous verrons plus tard que ces irrégularités du flux

---

<sup>1</sup> Entre 12 et 20 heures.

peuvent causer des problèmes de production. Intéressons nous dans un premier temps à l'étude de l'atelier de peinture et de l'atelier de montage.

### 1.3.2 L'atelier de peinture

Dans l'atelier de peinture, les caisses sortant de l'atelier de ferrage sont tout d'abord traitées contre les agressions chimiques. Les caisses sont ensuite traitées pour l'étanchéité puis couvertes d'une couche d'apprêts. Enfin, la teinte finale est appliquée et les caisses sont inspectées par un opérateur pour vérifier qu'elles ne présentent pas de défaut. Si une caisse n'est pas conforme, elle est soit retouchée partiellement si seule une partie du véhicule est concernée, soit poncée puis ré-injectée dans l'atelier pour être repeinte. Guerre-Chaley indique que, dans le cas qu'il étudie, le taux de retouches partielles concerne 10% du flux global, et que le taux de retouches totales en concerne 5% [GUE 95b].

Le rinçage des pistolets de peinture est obligatoire à chaque changement de teinte et le coût d'une purge du système est d'environ 100 francs. Ce coût de rinçage induit donc des contraintes de groupement par couleur, afin d'éviter des changements de teinte trop fréquents. Les lots de véhicules de même couleur sont appelés rafales de teintes. Il est clair que plus ces rafales sont longues, plus les changements de teinte sont rares et par conséquent plus les coûts de rinçage engendrés sont faibles. Les rafales ne doivent cependant pas dépasser une certaine longueur car cela diminue l'acuité visuelle des opérateurs chargés de la détection des défauts.

Le gain engendré par la création de rafales est facile à estimer. Supposons le cas d'une usine dont la production annuelle est 200.000 véhicules et dont le coût de changement de teinte est de 100 francs :

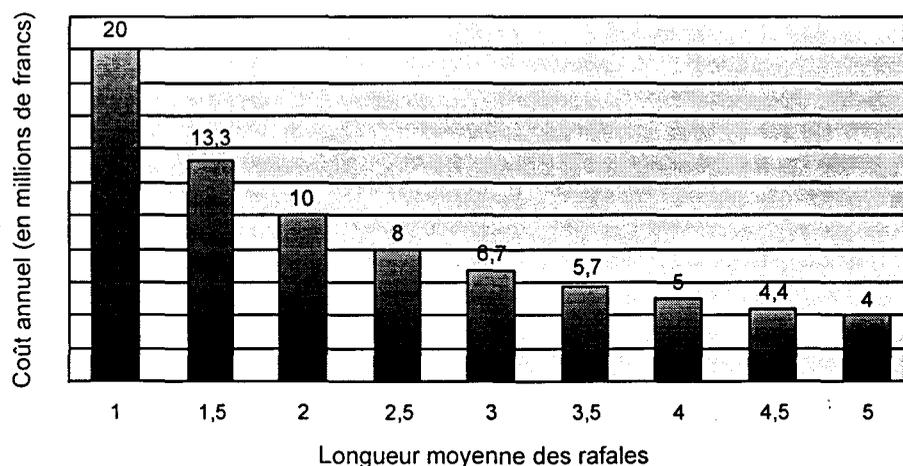


Figure 1.3 - Évolution du coût annuel des changements de teinte en fonction de la longueur moyenne des rafales.

On s'aperçoit que les gains obtenus en groupant les véhicules sont très importants. Le passage d'une longueur moyenne de rafale de 1 à 1,5 véhicules permet ainsi d'économiser près de 7 millions de francs par an.

### 1.3.3 L'atelier de montage

L'atelier de montage est caractérisé par la présence de nombreux opérateurs. C'est dans cet atelier que tous les différents éléments constituant le véhicule sont assemblés. L'atelier de montage a des caractéristiques particulières qu'il est important d'exposer clairement.

#### 1.3.3.1 Caractéristiques de l'atelier de montage

##### *(a) Le système de convoyage*

Une ligne d'assemblage est constituée de quelques centaines de postes de travail (de 100 à 500) dans lesquels les véhicules passent grâce à un convoyeur se déplaçant à vitesse constante. Les opérateurs se déplacent à côté du véhicule tout en réalisant leurs opérations. Une fois le travail réalisé, ils remontent le long de la ligne afin de travailler sur le prochain véhicule. L'arrêt du convoyeur ne survient qu'exceptionnellement.

##### *(b) La cadence de lancement*

Les véhicules sont espacés de façon régulière sur le convoyeur de telle sorte qu'un nouveau véhicule est introduit dans l'atelier à intervalle constant. La cadence de lancement est donc constante (Cadence de Lancement Constante, CLC). L'intervalle de temps entre le lancement de deux véhicules consécutifs est appelé le temps de cycle ( $\gamma$ ). Typiquement, ce temps est d'une minute. Si le système de convoyage autorise un espacement inégal entre les véhicules, il est possible d'utiliser une cadence de lancement variable (Cadence de Lancement Variable, CLV). Cette solution technique présente des avantages intéressants mais elle n'a jamais été employée dans l'industrie automobile car la CLC correspond mieux aux caractéristiques des convoyeurs. La CLV nécessite de changer le convoyeur et d'utiliser des contrôleurs et des capteurs sophistiqués. Son application est donc coûteuse.

*(c) Les stocks*

Il n'y a pas de stock entre les postes de travail. Par conséquent, excepté en de rares occasions, les véhicules ne sont pas retirés de la ligne avant qu'ils aient atteint le dernier poste. Chaque poste de travail reçoit donc la même séquence de véhicules. Une autre conséquence est que le temps de production est connu et qu'il est proportionnel à la longueur de la ligne.

*(d) Les postes de travail*

Une ligne de montage est composée de plusieurs centaines de postes de travail. Chacun de ces postes correspond à une portion continue de la ligne d'assemblage dans laquelle un ou plusieurs opérateurs sont affectés. Ces postes ont une limite amont et une limite aval. Selon la nature des tâches réalisées et l'agencement des équipements, les postes peuvent être ouverts ou fermés. Dans un poste ouvert, les opérateurs sont autorisés à franchir les limites pour travailler en dehors de leurs postes si cela ne gêne pas l'opérateur du poste adjacent. L'étendue du franchissement peut être limitée, par exemple, par la portée d'outils électriques. Dans un poste fermé, les opérateurs ne peuvent en aucun cas quitter leurs postes de travail. Pour certain poste, l'opérateur n'est autorisé à franchir que la limite amont ou aval. Si nous faisons l'hypothèse que le convoyeur se déplace de la gauche vers la droite, un poste dont seule la limite amont peut être franchie est appelé poste ouvert à gauche. Inversement un poste dont seule la limite aval peut être franchie est appelé poste ouvert à droite.

La vitesse du convoyeur étant fixée et les produits étant écartés régulièrement, le taux de production de la ligne est connu.

### 1.3.3.2 Les différents types de tâches de montage

Les travaux à réaliser dans l'atelier de montage sont décomposés en opérations élémentaires puis sont répartis entre les opérateurs. Pour chaque type de véhicules, chaque opérateur a donc un ensemble d'opérations à effectuer. Nous appellerons tâche de l'opérateur, cet ensemble d'opérations. Trois types de tâches sont effectués dans l'atelier de montage :

- *Tâche de type 1*

Les tâches de ce type sont des tâches qui sont effectuées sur chaque véhicule et dans un temps identique quel que soit le type de véhicule (ex. : montage des ceintures de sécurité, montage du pare-brise).

- *Tâche de type 2*

Les tâches de type 2 sont des tâches qui sont effectuées sur chaque véhicule mais dans un temps différent, fonction du type de véhicule. Ces tâches sont souvent liées à l'absence ou à la présence d'une option (ex. : montage de vitres électriques ou manuelles). Typiquement, l'assemblage des véhicules augmente en difficulté et en quantité de travail avec l'augmentation du niveau d'option. Il faut en général plus de temps pour construire un véhicule présentant beaucoup d'options (le véhicule est dit lourd) que pour construire un véhicule de base (le véhicule est dit léger).

- *Tâche de type 3*

Les tâches de ce type sont des tâches qui sont effectuées sur seulement quelques véhicules (ex. : montage de l'ABS, montage du toit ouvrant, montage de l'autoradio). Les capacités des postes de travail réalisant des tâches de type 3 sont liées à la demande. Cela permet de réduire les coûts de capacité à des niveaux inférieurs à ce qu'ils seraient si les tâches étaient réalisées sur chaque véhicule.

Donc, bien que les temps passés sur la ligne par chaque véhicule soient égaux, la quantité de travail nécessaire pour assembler un véhicule varie d'un modèle à l'autre. Un modèle haut de gamme nécessite un nombre de tâches supérieur à celui d'un modèle bas de gamme. De même, entre deux véhicules de même type (même motorisation, même niveau d'équipement), la présence sur l'un d'eux d'une option quelconque augmentera la quantité de travail nécessaire à sa construction. Le flux de travail est donc inégal tout au long de la ligne. Pour comprendre quelles sont les contraintes imposées par l'atelier de montage, examinons un exemple :

Considérons le poste de travail qui s'occupe de l'installation des toits ouvrants. Cette opération est une opération de type 3. Supposons que ce poste soit un poste ouvert et qu'il ait été conçu pour pouvoir traiter 25% des véhicules<sup>1</sup>. Le temps opératoire de ce poste est donc 4 fois supérieur au temps de cycle<sup>2</sup>. Si un véhicule nécessitant la pose d'un toit ouvrant franchit la limite amont du poste, l'opérateur réalise son opération tout en suivant le véhicule le long du convoyeur. La longueur du poste est telle que, s'il travaille à un rythme normal, l'opérateur peut terminer sa tâche avant que le véhicule ne franchisse la limite aval du poste. Quand son opération est achevée, l'opérateur remonte donc vers la limite amont de son poste. Si les trois véhicules suivant le

---

<sup>1</sup> i.e. au plus 25% des véhicules peuvent nécessiter l'installation d'un toit ouvrant.

<sup>2</sup> Si la cadence de la ligne est de 1 véhicule par minute, le temps de pose du toit ouvrant est de 4 minutes.

véhicule sur lequel l'opérateur vient de travailler ne nécessitent pas l'installation du toit ouvrant, l'opérateur regagne la limite amont de son poste juste au moment où le 5ème véhicule arrive. Il a donc suffisamment de temps pour installer l'option si ce véhicule le nécessite. Par contre, si le 4ème véhicule nécessite l'option, il est clair que l'opérateur ne peut pas terminer le montage du toit ouvrant sur celui-ci sans franchir la limite aval de son poste<sup>1</sup>. Pour que l'opérateur puisse maintenant regagner la limite amont de son poste, il faut que les 4 véhicules suivants ne nécessitent pas l'option. Sinon, la dérive de l'opérateur en dehors de son poste augmentera encore.

L'intérêt d'avoir une charge de travail dans l'atelier de montage parfaitement lissée à chaque poste apparaît clairement. Si la charge de travail n'est pas équilibrée tout au long du programme de production, des pertes d'efficacité des opérateurs apparaissent.

### 1.3.3.3 Les différentes pertes d'efficacité de l'opérateur - contrainte de lissage de la charge

Les pertes d'efficacité ont été définies par Thomopoulos [THO 67]. Elles sont de 4 types :

#### *(a) La surcharge de travail*

La surcharge de travail apparaît dans les postes de travail ouverts et ouverts à droite quand un opérateur doit franchir la limite aval du poste afin de terminer son travail sur un véhicule<sup>2</sup>.

#### *(b) L'inactivité*

L'inactivité apparaît dans les postes de travail fermés ou fermés à gauche quand un opérateur attend qu'un nouveau véhicule franchisse la limite amont de son poste.

#### *(c) Le manque de travail*

Le manque de travail apparaît dans les postes de travail ouverts et ouverts à gauche quand un opérateur franchit la limite gauche du poste pour trouver un véhicule sur lequel travailler.

---

<sup>1</sup> L'opérateur peut, bien sûr, augmenter son rythme de travail mais cela pose des problèmes de qualité.

<sup>2</sup> C'est cette perte d'efficacité qui apparaissait dans l'exemple précédent.

(d) Le travail non terminé

Le travail non terminé apparaît dans les postes fermés et fermés à droite quand un opérateur ne peut terminer son travail avant que le véhicule ne quitte son poste. Plusieurs solutions sont alors possibles : (1) un opérateur supplémentaire, appelé opérateur polyvalent ou flottant est appelé pour terminer le véhicule sur la ligne, c'est la solution la plus courante ; (2) on retire le véhicule de la ligne et on le termine dans des postes de retouche, on appelle cela un décyclage ; (3) on stoppe la ligne jusqu'à ce que le travail soit fini ; cette solution est très rarement employée dans les usines européennes, elle est par contre utilisée dans les usines de production au plus juste.

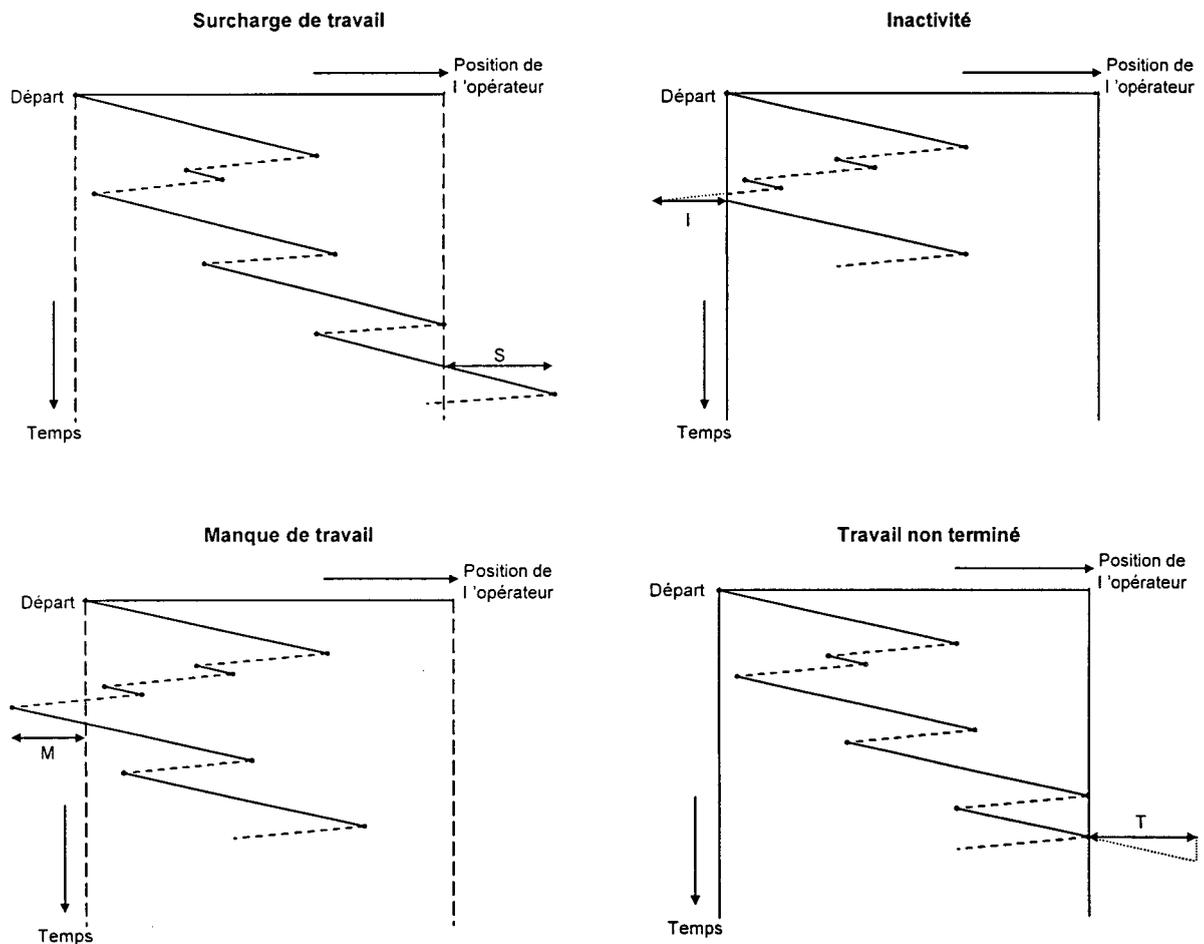


Figure 1.4 - Les différentes pertes d'efficacité

Ces différentes pertes d'efficacité sont illustrées sur la Figure 1.4 dans le cas d'un poste effectuant des tâches de type 2. Les lignes verticales correspondent aux limites amont et aval du poste de travail. Sur cette figure, l'abscisse représente la position de l'opérateur. L'ordonnée correspond au temps. Les lignes diagonales sont proportionnelles à la distance parcourue par les opérateurs qui réalisent leurs opérations pendant que le convoyeur se déplace de la

gauche vers la droite. Les lignes diagonales en pointillé correspondent à la remontée en amont de l'opérateur. Le poste représenté est un poste ouvert, dans le cas de la surcharge de travail et du manque de travail, fermé, dans le cas de l'inactivité et du travail non terminé. Comme nous le verrons dans le paragraphe 1.5.2, de nombreuses études ont pour objet la minimisation de ces pertes d'efficacité.

Une première contrainte apportée par l'atelier de montage sur le programme de production est donc une contrainte de lissage de la charge de travail sur les différents postes afin que les opérateurs puissent faire tout ce qu'ils ont à exécuter, dans l'intervalle de temps prévu, à vitesse d'exécution constante.

### 1.3.3.4 La contrainte juste-à-temps

La deuxième contrainte concerne les systèmes de production juste-à-temps (JAT). Ces systèmes de production comportent 4 niveaux (Figure 1.5, [MIL 89b]). Les matières premières ou les pièces achetées sont transformées en composants qui sont ensuite combinés pour former des sous-assemblages. Ces sous-assemblages sont finalement utilisés sur la ligne d'assemblage à modèles mélangés pour former les produits finis, c'est-à-dire les véhicules.

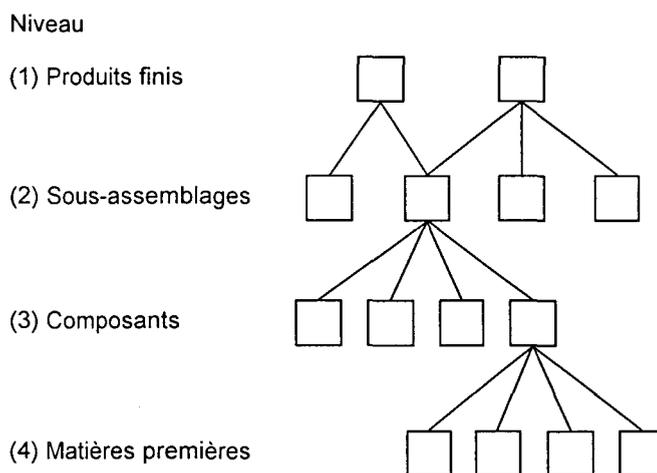


Figure 1.5 - Les niveaux de production d'un système de production juste-à-temps

Dans ce type de système de production, on produit juste les produits nécessaires en quantité nécessaire au moment nécessaire. Les sous-assemblages, composants et pièces nécessaires sont 'tirés' du niveau inférieur quand ils sont nécessaires. Or, dans un système fonctionnant en flux tirés, les variations de quantité de production des niveaux inférieurs doivent être minimisées [MON 83]. Si chaque pièce<sup>1</sup> est utilisée à cadence constante, il est alors possible

---

<sup>1</sup> Sous-assemblages, composants ou matières premières

de minimiser les en-cours. Pour chaque pièce utilisée sur la ligne d'assemblage à modèles mélangés, la quantité utilisée par heure, c'est-à-dire la vitesse ou le taux de consommation, doit être la plus constante possible. C'est le principe de la méthode de séquençement utilisée chez Toyota : la méthode « goal-chasing ». Dans cette méthode, l'ordre de lancement des véhicules en production est déterminé par les pièces nécessaires à l'assemblage des différents modèles. Comme le note Dudouet dans sa thèse [DUD 95], la gestion de production en flux tirés est encore peu utilisée en dehors du Japon, mais elle commence à intéresser, outre les constructeurs automobiles occidentaux, les grands assembleurs des secteurs informatique ou aéronautique.

#### 1.3.3.5 Conclusion sur les contraintes de l'atelier de montage

La contrainte majeure de l'atelier de montage est donc de lisser la charge de travail de chaque poste de la ligne afin de minimiser les pertes d'efficacité et donc d'optimiser le taux d'engagement des différentes machines et de la main d'œuvre. On peut y ajouter une contrainte toute aussi importante si le système de production considéré est un système de production au plus juste : garder un taux de consommation constant pour chaque pièce afin de minimiser les en-cours des différentes pièces utilisées lors de l'assemblage des véhicules.

### 1.3.4 Avantages et inconvénients de la ligne d'assemblage cadencée

L'intérêt d'utiliser une ligne d'assemblage cadencée est connu depuis Ford. Les principaux avantages proviennent de la rationalisation du travail et d'un faible en-cours. L'éclatement des tâches en opérations élémentaires permet leurs réalisations par des opérateurs relativement peu qualifiés réalisant des tâches répétitives. Le convoyeur élimine le temps de manutention des véhicules et minimise l'en-cours de produits finis. L'efficacité du processus, mesurée par le taux d'engagement des différentes ressources, est très élevée et la quasi-absence de temps perdu permet d'obtenir des coûts de production faibles.

La ligne d'assemblage comporte également quelques inconvénients. Le premier problème provient de l'irrégularité du temps de travail des opérateurs humains. Le temps nécessaire pour réaliser une tâche répétitive varie d'une répétition à l'autre. La distribution des temps opératoires est difficile à déterminer dans le cas d'un travail cadencé. Le rendement des opérateurs humains présente de grandes variations. Des études ont en effet montré que, bien que le rythme de travail des opérateurs soit relativement constant tout au long de la journée et de la semaine, il existait des variations de rendement [MUR 62][BUX 74]. Ces variations du rendement par heure sur un jour ou sur

une semaine ont le profil suivant : rendement bas puis maximal puis forte baisse. Ces variations de rendement sont dues aux repos plus grands pris par les opérateurs entre les opérations [BUZ 90]. A cause de cette variabilité, certaines opérations sont laissées incomplètes, ce qui constitue une perte de qualité et nécessite des retouches coûteuses. Il est clair que la ligne d'assemblage cadencée ne correspond pas aux caractéristiques naturelles des opérateurs humains. Ce problème est résolu si, plutôt que d'utiliser un convoyeur qui nécessite un transfert simultané d'un poste au suivant, on utilise un système de transfert asynchrone. Dans un tel système, un convoyeur libre déplace les produits d'un poste à l'autre seulement si le travail est terminé. Dans cette situation, la variabilité des temps opératoires diminue car les opérateurs contrôlent mieux leur rythme de travail [CON 55][BUF 61]. Cela nécessite donc la présence de stock devant chaque poste de travail. Comme l'a montré Davis [DAV 66], seule cette solution permet à une ligne d'assemblage d'atteindre son rendement maximum. Cette solution n'est évidemment pas viable dans le cas de l'assemblage automobile à cause de la taille des espaces de stockage qu'elle nécessite [BUZ 90].

Un autre problème est causé par la variabilité de la quantité de travail nécessaire à la construction des véhicules. Ce déséquilibre oblige souvent les opérateurs à franchir les limites de leurs postes et à travailler dans des postes adjacents. De tels franchissements peuvent conduire à des perturbations entre les opérateurs des postes adjacents, ce qui a pour conséquence l'augmentation des temps opératoires et la dégradation de la qualité des opérations réalisées [SUM 92][BHA 93]. Ces perturbations doivent donc être évitées le plus possible.

Le peu d'intérêt des tâches confiées aux opérateurs, notamment dans la production de masse, doit également être souligné. Cette situation provoque généralement un manque de motivation de la part de la main d'œuvre et entraîne une faible qualité des véhicules produits. Comme le note Roger [ROG 92], on a longtemps tenté de remédier à ce problème en augmentant les contrôles de produits finis. Cette méthode permet d'augmenter la qualité des véhicules livrés mais la qualité de production reste médiocre et le nombre de retouches important.

### **1.3.5 Conclusion**

Les lignes de production à modèles mélangés sont des chaînes complexes prévues pour produire simultanément plusieurs types de véhicules relativement différents. Comme nous l'avons vu, les différents ateliers qui les composent possèdent des contraintes propres, qui rendent très complexe la régulation du flux des produits. Le respect des contraintes de chaque atelier, synonyme de baisse des coûts de production et d'augmentation de la qualité des produits fabriqués est fortement dépendant de l'ordre dans lequel les véhicules sont assemblés sur ces lignes. Ce problème de séquençement des différents types de véhicules est exposé dans la prochaine partie.

## 1.4 Le séquençement d'une ligne de production à modèles mélangés

### 1.4.1 Introduction

Une utilisation efficace d'une ligne d'assemblage à modèles mélangés nécessite que les 4 problèmes suivants soient résolus [OKA 79] :

- (1) Détermination du temps de cycle de la ligne,
- (2) Détermination du nombre et de la séquence des postes de travail,
- (3) Équilibrage de la ligne,
- (4) Détermination de l'ordonnancement des différents produits sur la ligne.

Les problèmes (1) et (2) sont des problèmes de conception de ligne. Dans notre étude, nous considérons une ligne déjà existante et nous supposons par conséquent que le temps de cycle et les postes de travail sont clairement définis.

Les deux derniers problèmes sont des problèmes de planification. Le problème (3) est un problème de planification à long terme, il est exposé brièvement dans le paragraphe suivant. Le problème (4) est un problème de planification à court terme, appelé séquençement, il est exposé en détail dans le paragraphe 1.4.3.

### 1.4.2 Le problème d'équilibrage de la ligne de production

Une ligne de production réalise un ensemble fini de tâches qui ont chacune un temps opératoire et qui ont entre elles des relations de précédence. Le problème de l'équilibrage de ligne est 'd'affecter les tâches à une séquence ordonnée de postes de travail, afin que les relations de précédence soient satisfaites et que des mesures d'efficacité soient optimisées' [GHO 89]. L'équilibrage de ligne est donc une opération qui tente d'affecter les tâches aux postes et aux opérateurs afin d'atteindre une bonne utilisation des différentes ressources. En réduisant les écarts de charge entre les postes, le taux d'engagement des différentes machines et de la main d'œuvre est optimisé. A chaque changement de production, qu'il s'agisse du lancement en production d'un nouveau véhicule ou encore de la reconfiguration d'un poste de travail, une nouvelle solution au problème d'équilibrage de la ligne doit être trouvée.

Ce problème combinatoire nécessite donc d'obtenir une séquence de tâches respectant les contraintes de précédence puis de charger les postes de travail dans l'ordre de la séquence. Considérons l'exemple simple proche

de celui donné dans [ARC 66]. La ligne considérée est une ligne mono-produit. Dans un tel cas, le rythme de production maximal de la ligne est celui du poste le plus lent. L'opération d'assemblage du produit fini est composée de 8 tâches : a,b,c,d,e,f,g,h. Les relations de précedence sont les suivantes :

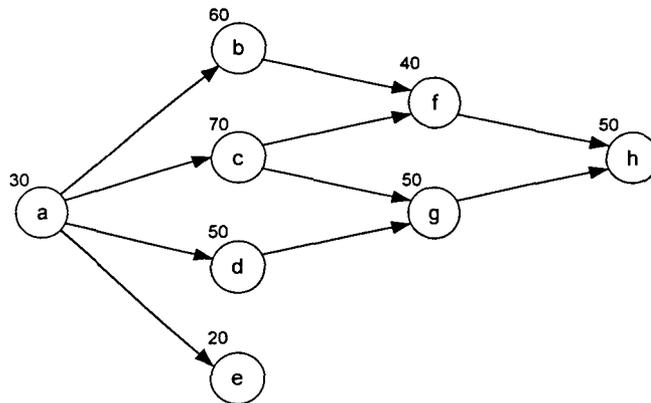


Figure 1.6 - Contraintes de précedence des tâches

Le chiffre associé à chaque tâche correspond à sa durée en secondes. Le temps de cycle  $\gamma$  est égal à 100 secondes. Le nombre de postes  $n$  est égal à 6. Une séquence admissible est par exemple : a - c - d - g - e - b - f - h ou a - b - c - d - e - f - g - h.

La somme des temps opératoires  $t$  est de 370 s. Ce temps vérifie bien la condition nécessaire suivante  $t \leq n\gamma$ . Pour que la ligne soit équilibrée, il faut que le temps gamme de chaque poste soit le plus proche possible de la valeur moyenne :

$$\bar{\gamma} = \frac{t}{n}$$

Dans notre exemple, l'affectation aux six postes qui vérifie le mieux cette condition est la suivante :

$$(a-e) - c - d - b - (g-f) - h.$$

La perte d'équilibrage totale de la ligne est mesurée (en %) en faisant la différence entre  $\gamma$  et  $\bar{\gamma}$  [BEN 87] :

$$\frac{\gamma - \bar{\gamma}}{\gamma} = \frac{n\gamma - t}{n\gamma}$$

Un mauvais équilibrage de la ligne conduit à une sous-utilisation des opérateurs et des machines et à de grands temps d'inactivité. Le problème de l'équilibrage d'une ligne de production mono-produit a fait l'objet de plusieurs études : [KIL 61][ARC 66][BON 73].

Ce qui précède se complique quand on produit simultanément plusieurs modèles. Les caractéristiques suivantes des lignes d'assemblage automobile, c'est-à-dire à produits mélangés, rendent difficile la résolution du problème d'équilibrage [ARC 66][CHA 86][BHA 93] :

- Certaines tâches ne peuvent pas être subdivisées et nécessitent donc un temps opératoire supérieur au temps de cycle. Si le temps opératoire de la tâche est fortement supérieur au temps de cycle, on lui affecte plusieurs opérateurs (affectations multi-opérateurs). Sinon, l'opérateur est obligé de quitter son poste quand il travaille sur un véhicule nécessitant l'opération ; cela est compensé par la faible quantité de travail des autres modèles qui permet à l'opérateur de remonter dans leur poste de travail. Dans tous les cas, la condition pour rendre possible le travail de montage est que la charge moyenne par véhicule ne dépasse pas le temps de cycle. Si ce n'est pas le cas, aucune méthode de séquençement ne pourra empêcher qu'un flux continu de véhicules non terminés ne sorte des postes de travail [SUM 92]. Le responsable de l'équilibrage équilibre donc la ligne sur la base de la moyenne pondérée de la charge de travail des différents modèles à assembler.
- La nature des relations de précédence et des contraintes technologiques rencontrées dans l'industrie automobile est parfois complexe. Il y a autant de contraintes douces que de contraintes dures. Certaines opérations sont à emplacement fixe. Il ne faut pas mélanger des opérations propres et des opérations sales. Certaines opérations ne doivent pas être trop éloignées les unes des autres, etc.

Le problème d'équilibrage d'une ligne d'assemblage à modèles mélangés étant un problème NP-difficile, les chercheurs ont développé des heuristiques afin de résoudre les problèmes de grande taille [LEH 69][THO 70] [ROB 70][CHA 86]. On trouve dans [GHO 89] une classification générale des problèmes d'équilibrage :

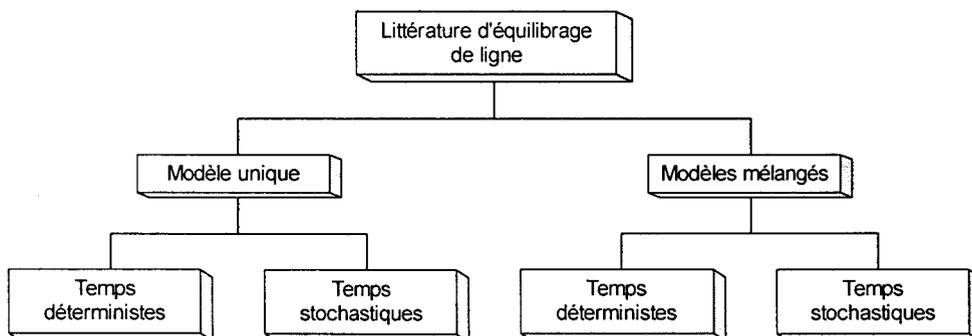


Figure 1.7 - Classification des problèmes d'équilibrage

D'autres revues d'ensemble existent : [IGN 65][BAY 86].

Notre étude s'intéressant au séquençement de la ligne de production, nous supposons désormais qu'un équilibrage autorisant une bonne utilisation de la main d'œuvre et des autres ressources est donné. Il est clair cependant que la solution donnée au problème d'équilibrage influencera directement le séquençement puisque la charge de travail à réaliser par chacun des postes sur chaque type particulier de produit est déterminée par la procédure d'équilibrage.

### 1.4.3 Le problème de séquençement de la ligne de production

Le problème de séquençement de la ligne de production constitue le centre de notre étude. Le problème de séquençement est un problème d'ordonnancement consistant à déterminer l'ordre dans lequel les véhicules seront fabriqués sur la ligne de production. Le contexte dans lequel s'effectue la production de voitures rend ce problème difficile à résoudre. En effet, la concurrence est telle que les constructeurs automobiles doivent simultanément réduire les coûts de production, diminuer les délais, augmenter la qualité, élargir les gammes et mieux adapter les véhicules aux désirs des clients. L'objet de ce paragraphe est de présenter les différentes contraintes prises en compte dans les problèmes de séquençement et de définir deux classes de problèmes : les problèmes statiques et les problèmes dynamiques.

#### 1.4.3.1 Les différents types de contraintes.

L'objectif du séquençement est la détermination de séquences de véhicules qui satisfassent le plus possible un certain nombre de contraintes. Ces contraintes sont de plusieurs types :

- *Contraintes de groupement*

Les contraintes de groupement sont celles que l'on rencontre typiquement dans l'atelier de peinture. Les coûts de purge des pistolets de peinture sont minimisés quand les voitures de même couleur sont regroupées dans la séquence et forment des rafales de teinte. Ce type de contrainte correspond à une minimisation des coûts de réglage.

- *Contraintes de lissage de la charge (ou contraintes de ratio-espacement ou contraintes de capacité)*

Les contraintes de ce type sont typiquement les contraintes rencontrées dans l'atelier de montage. Comme nous l'avons vu dans l'exemple du poste de pose des toits ouvrants dans le paragraphe 1.3.3.2, certains types

de véhicules nécessitent des temps d'assemblage tels que si plusieurs véhicules de ce type se suivent, les opérateurs n'ont pas le temps de terminer leurs tâches. Une perte d'efficacité apparaît, appelée surcharge de travail si le poste est ouvert ou travail non terminé si le poste est fermé. De même, si plusieurs véhicules représentant une faible charge de travail à un poste se suivent, l'opérateur aura des périodes d'inactivité ou devra franchir la limite amont de son poste si le poste est ouvert. La perte d'efficacité encourue est alors soit une inactivité soit un manque de travail. Le séquençement devra avoir comme objectif de niveler la charge de travail des postes afin de minimiser ces pertes d'efficacité. Il faut pour cela alterner le plus régulièrement possible les véhicules représentant une grande charge de travail (véhicules lourds) avec des véhicules ayant une charge plus réduite (véhicules légers). Bien sûr, la ligne d'assemblage pourrait bouger suffisamment lentement pour donner le temps suffisant au montage de toutes les options possibles sur chaque voiture produite, mais une telle approche est économiquement inconcevable. En fait, pour chaque option, la ligne est conçue pour traiter un ratio prédéterminé de voitures portant cette option.

Nous verrons dans le deuxième chapitre que les contraintes de lissage sont transformables en contraintes de ratio ou contrainte d'espacement de type : 'pas plus de  $k$  véhicules lourds parmi  $n$  véhicules' ou 'au moins  $k$  véhicules légers entre 2 véhicules lourds'. Cette contrainte est parfois appelée contrainte de capacité dans la littérature. Ces deux approches différentes sont appelées modélisation de la charge effective des postes de travail si l'on s'intéresse à la minimisation des pertes d'efficacité ou modélisation par espacement de critères si l'on s'intéresse à la minimisation des violations des contraintes de ratio ou d'espacement.

Il est à noter que l'apparition de surcharges instantanées causées par des tâches de durées supérieures au temps de cycle n'est pas due au séquençement mais à l'équilibrage. Par contre le séquençement est responsable de la façon dont ces surcharges de travail évoluent. On peut noter également que les postes de travail chargés de réaliser des tâches de type 1, dont la durée est identique quel que soit le type de véhicule, ne sont évidemment pas concernés par la contrainte de lissage de la charge.

- *Contrainte juste à temps*

Dans un système de production juste-à-temps, les taux de consommation de chaque pièce (produits finis, sous-assemblages, composants et matières premières) doivent être maintenus aussi constants que possible. Il est crucial que la demande en pièces soit uniforme afin de minimiser les en-cours. Les pièces des niveaux inférieurs sont tirées vers la ligne d'assemblage quand on en a besoin. Par conséquent, la séquence des

produits finis, c'est-à-dire la séquence de véhicules, détermine le taux de consommation de chaque pièce des niveaux inférieurs. Si chaque type de véhicule est réparti de façon régulière dans la séquence, alors le taux de consommation de chaque pièce est constant.

D'autres types de contraintes peuvent apparaître quand il y a plusieurs lignes de production ou quand un nouveau véhicule est progressivement lancé en production [CHE 91].

Chaque violation de l'une de ces contraintes représente un coût, soit direct dans le cas des contraintes de groupement, soit indirect quand la violation influe sur la qualité des véhicules produits. Il est donc important pour minimiser ces différents coûts de respecter au mieux ces contraintes. Ce problème est délicat car un même véhicule peut être soumis à plusieurs contraintes à la fois. Ainsi, si un véhicule est de couleur blanche, on le regroupera avec d'autres véhicules blancs pour respecter la contrainte de groupement. Cependant si ce véhicule doit être équipé d'un toit ouvrant, il faudra qu'il ne soit pas trop proche dans la séquence d'autres véhicules nécessitant cet équipement afin de respecter les contraintes de lissage de la charge. Une séquence de véhicules minimisant les changements de teinte, i.e. respectant les contraintes de groupement, n'est pas forcément celle qui minimisera les contraintes juste à temps et les contraintes de lissage. Ces contraintes ne sont d'ailleurs pas indépendantes. En effet, supposons que les clients qui choisissent un moteur turbo diesel préfèrent les voitures gris métallisé. De longues rafales de voitures grises permettront de réduire les coûts de changement de teinte mais causeront inévitablement des surcharges dans l'atelier de montage à cause de la concentration de moteurs turbo diesel qui représentent une charge de travail supérieure pour les postes concernés. De plus, le taux de consommation des différentes pièces ne sera pas constant.

Il apparaît clairement que l'atelier de peinture et l'atelier de montage ont chacun leurs propres contraintes, qu'elles sont souvent antagonistes et qu'il n'est par conséquent pas toujours possible de toutes les satisfaire. Deux approches différentes sont possibles pour résoudre ce problème :

- (1) On crée une séquence qui réalise un compromis entre les contraintes des différents ateliers, on parle alors de problème statique,
- (2) On insère entre les différents ateliers des stocks, appelés buffers, qui permettent de réordonner les véhicules afin d'adapter la séquence aux contraintes spécifiques de chaque atelier ; le problème est alors dynamique.

### 1.4.3.2 Le problème statique

Si cette solution technique est choisie, la séquence de véhicules doit prendre en compte les contraintes parfois antagonistes des différents ateliers et constituer un optimum global pour l'ensemble de la ligne.

Chaque jour, un programme de production est bâti à partir des commandes et des prévisions de vente. Ce programme respecte bien évidemment les capacités de production de l'usine. Cet ordonnancement initial est la liste ordonnée des véhicules qui seront lancés en entrée du ferrage. Cette séquence doit être bien adaptée aux trois ateliers. Malheureusement, comme nous l'avons vu, chacun de ces ateliers a des exigences et des contraintes spécifiques. La séquence doit par conséquent réaliser un compromis entre ces contraintes. Il est alors important de connaître l'importance relative de chacune de ces contraintes par rapport aux autres.

Lors de la construction de la séquence, on peut traiter simultanément toutes les contraintes [BOL 94] ou au contraire les appréhender les unes après les autres [BUR 87][CHE 91]. Dans leur article, Burns et Daganzo [BUR 87] regroupent les véhicules afin de minimiser les coûts de réglage, qui, dans leur cas, sont de plusieurs types : coûts de changement de teinte, coûts de changement d'outils, etc. Les véhicules sont d'abord groupés pour minimiser le coût total de réglage le plus élevé. Ensuite, dans chacun de ces groupes, les véhicules sont à nouveau groupés afin de minimiser le 2ème coût le plus élevé. L'opération est effectuée jusqu'à ce que chaque regroupement élémentaire atteigne une longueur d'environ 40 véhicules, même si tous les coûts de réglage n'ont pas été pris en compte. Dans chacun de ces groupes, les véhicules sont ensuite espacés le plus régulièrement possible afin de réduire les violations des contraintes de ratio sans augmenter les coûts de réglage. La séquence est finalement obtenue en concaténant les sous-groupes. La Figure 1.8 illustre cette procédure sur un exemple simple : 12 véhicules sont à séquencer ; il existe 2 teintes différentes (gris foncé et gris clair) ; les véhicules représentés par des carrés et les véhicules représentés par des ronds sont des véhicules qui nécessitent des outils différents ; il existe 3 types de modèles différents (1,2,3) qui doivent être espacés le plus régulièrement. Comme le coût de groupement le plus élevé correspond au coût de changement d'outils, les véhicules sont d'abord regroupés par type d'outils utilisés. Dans chaque sous-groupe, ils sont ensuite regroupés par teinte. Puis les véhicules sont espacés régulièrement entre eux.

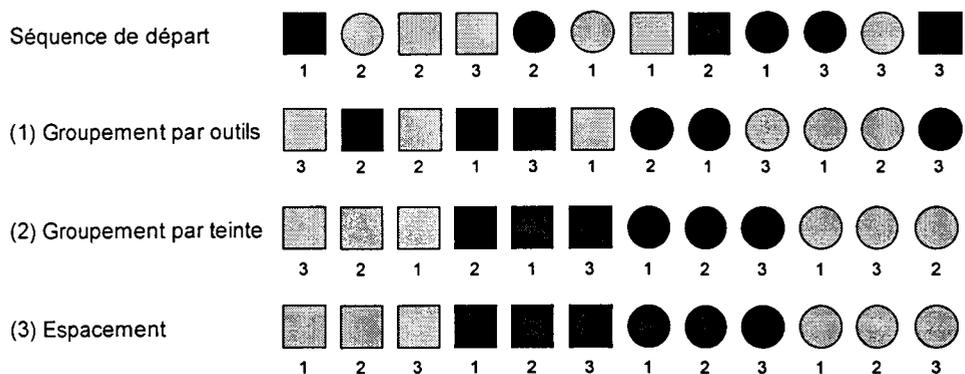


Figure 1.8 - Techniques de groupement et d'espacement de [BUR 87]

Bien sûr, plus le nombre de véhicules par groupe diminue et plus les risques de violations des contraintes de montage augmentent. A partir d'un certain point, il coûte plus cher de regrouper de nouveaux véhicules que cela n'en rapporte. Il est donc important de connaître précisément les différents coûts de violations des contraintes afin de réaliser un compromis optimal. Malheureusement, les coûts de violation des contraintes de ratio sont des coûts difficiles à évaluer car le facteur qualité entre en jeu [BUR 87]. De plus, dans cet exemple, les choix possibles pour chaque véhicule sont équiprobables et indépendants des autres choix. Les groupes sont donc composés du même nombre de véhicules. En réalité, ces choix ne sont pas indépendants<sup>1</sup> et le regroupement quand la taille des groupes varie n'est pas aussi facile. De plus, une seule contrainte de ratio est considérée ici. Le problème est évidemment beaucoup plus complexe quand on doit en considérer plusieurs.

Cet ordonnancement initial, ou prévisionnel, est parfois calculé plusieurs jours avant sa mise en production afin de donner des indications de date de livraison probable ou pour générer des ordres d'approvisionnement. Cependant, des événements imprévisibles nécessitent parfois qu'il soit recalculé. Plusieurs types d'événements peuvent se produire et remettre en cause la séquence :

- des modifications de l'équilibrage,
- le lancement retardé d'un nouveau véhicule,
- le changement de certaines caractéristiques des véhicules provenant du service commercial.

Ces événements nécessitent que la séquence soit reconstruite. D'autres aléas peuvent survenir le jour même de la production de la séquence. Par exemple :

<sup>1</sup> La probabilité qu'un véhicule rouge ait un moteur turbo n'est pas la même que pour un véhicule blanc.

- *l'interdiction* : un problème d'approvisionnement d'une pièce interdit le montage des véhicules nécessitant ce composant,
- *la limitation* : le lancement en fabrication de certains types de véhicules est limité par le nombre de composants disponibles.

L'occurrence de ce type d'aléas nécessite également que la procédure d'ordonnancement soit relancée.

Un dernier type d'aléas peut également perturber la séquence sans que celle-ci ne puisse être rebâtie. En effet, l'ordonnancement initial est prévu pour être maintenu tout au long du processus de fabrication : ferrage, peinture, montage. Or beaucoup d'aléas perturbateurs peuvent se produire pendant la construction des véhicules et modifier la séquence originale. L'exemple le plus critique concerne l'atelier de peinture. Nous avons vu qu'une des caractéristiques de cet atelier est que la proportion de véhicules devant être retouchés est de l'ordre de 15 %. De telles retouches nécessitent souvent le décyclage des véhicules concernés. Ces véhicules sont alors retirés de la séquence afin d'être retouchés puis sont ensuite ré-injectés dans le flux mais dans des positions différentes de celles qu'ils occupaient initialement. La séquence de véhicules sortant de l'atelier de peinture est, par conséquent, très différente de la séquence initiale. Si ce flux de véhicules n'est pas ré-ordonné il causera de nombreuses violations de contraintes dans l'atelier de montage. Ces décyclages peuvent également se produire dans l'atelier de montage, mais ils sont plus rares.

Si les processus ne sont pas plus fiables<sup>1</sup>, il est nécessaire de placer un stock tampon entre l'atelier de peinture et l'atelier de montage. Le problème change alors de nature, il ne s'agit plus d'un problème statique mais d'un problème dynamique.

#### 1.4.3.3 Problème dynamique

Les ateliers amont étant tels que la séquence d'entrée prédéterminée est impossible à maintenir, il est courant de trouver des stocks de gestion intermédiaires entre les différents ateliers (cf. Figure 1.9). Ces stocks permettent d'assurer des ré-ordonnements locaux du flux afin de l'adapter aux contraintes des différents ateliers : contraintes de groupement pour l'atelier de ferrage (afin de minimiser les changements des matrices des presses) et pour l'atelier de peinture (afin de minimiser les changements de teinte) ; contraintes de lissage de la charge et contraintes juste-à-

---

<sup>1</sup> Notamment l'atelier de peinture.

temps pour l'atelier de montage (afin d'améliorer la qualité et l'utilisation de la main d'œuvre et de rendre plus constant le taux de consommation des différentes pièces).

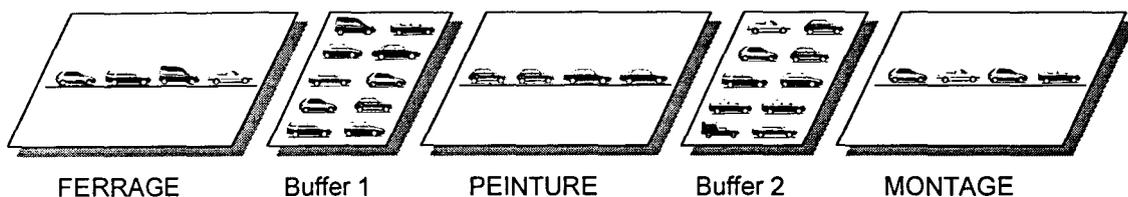


Figure 1.9 - Flux global d'une usine de production automobile avec stocks de re-séquençement

Dans certains cas, ces buffers permettent également d'absorber des différences de cadences ou d'horaires de travail entre les ateliers. Différentes solutions matérielles existent selon les usines : l'architecture à tiroirs composée de FIFO en parallèle ou l'autostockeur (cf. Figure 1.10).

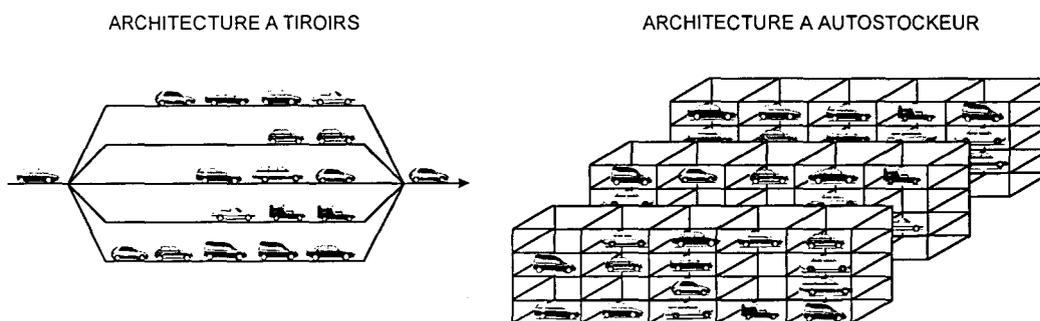


Figure 1.10 - Les différents stocks de gestion intermédiaires

- L'architecture à tiroirs est un ensemble composé de plusieurs files d'attente ayant chacune une gestion de sortie FIFO. A chaque instant le nombre de véhicules accessibles est donc égal au nombre de files. Les caractéristiques d'une telle architecture sont le nombre de tiroirs et la capacité de ceux-ci. L'ordre d'entrée des véhicules dans les tiroirs conditionne fortement l'ordre de sortie. Les contraintes inhérentes à ce genre d'architecture seront décrites dans le 2ème chapitre.
- L'autostockeur est un magasin dans lequel tous les véhicules sont directement accessibles. Il est composé de nombreuses cellules contenant chacune un véhicule. Ces cellules sont regroupées en travées et chaque travée est desservie indépendamment par un ascenseur. L'autostockeur permet un ré-ordonnancement quelconque de tous les véhicules présents puisque chaque véhicule est accessible individuellement.

La taille de ces stocks de gestion est variable selon les lignes de production. Elle est typiquement comprise entre 100 et 500 places. La décision d'utiliser l'une ou l'autre des solutions techniques est dictée par différentes considérations :

- le prix : une architecture à autostockeur coûte beaucoup moins cher qu'une architecture à tiroirs,
- la fiabilité : une architecture à tiroirs ne tombe jamais en panne,
- la qualité du flux entrant et l'occurrence des aléas : si le flux entrant est très perturbé et si les contraintes de l'atelier aval sont très dures, l'autostockeur est sans doute plus adapté. De plus, il permet de mieux réagir aux aléas si ceux-ci sont fréquents.

Le problème dynamique diffère du problème statique en trois points :

- les véhicules arrivent dynamiquement ; l'enveloppe de véhicules à ordonnancer est donc variable<sup>1</sup> et un nouveau véhicule doit être sélectionné à chaque temps de cycle. De plus, bien que la composition de l'enveloppe journalière soit connue, l'ordre d'arrivée des véhicules dans le buffer n'est pas connu.
- les contraintes à prendre en compte sont propres à l'atelier qui se trouve en aval du buffer,
- l'architecture du buffer ajoute des contraintes supplémentaires car il peut être physiquement impossible d'accéder à un véhicule. De plus, un aléa supplémentaire est à considérer dans le cas d'un autostockeur : la panne de travée. Quand cette panne se produit, les véhicules rangés dans la travée concernée deviennent momentanément indisponibles.

Pratiquement, le problème de re-séquencement consiste à déterminer de façon périodique<sup>2</sup> quel est le prochain véhicule à lancer sur la ligne, étant donné les contraintes de l'atelier aval et les véhicules déjà lancés. Traditionnellement, ce séquençement est réalisé par un opérateur humain. La qualité de la solution manuelle est essentiellement dégradée par 2 facteurs typiquement humains :

- la nécessité de prendre une décision toutes les minutes demande une attention soutenue et l'on constate des irrégularités de choix dans la journée,
- la complexité du problème n'est traitée qu'approximativement par l'opérateur humain qui est incapable de prendre en compte simultanément toutes les données du problème.

---

<sup>1</sup> Les véhicules venant de l'atelier de peinture n'arrivent pas de façon régulière dans le buffer de re-séquencement.

<sup>2</sup> De l'ordre d'une décision par minute.

La résolution du problème dynamique passe par l'automatisation de la gestion des stocks de ré-ordonnancement.

### **1.4.4 Conclusion**

Le problème de séquençement d'une ligne de production automobile, qu'il soit statique ou dynamique, est un problème complexe. Un véhicule est produit toutes les minutes ; la ligne de production est composée de 3 ateliers ayant chacun des contraintes spécifiques, l'atelier de montage est composé de plusieurs centaines de postes de travail dont la charge doit être surveillée.

Dans le cas du problème statique, la production journalière à ordonnancer comprend typiquement un millier de véhicules presque tous différents et la séquence produite doit respecter au mieux des contraintes parfois antagonistes.

Dans le cas du problème dynamique, une décision doit être prise chaque minute en prenant en compte les contraintes de l'atelier aval et l'architecture du buffer de re-séquencement. Dans tous les cas, l'objectif du séquençement est d'améliorer l'adéquation du flux avec les contraintes des différents ateliers afin de mieux maîtriser :

- les objectifs de production en qualité et en volume,
- l'approvisionnement en pièces,
- les coûts de fabrication.

## **1.5 Les problèmes étudiés dans la littérature**

### **1.5.1 Introduction**

Étant donné la complexité des lignes de production à modèles mélangés et l'importance de l'industrie automobile dans le monde, il est normal que le problème de séquençement ait intéressé les chercheurs depuis plus de 30 ans. Une critique détaillée de la littérature existante est donnée dans la partie suivante. Cette analyse permettra de dresser un tableau synthétique des différents articles en fonction de plusieurs critères. Une comparaison avec d'autres problèmes d'ordonnancement sera ensuite établie.

## 1.5.2 Revue critique et détaillée de la littérature

Cette revue critique est présentée sous forme chronologique afin de mieux percevoir l'évolution des objectifs de la recherche par rapport à l'évolution de la construction automobile. Certains algorithmes importants sont détaillés<sup>1</sup>.

- *Wester et Kilbridge [WES 64]*

Wester et Kilbridge ont été les premiers chercheurs à s'intéresser sérieusement au problème de séquençement des lignes d'assemblage à modèles mélangés. Leurs travaux concernent le problème de séquençement statique, mais ils ne tiennent compte que des contraintes de lissage de la charge. Leur objectif est de minimiser les temps d'inactivité des opérateurs tout en maintenant les surcharges de travail à un niveau faible. Les auteurs supposent que la ligne est parfaitement équilibrée et que la charge de travail de chaque véhicule est par conséquent distribuée équitablement entre les différents postes. Comme le note [YAN 89], cette hypothèse réduit le problème à un problème à poste unique puisque l'hypothèse de l'équilibrage parfait rend tous les postes identiques. Le problème de séquençement demeure cependant. Ils considèrent les cas où la cadence de lancement est constante (CLC) ou variable (CLV). Dans tous les cas, les auteurs supposent que la cadence de lancement est une variable de décision. Dans le cas de la cadence variable, ils concluent fort justement que, dans leur cas, le séquençement n'est plus nécessaire. Les auteurs introduisent le concept de séquence cyclique en présentant l'exemple suivant. Une ligne de production produit 5 modèles différents A, B, C, D, E, dont la demande est respectivement 80, 120, 200, 160, 80. Le plus grand diviseur commun de ces demandes est 40. On peut donc appliquer la procédure de séquençement à 2A, 3B, 5C, 4D et 2E. La séquence obtenue est alors répétée 40 fois. Cette simplification permet donc de réduire de façon significative l'effort de résolution s'il existe un grand entier qui divise toutes les demandes. Mais plus il y a de véhicules différents, plus cette chance est petite. De plus, la concaténation de cette séquence minimale peut poser des problèmes car l'état dans lequel se trouve la ligne après la production des véhicules de la première séquence peut être différent de l'état de départ.

Pour résoudre le problème dans le cas CLC, Wester et Kilbridge utilisent une procédure par construction progressive où pour chaque position de la séquence, le meilleur véhicule (par rapport à leur métrique) non encore sélectionné est choisi.

---

<sup>1</sup> Par soucis de cohérence de la présentation, les notations utilisées ne sont pas celles qui sont employées dans les articles originaux

- *Thomopoulos [THO 67]*

Thomopoulos introduit les quatre pertes d'efficacité auxquelles sont sujettes les lignes d'assemblage<sup>1</sup>. La procédure qu'il utilise pour traiter le problème statique est une procédure de construction progressive. La séquence est bâtie véhicule par véhicule, en choisissant à chaque itération celui qui minimise les pénalités engendrées par les pertes d'efficacité. La procédure est donc sous-optimale. Seule la contrainte de lissage de la charge est considérée. Les pénalités encourues tiennent compte du salaire des opérateurs qui sont victimes des pertes d'efficacité car il vaut mieux rendre inactif un opérateur peu payé. Les pertes d'efficacité les plus pénalisées sont les inactivités et les travaux non terminés. Thomopoulos compare les séquences obtenues à des séquences générées aléatoirement et constate que sa procédure est plus performante.

- *Macaskill [MAC 73]*

Macaskill présente une amélioration de la méthode employée par Thomopoulos. Les performances de la procédure de Thomopoulos sont limitées par la concentration de véhicules lourds (véhicules représentant une charge de travail importante) en fin de séquence. Ce phénomène, appelé 'cherry picking', est partiellement évité dans la procédure de Macaskill, car chaque véhicule présentant un faible coût est immédiatement suivi par un véhicule lourd n'engendrant pas de travaux non terminés. Seule la contrainte de lissage de la charge est prise en compte. La perte d'efficacité la plus pénalisée est le travail non terminé.

- *Dar-El et Cother [DAR 75]*

Dar-El et Cother améliorent le travail de Thomopoulos en développant une procédure qui bâtit une séquence qui minimise la longueur totale de la ligne d'assemblage et qui ne provoque pas de perte d'efficacité. Comme le note [YAN 89], cela revient à placer un coût infini sur toutes les pertes d'efficacité. Cette étude suppose que les longueurs des postes de travail, ouverts et fermés, peuvent être spécifiées et s'adresse par conséquent plutôt aux concepteurs de ligne. Dans le cas où la longueur de la ligne est fixée, leur procédure revient toutefois à minimiser les inactivités tout en respectant la contrainte suivante : pas de surcharge de travail ni de travail non terminé.

Les auteurs utilisent deux heuristiques afin de répartir le plus uniformément possible les différents modèles dans la séquence. La première heuristique, l'heuristique de sélection, classe les véhicules par ordre décroissant de rang, le rang étant la différence entre le nombre de véhicules qui auraient dû être enlignés jusqu'ici, si tous les modèles

---

<sup>1</sup> Cf. paragraphe 1.3.3.3.

étaient répartis uniformément, et le nombre de véhicules effectivement enlignés. Les modèles ainsi classés sont testés par l'heuristique d'acceptation pour savoir s'ils créent des pertes d'efficacité. Le premier modèle qui réussit ce test est sélectionné et ainsi de suite. Si aucun modèle ne satisfait l'heuristique d'acceptation, les longueurs des postes sont augmentées et le processus est relancé.

Cette procédure utilise la notion de modèles et suppose donc que la variété des véhicules n'est pas grande. Dar-El et Cother montrent que la longueur de la ligne d'assemblage diminue quand la ligne est parfaitement équilibrée, et que, pour atteindre une efficacité maximale, on doit utiliser des postes de travail ouverts, dès que cela est possible.

- *Dar-El et Cucuy [DAR 77]*

Dar-El et Cucuy proposent une évolution du travail de [DAR 75] qui permet de bâtir une solution optimale dans le cas d'un équilibrage parfait. Les postes considérés sont des postes fermés et des séquences cycliques sont utilisées. La méthode de résolution employée est la programmation en nombres entiers. L'algorithme proposé n'est utilisable que pour des problèmes de petites tailles et pour des postes de travail parfaitement équilibrés.

- *Dar-El [DAR 78]*

L'article développe une classification des lignes d'assemblage à modèles mélangés en fonction de leurs caractéristiques techniques :

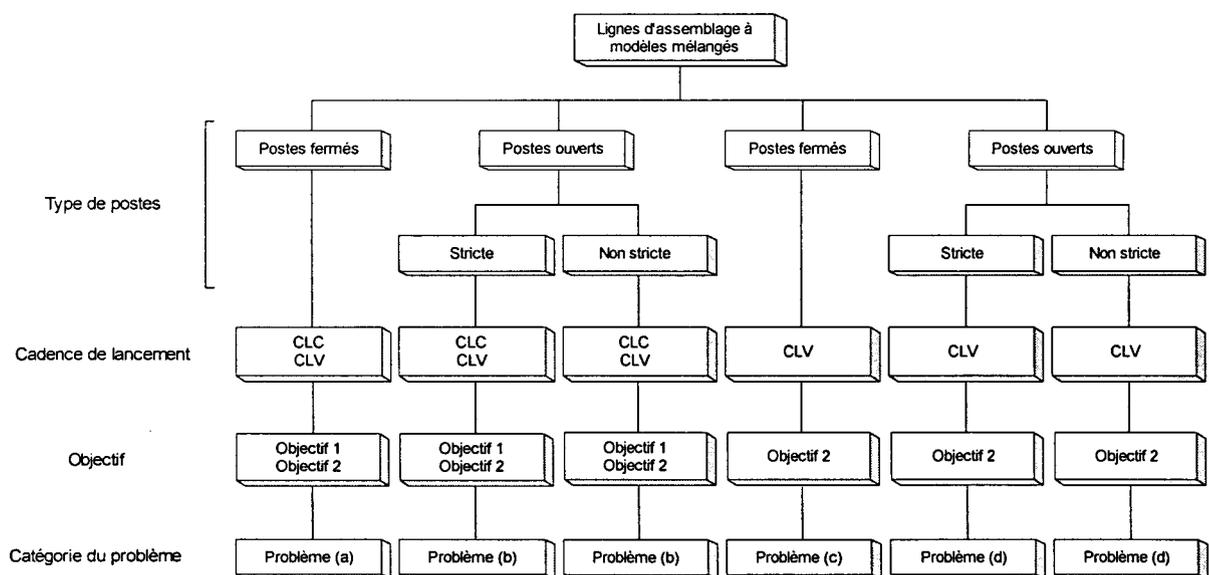


Figure 1.11 - Classification des lignes d'assemblage à modèles mélangés [DAR 78]

A partir de cette classification, Dar-El extrait 4 catégories de problème. Pour chaque catégorie, l'objectif est soit la minimisation de la longueur totale de la ligne (Objectif 1) soit la minimisation du temps total de production

(Objectif 2). Les objectifs sont donc des objectifs de conception de ligne et Dar-El décrit quelles sont les décisions technologiques à prendre dans les différents cas. Les méthodes utilisées sont des extensions du travail de Dar-El et Cother [DAR 75] mieux adaptées aux postes ouverts.

- *Okamura et Yamashina [OKA 79]*

Okamura et Yamashina traitent le problème statique avec comme objectif la minimisation des risques d'arrêt du convoyeur. Cet objectif est similaire à la minimisation de la surcharge de travail maximale par véhicule. Les auteurs proposent une heuristique par affinements successifs dont le but est la minimisation de la distance maximale qu'un opérateur parcourt en dehors de son poste, si cela est permis, pour terminer son travail. La méthode est d'abord appliquée au problème à poste unique. L'heuristique utilise des modifications élémentaires, insertions, permutations et combinaisons des deux, jusqu'à ce que la séquence ne puisse plus être améliorée. Comme cette procédure ne permet pas de sortir des optimums locaux, elle est appliquée à un grand nombre de séquences initiales. Pour les problèmes de petite taille, la méthode par insertion et permutation est comparée à une méthode par séparation et évaluation (« Branch and Bound »). Les auteurs n'indiquent pas les performances de leur algorithme quand le nombre de postes augmente. On peut penser que celles-ci sont fortement dégradées dans le cas multi-postes. De plus leur méthode ne permet pas de garantir l'obtention de bonnes performances moyennes.

- *Monden [MON 83]*

Dans son livre, Monden traite du juste-à-temps chez Toyota. Il souligne qu'il est crucial pour les processus d'alimentation que le taux de consommation de chaque pièce soit aussi constant que possible afin de minimiser l'en-cours. Il est le premier à avoir comme objectif le respect des contraintes juste-à-temps, appliqué ici à la résolution du problème statique. L'algorithme utilisé a pour nom le « Goal Chasing ». A chaque itération, l'algorithme sélectionne le véhicule comportant les pièces dont les taux de consommation sont les plus éloignés des différents taux idéaux. Voici la présentation détaillée de l'algorithme :

Les variables suivantes sont utilisées :

$n_i$  nombre de véhicules de type  $i$  à produire ( $i = 1, \dots, I$ )

$N$  nombre total de véhicules à produire  $N = \sum_{i=1}^I n_i$

$Q_j$  quantité totale de pièces de type  $a_j$  consommée pour produire tous les véhicules  $n_i$ . ( $j = 1, \dots, J$ )

- $X_{jp}$  quantité totale de pièces de type  $a_j$  utilisée pour produire les véhicules placés de la 1<sup>ère</sup> à la  $p$ <sup>ième</sup> position dans la séquence déterminée
- $b_{ij}$  quantité de pièce de type  $a_j$  nécessaire pour produire un véhicule de type  $n_i$

L'algorithme est le suivant :

étape 1  $p = 1, X_{j,p-1} = 0, S_{p-1} = \{1, 2, \dots, I\}$ .

étape 2 Placer à la  $p$ <sup>ième</sup> position de la séquence, le véhicule  $n_i$  qui minimise la distance  $D_k$ . La distance minimale est obtenue grâce aux formules suivantes :

$$D_{pi} = \min_i \{D_{pi}\}, i \in S_{p-1}, \text{ où } D_{pi} = \sqrt{\sum_{j=1}^J \left( \frac{p \cdot n_j}{N} - X_{j,p-1} - b_{ij} \right)^2}.$$

étape 3 Si toutes les véhicules de type  $n_i$  sont inclus dans la séquence, alors :  $S_p = S_{p-1} - \{i\}$ .

S'il reste des véhicules de type  $n_i$  à séquencer alors  $S_p = S_{p-1}$ .

étape 4 Si  $S_p = \emptyset$ , l'algorithme s'arrête.

Si  $S_p \neq \emptyset$ , alors  $X_{jp} = X_{j,p-1} + b_{ij}$  et retour à l'étape 2 avec  $p = p + 1$ .

La séquence étant construite véhicule par véhicule, la minimisation totale n'est pas assurée. L'algorithme étant myope, il tend à donner une très grande priorité aux véhicules pour lesquels la consommation est loin derrière l'objectif. Le résultat est que l'ordonnancement tend à surcharger certains postes. De plus, les véhicules nécessitant un grand nombre de pièces ne peuvent pas être choisis dans la séquence avant les dernières itérations. Ce phénomène, le « cherry picking », est la conséquence directe du fait que la procédure ne 'regarde pas vers l'avenir', qu'elle est myope.

- *Coffman, Hoffman et Weiner [COF 85]*

Les auteurs de cette étude se sont intéressés au problème dynamique. Leur objectif est le re-séquencement des véhicules arrivant de l'atelier de peinture afin de minimiser les violations des contraintes d'espacement de l'atelier de montage. Ces contraintes sont de la forme : 'pas plus de  $k$  véhicules avec option parmi  $n$ '. L'heuristique sert à re-séquencer une douzaine de véhicules après que la séquence originale ait été modifiée par les ateliers amont. La procédure employée est une procédure par construction progressive qui place chaque véhicule arrivant à la première

position disponible et accessible<sup>1</sup>, pour laquelle le véhicule ne viole pas les contraintes d'espacement. L'inconvénient de cette procédure est qu'elle n'assure pas d'avoir toutes les positions de la séquence occupées par un véhicule. En pratique, les trous de la séquence sont supprimés et des violations des contraintes d'espacement peuvent alors se produire sans que l'on puisse estimer la gravité de ces violations.

- *Bird [BIR 86]*

Bird utilise les contraintes d'espacement pour traiter le problème statique. Il ne considère ni les contraintes de groupement ni les contraintes juste-à-temps. Bird utilise un modèle à chaînes de Markov, mais sa modélisation est incomplète et la taille de l'espace d'état devient vite très grand.

- *Parrello, Kabat et Wos [PAR 86] [PAR 88]*

Les auteurs tentent de résoudre le problème statique par l'utilisation d'un système expert. Leur objectif est de minimiser les violations des contraintes d'espacement. Ils ne considèrent ni les contraintes de groupement ni les contraintes juste-à-temps. Pour savoir si la séquence présente des violations des contraintes d'espacement, appelées contraintes de capacité dans l'article, ils introduisent une fonction de pénalité utilisant une fenêtre glissante, appelée intervalle d'intérêt. Si le nombre de véhicules portant un attribut particulier est trop important dans cet intervalle, les véhicules reçoivent une pénalité en fonction de la gravité de la violation de la contrainte d'espacement. Pour chaque position de la séquence, c'est le véhicule qui présente la pénalité la plus faible qui est choisi. Pour atténuer le phénomène de « cherry picking », un facteur de difficulté est introduit afin de favoriser la sélection des véhicules les plus lourds à niveau de pénalité égal. Les auteurs indiquent qu'il a été difficile de développer et de tester le système expert en particulier à cause de la fonction de coût. Dans [PAR 88], Parrello remet en cause le bien-fondé de l'utilisation de cette technique de l'Intelligence Artificielle pour la résolution du problème de séquençement des lignes automobiles.

- *Burns et Daganzo [BUR 87]*

Burns et Daganzo s'intéressent au problème statique et considèrent les contraintes de groupement et d'espacement. Ils donnent des principes analytiques simples permettant de développer une procédure de séquençement des lignes d'assemblage. Dans leur approche, les véhicules sont d'abord groupés en fonction des coûts

---

<sup>1</sup> Au regard de l'architecture du buffer.

de réglage encourus quand les opérateurs ou les machines passent d'un type d'opération à un autre. Le premier regroupement concerne l'opération qui a le coût de réglage le plus élevé. Dans chaque sous-groupe ainsi formé, les véhicules sont à nouveau groupés pour minimiser les coûts de réglage de l'opération qui présente les coûts les plus élevés. Et ainsi de suite tant que les sous-groupes formés ont une taille suffisante pour qu'un lissage efficace puisse être fait, i.e. tant que les contraintes d'espacement ne sont pas violées. Le but de cette étude n'est pas d'établir un algorithme mais plutôt d'identifier les moyens et les stratégies pour réaliser un séquençement plus efficace.

- *Dincbas, Simonis et Van Hentenryck [DIN 88]*

Les auteurs traitent le problème statique par l'utilisation de la Programmation Logique sous Contraintes (PLC). Leur objectif est de bâtir une séquence qui respecte toutes les contraintes de capacité. Le langage utilisé est CHIP car il permet d'utiliser à la fois des contraintes numériques et des contraintes symboliques afin de réduire précocement l'espace de recherche grâce à la propagation de contrainte. La taille des problèmes traités va jusqu'à 200 véhicules (avec seulement 31 modèles différents), et 5 contraintes de capacité. Le temps de calcul est alors de 5 minutes. Mais, comme le problème est NP-complet, il existe des cas où le système ne trouvera pas de solution dans un temps raisonnable. De plus, les contraintes de capacité ne peuvent pas toujours être toutes respectées et il faut alors chercher une bonne solution qui minimise la gravité des violations des contraintes. La méthode proposée par Dincbas est alors incapable de trouver une solution à moins de relaxer une classe entière de contraintes. La solution est alors fort dégradée car dans le cas où une simple violation de contrainte aurait suffi, on est obligé de relaxer toutes les contraintes de la classe. Cette étude est plus une démonstration de l'intérêt des méthodes de PLC appliquées à un cas d'école qu'une tentative de résoudre le problème réel de séquençement des lignes de production automobile.

- *Yano et Bolat [YAN 89]*

Yano et Bolat se sont intéressés au problème statique. Leur objectif est la minimisation des travaux non terminés. Comme l'ont montré Yano et Rachamadugu [YAN 91], cet objectif est sensiblement équivalent à la minimisation des contraintes d'espacement et c'est ce dernier objectif qui sera utilisé. L'algorithme proposé est un algorithme de construction progressive. La myopie caractéristique de ce genre de méthode est ici atténuée par l'utilisation d'une borne inférieure évaluant approximativement le reste de la séquence. Les bornes sont obtenues en cherchant la séquence optimale pour chaque poste de travail pris indépendamment et en additionnant les valeurs de fonction de

coût obtenues. Les résultats obtenus sont bons mais les auteurs notent que des améliorations peuvent être apportées à l'obtention de bornes inférieures plus précises.

- *Miltenburg [MIL 89a]*

Dans son étude, Miltenburg considère le problème de séquençement statique comme la découverte d'un ordonnancement qui minimise la variabilité des taux de consommation des différentes pièces. Son objectif est donc le respect des contraintes juste-à-temps. Il suppose que chaque modèle nécessite le même nombre et approximativement le même ensemble de pièces. En considérant cette simplification, on atteint une consommation constante des pièces en ne considérant que le taux de consommation des produits finis et en essayant de le rendre constant.

Miltenburg développe un premier algorithme mais l'ordonnancement obtenu avec celui-ci peut ne pas être faisable. Un deuxième algorithme est donc créé mais celui-ci nécessite une énumération trop importante et n'est donc pas capable de traiter des problèmes de grande taille. Le troisième algorithme est plus efficace. Il peut utiliser deux heuristiques, toutes deux myopes même si la seconde est une heuristique à deux passes, qui considère donc les deux prochains véhicules à séquençer.

Pour les problèmes de grande taille, les procédures proposées sont basées sur l'hypothèse que la séquence optimale est cyclique. Cette simplification n'est réalisable que s'il existe un entier  $M$  qui divise les différentes demandes des produits finis. Si  $M$  existe, alors le problème peut être résolu en résolvant un problème plus petit et en répétant la séquence  $M$  fois. Plus le nombre de modèles différents est grand et plus la chance que cet entier existe est petite. Et même s'il existe, le plus grand diviseur commun a de fortes chances d'être un petit nombre, ce qui signifie que le problème n'est réduit que par un facteur petit.

Voici la description détaillée des algorithmes 1 et 3 ainsi que de l'heuristique à deux passes :

Algorithme 1

Les variables suivantes sont utilisées :

$n_i$  nombre de véhicules de type  $i$  à produire ( $i = 1, \dots, I$ )

$N$  nombre total de véhicules à produire,  $N = \sum_{i=1}^I n_i$

$r_i$  proportion de véhicules de type  $i$  dans la production totale,  $r_i = n_i/N$

$x_{ip}$  nombre de véhicules de type  $i$  placés dans les positions 1 à  $p$  de la séquence déterminée

La fonction objectif à minimiser est la suivante :

$$\sum_{p=1}^N \sum_{i=1}^I (x_{ip} - pr_i)^2$$

avec

$$\sum_{i=1}^I x_{ip} = p, \quad p = 1, 2, \dots, N \quad \text{et } x_{ip} \text{ est un entier positif ou nul.}$$

Soit le point  $X_p = (x_{1p}, x_{2p}, \dots, x_{Ip}) \in R^I$  où  $x_{ip} = pr_i$ ,  $\sum_{i=1}^I x_{ip} = p$  et où  $R$  est l'ensemble des nombres entiers.

Le problème revient à trouver le point entier  $M_p = (m_{1p}, m_{2p}, \dots, m_{Ip}) \in Z^I$  'le plus proche' du point  $X_p$  où

$\sum_{i=1}^I m_{ip} = p$ , où  $Z$  est l'ensemble des entiers non négatifs et où 'le plus proche' signifie qui minimise

$$\sum_{i=1}^I (m_{ip} - x_{ip})^2.$$

L'algorithme suivant trouve donc le point entier  $M = (m_1, m_2, \dots, m_I) \in Z^I$  le plus proche du point

$X_p = (x_1, x_2, \dots, x_I) \in R^I$  où  $\sum_{i=1}^I m_i = \sum_{i=1}^I x_i = p$  :

*étape 1* Calculer  $p = \sum_{i=1}^I x_i$ ,

*étape 2* Trouver l'entier non négatif  $m_i$  le plus proche de chaque coordonnées  $x_i$ . C'est à dire trouver

$$m_i \text{ tel que } |m_i - x_i| \leq \frac{1}{2}, \quad i = 1, 2, \dots, I.$$

*étape 3* Calculer  $p_m = \sum_{i=1}^I m_i$ .

*étape 4* (a) Si  $p - p_m = 0$ , arrêt. Le point entier le plus proche est  $M = (m_1, m_2, \dots, m_I)$ .

(b) Si  $p - p_m > 0$ , aller à l'étape 5.

(c) Si  $p - p_m < 0$ , aller à l'étape 6.

*étape 5* Trouver la coordonnée  $x_i$  qui a la valeur de  $m_i - x_i$  la plus petite.  $m_i \rightarrow m_i + 1$ . Aller à l'étape 3.

*étape 6* Trouver la coordonnée  $x_i$  qui a la valeur de  $m_i - x_i$  la plus grande.  $m_i \rightarrow m_i - 1$ . Aller à l'étape 3.

L'ordonnancement obtenu avec l'algorithme 1 peut être infaisable quand  $m_{ip} - m_{i,p-1} < 0$ . L'algorithme 3, décrit ci-dessous, permet de remédier à ce problème.

### Algorithme 3

*étape 1* Exécuter l'algorithme 1 et déterminer si l'ordonnancement est réalisable ou non.  
Si l'ordonnancement est réalisable, arrêt. C'est l'ordonnancement optimal.  
Sinon, aller à l'étape 2.

*étape 2* Pour l'ordonnancement infaisable déterminé à l'étape 1, trouver la première position  $l$  pour laquelle  $m_{il} - m_{i,l-1} < 0$ . Soit  $\partial$ , le nombre de véhicules  $i$  pour lesquels  $m_{il} - m_{i,l-1} < 0$ . Commencer le calcul à la position  $l - \partial$  en utilisant l'heuristique 1 ou 2 pour séquençer les positions  $l - \partial, l - \partial + 1, \dots, l + \omega$  ; où  $\omega \geq 0$ .  $l + \omega$  est la première position pour laquelle l'ordonnancement déterminé par l'heuristique correspond à l'ordonnancement déterminé à l'étape 1.

*étape 3* Répéter l'étape 2 pour les positions de la séquence pour lesquelles  $m_{ip} - m_{i,p-1} < 0$ .

Voici la description de l'heuristique 2, qui étant un heuristique à deux passes, limite la 'myopie' de la procédure.

### Heuristique 2

Pour chaque position  $p$  de la séquence :

*étape 1*  $h = 1$ .

*étape 2* Placer un véhicule de type  $h$  à la position  $p$ . Calculer la variation  $V_{1h}$  pour la position  $p$  considérée,

$$V_{1h} = (x_{1,p-1} - pr_i)^2 + (x_{2,p-1} - pr_i)^2 + \dots + (x_{h,p-1} + 1 - pr_h)^2 + (x_{i,p-1} - pr_i)^2 + \dots + (x_{l,p} - pr_l)^2$$

*étape 3* Séquençer le véhicule  $i$  qui à la valeur de  $x_{ip} - (p + 1)r_i$  la plus basse pour la position  $p + 1$ .

Calculer la variation  $V_{2h}$  pour la position  $p + 1$ . Calculer  $V_h = V_{1h} + V_{2h}$ .

*étape 4* Incrémenter  $h$ .  $h \rightarrow h + 1$ .

Si  $h > I$ , aller à l'étape 5.

Sinon, aller à l'étape 2

*étape 5* Séquençer le véhicule  $h$  qui la valeur de  $V_h$  la plus faible.

- *Miltenburg et Sinnamon [MIL 89b]*

Cette étude est une évolution du travail de Miltenburg [MIL 89a]. L'objectif est toujours de garder un taux de consommation des pièces constant dans le cadre du problème statique. Seules les contraintes juste-à-temps sont donc considérées. Les auteurs développent deux heuristiques proches de celles développées par Miltenburg [MIL 89a] et qui sont donc toutes deux myopes. Ils montrent que le « Goal Chasing » est un cas particulier de la première heuristique. Cette fois et contrairement à Miltenburg [MIL 89a], les auteurs ne font pas la simplification considérant que tous les produits finis nécessitent le même nombre et le même ensemble de pièces. Ils considèrent explicitement chaque niveau : produits finis, sous-ensembles, composants et matières premières. La taille du problème est alors importante mais ils contournent le problème en introduisant la séquence cyclique. Ils concluent sur la nécessité de considérer également le lissage de la charge des postes de travail et les contraintes de groupement.

- *Miltenburg, Steiner et Yeomans [MIL 90]*

Miltenburg, associé à Steiner et Yeomans, poursuit le même objectif que dans ses articles précédents. La méthode de résolution est toutefois différente puisque c'est la programmation dynamique qui est utilisée ici. Cette méthode permet de résoudre de façon optimale les problèmes de séquençement juste-à-temps de petite taille. Pour les problèmes de taille industrielle, les auteurs réutilisent les heuristiques développées dans [MIL 89a] et [MIL 89b].

- *Miltenburg et Goldstein [MIL 91]*

Cet article s'intéresse au problème statique en considérant cette fois simultanément l'objectif du lissage de la charge et du maintien du taux de consommation des pièces (« *loading goal* » et « *usage goal* »), le second but étant considéré comme le plus important. Le problème est appelé problème joint (« *joint problem* ») par les auteurs car il tient compte à la fois de l'objectif juste-à-temps et de l'objectif de lissage. Un modèle considérant les deux objectifs est développé. Les auteurs notent que les problèmes de petite taille peuvent être résolus en utilisant la

programmation dynamique ou la relaxation lagrangienne mais les algorithmes utilisés pour résoudre les problèmes de grande taille sont les deux heuristiques développées par Miltenburg dans [MIL 89a] et [MIL 89b].

- *Chew, David, Nguyen et Tourbier [CHE 91]*

Chew et al. présentent une approche réaliste du problème statique. Ils considèrent à la fois, les contraintes de groupement, les contraintes de ratio, les contraintes juste-à-temps ainsi que d'autres contraintes de type : contraintes de calendrier ou contraintes de lancement. Leur objectif est de bâtir l'ordonnancement d'une semaine de production. L'algorithme utilisé est le recuit simulé. La procédure est composée de trois étapes : la distribution régulière des véhicules par rapport aux contraintes juste-à-temps, le séquençement des véhicules respectant les contraintes de ratio, le groupement des véhicules sans détérioration de la solution vis-à-vis des autres contraintes. Les auteurs indiquent que les résultats obtenus sont très bons et que des efforts doivent être portés sur le ré-ordonnancement.

- *Yano et Rachamadugu [YAN 91]*

Yano et Rachamadugu présentent une heuristique pour le problème statique avec comme objectif la minimisation des travaux non terminés. C'est une procédure de construction progressive. Elle peut être vue comme un « Branch and Bound » heuristique à un niveau où le noeud retenu est celui qui a la plus petite borne inférieure. Comme dans l'étude de Yano et Bolat [YAN 89], la borne est obtenue en cherchant la séquence optimale pour chaque poste de travail pris indépendamment et en additionnant les valeurs de fonction objectifs obtenues. Les auteurs ont obtenu d'un constructeur automobile les temps opératoires et les règles d'espacement à partir desquels ils ont estimé les longueurs des postes de travail. Ils notent que certains processus amont ne permettent pas de maintenir la séquence tout au long de la ligne et qu'il est nécessaire d'intercaler des buffers entre les ateliers, c'est la définition du problème dynamique.

- *Sumichrast, Russell et Taylor [SUM 92]*

Sumichrast et al. présentent une analyse comparative de plusieurs procédures de séquençement des lignes d'assemblage à modèles mélangés. Ces procédures appliquées au problème statique sont : deux versions des heuristiques de « Goal Chasing » de Toyota, le troisième algorithme de Miltenburg [MIL 89a], une méthode de lissage des temps opératoires et une procédure de séquençement par lots. Des deux procédures originales (la méthode de lissage des temps et la procédure de séquençement par lots), seule la première présente un intérêt car la production par lots n'est évidemment pas adaptée à une production de type automobile. La procédure de lissage des

temps opératoires est une méthode par construction progressive dont la forme est proche du « Goal Chasing » mais dont l'objectif est de choisir le véhicule qui minimise les variations des temps opératoires des différents postes. Ces procédures sont comparées grâce à 4 indicateurs : le travail non terminé, l'inactivité, le temps passé dans leur poste par les opérateurs et la variabilité du taux de consommation des pièces. Les auteurs concluent que la méthode de lissage des temps opératoires est la plus efficace si l'objectif est d'avoir une bonne utilisation de la main d'œuvre. Si le but est d'avoir un taux de consommation des pièces constant, l'algorithme de Miltenburg doit être choisi.

- *Inman et Bulfin [INM 92]*

L'objectif de la méthode de séquençement présentée dans cet article est de maintenir un taux de consommation des pièces constant. Cet objectif est atteint en maintenant un intervalle constant entre les pièces de même type. Les auteurs combinent ainsi les contraintes juste-à-temps et les contraintes d'espace. Leur algorithme, qualifié de 'rapide et sale', classe les véhicules en fonction de leurs dates de fin idéales et construit ainsi la séquence. Les performances de cet algorithme sont meilleures que les performances des algorithmes de Miltenburg [MIL 89a] bien que le temps de calcul soit très réduit. Inman et Bulfin notent que la simplification apportée par l'utilisation de la séquence cyclique est rarement possible en pratique à cause du nombre de produits différents.

- *Bard, Dar-El et Shtub [BAR 92]*

Bard et al. donnent des approches de résolution du problème statique pour six modèles de ligne d'assemblage à modèles mélangés. Ces modèles dépendent des contraintes physiques, techniques et ergonomiques de la ligne, à savoir : la cadence de lancement (CLC, CLV), le mouvement de la ligne (synchrone ou asynchrone), le type de poste de travail (ouvert ou fermé), le position de départ des opérateurs dans leur poste et l'objectif du séquençement (minimiser la longueur totale de la ligne ou minimiser le temps total de production). Pour ces différents modèles, les auteurs exposent et définissent les différentes contraintes et proposent des approches de résolution par programmation linéaire. Bard et al. utilisent la séquence cyclique, baptisée ici ensemble minimal de pièces (« *Minimal Part Set* », MPS), afin de simplifier les calculs.

- *Cakir et Inman [CAK 93]*

Cakir et Inman modifient la méthode de « Goal Chasing » développée par Toyota, pour l'appliquer au séquençement de produits dont les nomenclatures ne contiennent pas uniquement des 0 et des 1, comme c'est le cas pour l'assemblage automobile. En effet, un type de véhicule utilise ou n'utilise pas un composant, que ce soit un

moteur ou un ensemble de quatre roues. Les pièces ne sont pas considérées individuellement mais sont regroupées pour former des ensembles. D'autres types de produits tels que les cartes électroniques peuvent comporter, par exemple, plusieurs microprocesseurs ou plusieurs résistances. L'objectif des auteurs de cet article est donc de modifier l'algorithme du « Goal Chasing » pour le rendre applicable à ce type de produit.

- *Fong-Yuen et Liping [FON 93]*

Cette étude reprend les travaux de Miltenburg et présente un algorithme de séquençement des lignes d'assemblage fonctionnant en juste-à-temps, plus rapide et plus simple à mettre en œuvre que ceux de Miltenburg. La qualité des résultats obtenus avec cet algorithme est comparable avec celle des résultats obtenus par le troisième algorithme de Miltenburg utilisant l'heuristique 2.

- *Kubiak et Sethi [KUB 94]*

Kubiak et Sethi développent un algorithme pour traiter les problèmes de séquençement des lignes de production juste-à-temps. Comme Miltenburg [MIL 89a], ils ne considèrent que le niveau de produits finis. Leur algorithme s'exécute dans un temps polynomial, fonction du nombre total de produits fabriqués. La principale contribution de cette étude est de montrer que quand la fonction de coût utilisent des pénalités (reçues pour des écarts avec la distribution de véhicules la plus régulière possible) non négatives, symétriques et convexes, le problème traité peut être réduit à un problème d'affectation. Le problème ainsi transformé devient un problème de Recherche Opérationnelle classique et très efficacement résolu.

- *Bard, Shtub et Joshi [BAR 94]*

Le but de cet article est de proposer une méthode de résolution du problème de séquençement dans le cas où l'objectif est double : la minimisation de la longueur de ligne et la minimisation de la variabilité des taux de consommation des pièces. Cette étude est une évolution du travail de Bard, Dar-El et Shtub [BAR 92]. Une formulation bi-critères est utilisée pour examiner le compromis entre la longueur de la ligne et le taux de consommation des pièces. Le problème est résolu grâce à la combinaison de plusieurs heuristiques (descente stochastique, recherche tabou) et de Branch and Bound. Les auteurs n'utilisent pas de séquence cyclique car elle est peu applicable en pratique. Le Branch and Bound est utilisé pour traiter les problèmes de petite taille. Pour les problèmes dits de grande taille, la recherche Tabou se révèle plus efficace que la descente stochastique mais la taille des problèmes abordés reste modeste.

- *Bolat, Savsar et Al-Fawzan [BOL 94]*

Bolat et al. s'intéressent à la résolution du problème de séquençement statique. La procédure développée a pour objectif la minimisation des coûts de réglage et des coûts du travail non terminé dans le cas général où les postes de travail sont soumis soit à des contraintes de groupement, soit à des contraintes de capacité, soit les deux. Les procédures employées sont un algorithme Branch and Bound pour traiter les problèmes de taille réduite, un algorithme de recherche par faisceau (i.e. Branch and Bound filtré) et un algorithme s'intéressant au poste goulot. Ce dernier est un algorithme de construction progressive qui bâtit la meilleure séquence pour le poste de travail le plus chargé. Ces méthodes sont évaluées sur des jeux de données réalistes et c'est l'algorithme de recherche par faisceau qui obtient les meilleures performances, le seuil de filtrage étant fixé à 2. Les auteurs indiquent que leur méthode est facilement transposable au cas des lignes cadencées comportant des stocks entre les postes de travail.

- *Ng et Mak [NGW 94]*

Dans cet article traitant du problème statique, Ng et Mak présentent un algorithme Branch and Bound développé pour déterminer les séquences sur des lignes d'assemblage à modèles mélangés qui fabriquent des produits ayant des besoins en pièces similaires. Leur objectif est de bâtir la séquence optimale. Le temps de calcul dépendant de la finesse des bornes, les auteurs ont porté une grande attention à la génération de celles-ci. La borne inférieure est obtenue par utilisation d'une méthode de relaxation lagrangienne. Les performances de l'algorithme de Branch and Bound sont comparées à celles des algorithmes de Miltenburg [MIL 89a]. Le premier algorithme de Miltenburg est le plus rapide mais l'algorithme développé par Ng et Mak est plus efficace. Même si les bornes inférieure et supérieure sont fines, on peut toutefois s'interroger sur les performances de cette méthode sur des jeux de données de taille réelle.

- *Guerre-Chaley [GUE 95a][GUE 95b]*

Les études de Guerre-Chaley concerne le re-séquencement des véhicules en entrée de l'atelier de peinture et le re-séquencement des véhicules en entrée de l'atelier de montage. Les contraintes prises en compte sont donc des contraintes de groupement dans le premier cas et des contraintes d'espacement dans le second. La méthode de résolution employée est un algorithme de construction progressive. Les temps de stockage sont pénalisés afin que les véhicules ne restent pas trop longtemps dans le buffer. Une étude sur l'influence de la taille des rafales sur les performances de l'algorithme en montage est également fournie.

- Comby [COM 95][COM 96a][COM 96b]

Dans sa thèse [COM 96b], Comby s'intéresse au séquençement statique des camions sur les lignes d'assemblage de Renault VI. Les camions sont des produits personnalisés puisque chaque client en choisit les composantes. Les objectifs de la procédure de séquençement est de respecter les règles de séquençement et de lisser la charge de travail des postes de la ligne. Les méthodes d'optimisation utilisées sont des méthodes par affinements successifs (descente stochastique et recuit simulé) et une méthode par construction progressive.

### 1.5.3 Synthèse et discussion

Après cette étude bibliographique, 3 types d'objectifs peuvent être identifiés :

- la minimisation de la longueur de la ligne ou du temps total de production,
- la minimisation des pertes d'efficacité,
- la minimisation de la variabilité du taux de consommation des pièces.

Parfois, ces objectifs peuvent être combinés et traités simultanément. Les articles tels que [WES 64][DAR 75][DAR 78][BAR 92] considèrent que le temps de cycle et les longueurs des différents postes de travail sont des variables de décision. Ces études sont donc plutôt destinées aux concepteurs des lignes de production. La plupart des études s'intéressent à augmenter l'efficacité de la main d'œuvre. Les objectifs diffèrent : minimisation des travaux non terminés, minimisation des inactivités, minimisation des surcharges de travail, minimisation des manques de travail. Les distinctions entre ces différents objectifs n'apparaissent pas toujours clairement. Par exemple, la minimisation des travaux non terminés est un problème équivalent à la minimisation des temps d'inactivité<sup>1</sup>. Ces pertes d'efficacité sont minimisées soit en modélisant les différents postes de la ligne soit en utilisant les contraintes d'espacement. Ces deux<sup>2</sup> approches seront étudiées et comparées dans le deuxième chapitre. Depuis le livre de Monden [MON 83] et la découverte des systèmes de production au plus juste de Toyota, de nombreuses études ont pour objectif principal la minimisation de la variabilité du taux de consommation des pièces. Voici la signification des diverses abréviations utilisées dans le tableau récapitulatif :

---

<sup>1</sup> Cela a été prouvé formellement [YAN 89].

Type du problème	S	problème statique, ou séquençement prévisionnel
	D	problème dynamique, ou re-séquencement
Contraintes considérées	G	contraintes de groupement
	L	contraintes de lissage de la charge
	E	contraintes d'espacement
	J	contraintes juste-à-temps
Séquence cyclique (Seq. Cyc.)	O	séquence cyclique utilisée
	N	pas de séquence cyclique
	O/N	séquence cyclique considérée mais remise en cause

Tableau 1-2 - Signification des différentes abréviations

La taille des problèmes traités est également donnée selon le format suivant :

[nombre de véhicules, nombre de modèles différents, nombre de postes ou de critères considérés]

Dans le cas où un de ces paramètres n'est pas pertinent pour le problème traité, il est remplacé par un tiret.

Quand il n'est pas mentionné dans l'article, il est remplacé par un point d'interrogation.

Le Tableau 1-3 récapitule les objectifs des différents articles précédemment cités et indique quelles sont les méthodes de résolution employées.

Article	Type du problème	Objectif	Contraintes considérées	Procédures employées	Taille des pbs traités	Séq. Cyc.
[WES 64]	S	minimiser les inactivités et les surcharges de travail	L	construction progressive	[?,5,6]	O
[THO 67]	S	minimiser toutes les pertes d'efficacité	L	construction progressive	[?,6,19]	O
[MAC 73]	S	minimiser toutes les pertes d'efficacité et éviter le cherry picking	L	construction progressive	[?,15,10]	O
[DAR 75]	S	minimiser la longueur de la ligne tout en évitant les pertes d'efficacité	L	construction progressive	[?,?,?]	N
[DAR 77]	S	minimiser la longueur de la ligne tout en évitant les temps d'inactivité	L	programmation en nombres entiers	[?;?;?]	O
[DAR 78]	S	minimiser la longueur de la ligne ou le temps total de production	L	construction progressive	[?,?,?]	N
[OKA 79]	S	minimiser le risque d'arrêt du convoyeur	L	méthodes par affinements successifs	[100,100,30]	N
[MON 83]	S	minimiser la variabilité du taux de consommation des pièces.	J	construction progressive	[?,?,-]	O
[COF 85]	D	minimiser le nombre des violations des contraintes d'espacement	E	construction progressive	[?,?,?]	N
[BIR 86]	S	minimiser le nombre des violations des contraintes d'espacement	E	modèle à chaînes de Markov	[?,?,?]	N
[PAR 86]	S	minimiser la gravité des violations des contraintes d'espacement	E	système expert et construction progressive	[?,?,?]	N
[BUR 87]	S	minimiser les coûts de réglage et les violations des contraintes d'espacement	G,E	-	[-,-,-]	N
[DIN 88]	S	respecter les contraintes d'espacement	E	programmation logique sous contraintes	[200,31,5]	N
[PAR 88]	S	minimiser la gravité des violations des contraintes d'espacement	E	système expert et construction progressive	[?,?,?]	N
[YAN 89]	S	minimiser les travaux non terminés	E	construction progressive et Branch and Bound tronqué	[1000,1000,12]	N
[MIL 89a]	S	minimiser la variabilité du taux de consommation des pièces	J	construction progressive	[?,?,-]	O
[MIL 89b]	S	minimiser la variabilité du taux de consommation des pièces	J	construction progressive	[?,?,-]	O
[MIL 90]	S	minimiser la variabilité du taux de consommation des pièces	J	programmation dynamique	[?,6,?]	O
[MIL 91]	S	minimiser la variabilité du taux de consommation des pièces et lisser la charge	J,L	construction progressive	[5000,8,?]	O

Article	Type du problème	Objectif	Contraintes considérées	Procédures employées	Taille des pbs traités	Séq. Cyc.
[CHE 91]	S	minimiser les réglages, les violations des contraintes d'espacement et la variabilité du taux de consommation	G,E,J	recuit simulé	[7500,7500,100]	N
[YAN 91]	S	minimiser les travaux non terminés	L	construction progressive	[1000,1000,12]	N
[SUM 92]	S	minimiser la variabilité du taux de consommation des pièces et lisser les temps opératoires	L,J	construction progressive	[100,5,10]	N
[INM 92]	S	minimiser la variabilité du taux de consommation des pièces	J	classement par date due	[1000,10,-]	O/N
[BAR 92]	S	minimiser la longueur de la ligne ou le temps total de production	L	programmation linéaire	[25,6,12]	O
[CAK 93]	S	minimiser la variabilité du taux de consommation des pièces	J	construction progressive	[-,-,-]	O
[FON 93]	S	minimiser la variabilité du taux de consommation des pièces	J	construction progressive	[4000,22,-]	
[KUB 94]	S	minimiser la variabilité du taux de consommation des pièces	J	affectation	[?,?,?]	
[BAR 94]	S	minimiser la longueur de la ligne et la variabilité du taux de consommation des pièces	L,J	descente stochastique, recherche tabou, Branch and Bound	[50,10,10]	O/N
[BOL 94]	S	minimiser les coûts de réglage et les travaux non terminés	G,L	Branch and Bound, recherche par faisceau, construction progressive	[1000,1000,13]	N
[NGW 94]	S	minimiser la variabilité du taux de consommation des pièces	J	Branch and Bound	[1500,9,-]	N
[GUE 95]	D	minimiser les changements de teinte, les violations des contraintes d'espacement et les temps de stockage	G,E	Construction progressive, recuit simulé	[?,?,10]	N
[COM 96]	S	minimiser les violations des contraintes d'espacement et lisser la charge	J,G,L,E	Recuit simulé, descente stochastique, construction progressive	[?,?,?]	N

Tableau 1-3 - Récapitulatif de la littérature existante

On peut noter que seuls deux articles traitent du problème dynamique et que de nombreuses études utilisent la séquence cyclique afin de réduire la difficulté du problème traité. Comme nous l'avons vu, cette simplification est rarement réalisable en pratique.

Les différentes méthodes employées sont les suivantes : construction progressive (14 fois), méthodes par affinements successifs (5), Branch and Bound (3), Système Expert (2), Programmation Linéaire (2), Branch and Bound tronqué (1), Recherche par faisceau (1), Programmation Logique sous Contraintes (1), Programmation dynamique (1), algorithmes de tri (1), algorithme d'affectation (1). Ces différentes méthodes seront présentées brièvement dans le troisième chapitre et leur adéquation avec le problème traité sera abordée.

### 1.5.4 Comparaison avec d'autres problèmes d'ordonnement

Une ligne de production automobile est composée d'un séquençement linéaire des postes de travail. Il s'agit d'un flow-shop sans attente. La différence entre un flow-shop statique de base et un flow-shop sans attente est que dans le flow-shop sans attente, il n'y a pas de stocks devant les postes. Les opérations s'effectuent donc sans temps d'immobilisation [GOT 93]. Le problème d'ordonnement d'un flow-shop sans attente est équivalent au problème du voyageur de commerce<sup>1</sup>. De nombreuses procédures d'optimisation combinatoire et de nombreuses heuristiques ont été développées pour résoudre ce problème NP-difficile. La plupart sont des heuristiques par construction progressive ou par améliorations successives.

Le problème de séquençement d'une ligne d'assemblage à modèles mélangés et le problème standard de séquençement du flow-shop sans attente diffèrent en deux points :

- le problème de séquençement du flow-shop consiste à minimiser le temps total de production alors que l'objectif du séquençement d'une ligne d'assemblage à modèles mélangés est de minimiser des coûts de réglage, des coûts de stockage des composants ou des coûts de main d'œuvre.
- dans le cas de la ligne d'assemblage à modèles mélangés, les contraintes associées au système de transport des produits sont incluses. La cadence de lancement est généralement constante et les véhicules sont fixés au convoyeur. Traiter le problème de séquençement d'une ligne de production automobile comme un flow-shop sans attente implique que la cadence de lancement variable (CLV) soit utilisée, ce qui est très rare en pratique.

---

<sup>1</sup> T.S.P. : Traveling Salesman Problem.

Il faut en plus noter qu'une ligne de production automobile est un flow-shop sans attente de très grande taille. On peut également constater que les problèmes (c) et (d) de Dar-El [DAR 78] pour lesquels la CLV est utilisée et pour lesquels les produits peuvent être retirés du système de convoyage est typiquement un problème de flow-shop.

## 1.6 Conclusion

La présentation des lignes de production automobile permet de constater que le problème de séquençement des véhicules est un problème complexe. La compétition accrue entre les différents constructeurs et l'émergence de nouvelles méthodes de production ont pour conséquence l'augmentation de la diversité des modèles construits. Cette diversité rend difficile la détermination de l'ordre dans lequel les différents modèles doivent être produits. Les contraintes à prendre en compte sont nombreuses et parfois antagonistes. Deux types de problèmes sont apparus : le problème statique et le problème dynamique. Le problème statique concerne la construction de séquences qui réalisent un compromis entre les contraintes des différents ateliers de la ligne de production. Le problème dynamique, quant à lui, concerne le ré-ordonnancement des véhicules afin que la séquence respecte les contraintes spécifiques d'un atelier, l'atelier de montage le plus souvent.

Quelle que soit la nature du problème, statique ou dynamique, les objectifs du séquençement sont nombreux : lissage de la charge de travail des opérateurs, minimisation de la variabilité du taux de consommation des différentes pièces utilisées, minimisation des coûts de réglage. De nombreuses études ont été publiées ces dernières années mais la taille des problèmes abordés est souvent peu réaliste et le problème dynamique n'a que rarement été abordé.



## **CHAPITRE 2**

---

# **DÉFINITION ET FORMALISATION DU PROBLÈME DE RE-SÉQUENCEMENT**



# Chapitre 2

## Définition et formalisation du problème de re-séquencement

---

### 2.1 Introduction

Le problème de séquencement d'une ligne d'assemblage à modèles mélangés dépend énormément du contexte dans lequel on se place. Les caractéristiques physiques de la ligne considérée et les objectifs du séquencement doivent être précisés avant toute tentative de résolution. L'objet de ce chapitre est de clairement définir le problème industriel qui nous a intéressé. Une fois le contexte de l'étude précisé et les objectifs définis, deux méthodes de modélisation du flux des véhicules de l'atelier de montage sont présentées : une méthode de modélisation de la charge effective des postes de travail et une méthode de modélisation par espacement entre les options présentes sur les véhicules. Ces deux approches de modélisations sont bien évidemment appréhendées dans l'optique des objectifs que l'on cherche à atteindre et en connaissant les causes et les conséquences d'un bon ou d'un mauvais séquencement. Les deux approches sont décrites et comparées et le choix de modélisation réalisé est commenté. Le principe de la fonction de coût résultant de cette modélisation est ensuite décrit. Une étude de la complexité du problème conclut ce chapitre, les deux types de buffers de re-séquencement étant comparés.

### 2.2 Définition du problème étudié et objectifs du re-séquencement

#### 2.2.1 Définition du problème étudié

Le problème que nous étudions concerne le re-séquencement du flux des véhicules arrivant de l'atelier de peinture. L'ordre dans lequel les véhicules se présentent n'étant pas compatible avec les différentes contraintes de l'atelier de montage, les véhicules sont placés dans un buffer afin d'adapter au mieux l'ordonnancement. Ce problème de re-séquencement auquel nous nous intéressons a été baptisé problème dynamique dans le premier

chapitre. Les deux architectures possibles pour le buffer de re-séquencement sont considérées dans cette étude : l'autostockeur et l'architecture à tiroirs. La ligne de fabrication considérée est une ligne de production automobile classique : la cadence de lancement des véhicules au montage est constante (CLC) et la ligne est composée de plus d'une centaine de postes de travail. Les contraintes considérées sont les contraintes principales associées à l'atelier de montage : les contraintes de lissage de la charge (ou d'espacement) et les contraintes juste-à-temps.

En résumé, le problème auquel nous nous intéressons concerne le re-séquencement des véhicules présents dans le buffer en entrée de l'atelier de montage. Le but de ce re-séquencement est que les différentes contraintes de l'atelier de montage soient respectées au mieux. Avant de définir plus précisément les objectifs de ce ré-ordonnement, il est important de connaître quelles sont les caractéristiques qui font qu'un ordonnancement est bon ou mauvais et quelles en sont les conséquences.

## 2.2.2 Causes d'un mauvais re-séquencement

Il est plus facile de reconnaître les faiblesses d'un re-séquencement que ses qualités. C'est pourquoi nous étudierons dans un premier temps les causes de médiocrité d'un re-séquencement. Globalement, quatre causes rendant un ordonnancement mauvais peuvent être identifiées :

- *la qualité de l'ensemble des véhicules à re-séquencez*

Si à un instant donné, l'ensemble des véhicules présents dans le buffer de re-séquencement est « très contraint », c'est-à-dire si la charge de travail moyenne par véhicule est importante sur un poste en particulier (poste goulot) ou sur l'ensemble de la ligne, le ré-ordonnement est délicat à réaliser. En effet, comme les véhicules présents dans le buffer ne représentent qu'une petite partie de la production journalière, il y a de fortes probabilités que certains types de véhicules soient par moment en surnombre ou en sous-nombre par rapport à la moyenne de la journée. Il est donc clair que la richesse ou la pauvreté (en terme d'options présentes) des véhicules du buffer influe directement sur la qualité de la solution. Si le nombre de véhicules lourds<sup>1</sup> est supérieur à la quantité moyenne, le risque de surcharges et de travaux non terminés augmente. A

---

<sup>1</sup> Un véhicule lourd est un véhicule qui présente une ou plusieurs options particulières susceptibles de créer des surcharges de travail sur un ou plusieurs postes. Ces options sont appelées options lourdes.

l'inverse, si la majorité des véhicules du buffer sont des véhicules légers<sup>1</sup>, l'ordonnancement risque de générer des inactivités ou des manques de travail. Concernant ce point, nous verrons, dans la quatrième partie de ce chapitre que la nature et la taille du buffer de re-séquencement constituent des éléments importants.

- *l'équilibrage*

Si l'affectation de la main d'œuvre aux postes de travail, réalisée par la procédure d'équilibrage, est mal adaptée au flux des véhicules, les opérateurs peuvent être en sureffectif ou à l'inverse en sous-effectif à certains postes. Si l'adéquation entre l'affectation des opérateurs et le flux des véhicules est très mauvaise, un rééquilibrage de la ligne est nécessaire. Notons toutefois que c'est souvent à l'ordonnancement de s'adapter à l'affectation de la main d'œuvre plutôt que l'inverse puisque la procédure d'équilibrage est une procédure dont la périodicité est plus grande.

- *la méthode d'ordonnancement*

Il est évident que si l'algorithme utilisé est peu performant ou mal adapté au problème, le re-séquencement réalisé ne sera pas de bonne qualité.

- *le manque de réactivité face aux aléas*

Des aléas tels que les interdictions de lancement, les limitations ou les pannes de travées dans le cas de l'autostockeur peuvent rendre l'ordonnancement initial mal adapté à la nouvelle situation et aux nouvelles contraintes de production.

### 2.2.3 Conséquences d'un mauvais re-séquencement

Les causes d'un mauvais séquencement étant désormais identifiées, voyons quelles en sont les conséquences. On peut en identifier trois, qui correspondent aux violations des différentes contraintes exposées dans le premier chapitre :

- *Baisse de la qualité de production*

Si la qualité de l'ordonnancement est médiocre, le lissage des charges sur les différents postes de travail n'est pas correctement assuré et des pertes d'efficacité apparaissent. Le nombre de travaux non terminés ou de surcharges de travail augmentent et créent une augmentation du nombre de retouches à effectuer. Les

---

<sup>1</sup> Un véhicule léger est un véhicule ne possédant pas d'option lourde.

temps d'inactivité des opérateurs et les manques de travail qui apparaissent dans les postes ouverts contribuent à la diminution du niveau de qualité globale.

- *Problèmes d'approvisionnement*

Un mauvais re-séquencement peut conduire à un non-respect des contraintes juste-à-temps. Comme les approvisionnements fonctionnent en juste-à-temps, il faut que les taux de consommation des différentes pièces soient les plus réguliers possible. Si, à un moment donné, trop de véhicules nécessitant la même option sont lancés consécutivement en production, les pièces détachées nécessaires au montage de cette option ne seront pas disponibles en quantité suffisante. A l'inverse, les autres pièces momentanément sous-utilisées devront être stockées en bord de ligne.

- *Problèmes d'ancienneté - « Cherry picking »*

Si l'ordonnancement ne favorise pas le lancement en fabrication des véhicules lourds, ceux-ci risquent de rester longtemps dans le buffer de re-séquencement. Ce phénomène, déjà évoqué dans le premier chapitre, est appelé pour des raisons historiques : le « cherry picking » [PAR 86]. La méthode de re-séquencement doit éviter cette accumulation des véhicules optionnels dans les moyens de stockage intermédiaires. Des pénalités peuvent également être accordées à l'ancienneté des véhicules du stock. Une solution similaire consiste à affecter à chaque véhicule une date de lancement en production au plus tard et à pénaliser toute violation de cette date.

- *Détérioration du climat social*

Quand le flux des véhicules n'est pas bien adapté à la main d'œuvre affectée sur la ligne, certains postes se trouvent en surcharge et les opérateurs en concluent qu'ils sont en sous-effectif. Le climat dans lequel s'effectue le travail et la confiance du personnel vis-à-vis de l'encadrement peuvent s'en trouver détériorés.

## 2.2.4 Objectifs du re-séquencement

Maintenant que les causes et les conséquences d'un mauvais re-séquencement sont connues et que le type de ligne de production considérée est défini, il est possible de spécifier les objectifs de notre procédure de re-séquencement.

Notre objectif principal est de lisser la charge des postes de travail le long de la ligne de montage afin d'avoir une bonne utilisation de la main d'œuvre. Le but est de donner suffisamment de temps aux opérateurs pour qu'ils puissent terminer leurs tâches et de diminuer les inactivités afin de :

- réduire le nombre de retouches nécessaires,
- faire baisser les coûts de production,
- augmenter la qualité.

Le lissage de la charge permet de limiter le nombre et la gravité des pertes d'efficacité et notamment des travaux non terminés et des surcharges de travail. Rappelons que le travail non terminé est la perte d'efficacité qui apparaît dans les postes fermés quand l'opérateur est obligé d'arrêter son travail car il n'a pas le temps d'achever sa tâche avant que le véhicule ne franchisse la limite aval du poste. La surcharge de travail apparaît dans les postes ouverts quand l'opérateur dépasse la limite aval de son poste pour terminer sa tâche. Il est à noter que la minimisation des travaux non terminés contribue également à minimiser les inactivités, synonymes, elles aussi, de problèmes de qualité.

Le second objectif est de respecter les contraintes juste-à-temps afin de garantir un taux de consommation des différentes pièces le plus régulier possible pour réduire les problèmes d'approvisionnement et les stocks en ligne des différentes composants.

En résumé, les deux objectifs de notre procédure de re-séquencement sont :

- (1) lisser la charge de travail des différents postes,
- (2) minimiser les variations du taux de consommation des pièces.

### **2.2.5 Prise en compte de l'aspect dynamique**

Les aspects dynamiques et temps réel du problème de re-séquencement en entrée montage ne doivent pas être perdus de vue. Deux aspects particuliers du problème, les interdicts de montage et le roulement continu du stock ont des conséquences directes sur les objectifs de la procédure de re-séquencement.

### 2.2.5.1 Les interdits de montage

La procédure de re-séquencement doit être réactive en ce qui concerne les interdits de montage (cf. Chapitre 1). Un interdit de montage<sup>1</sup> peut remettre complètement en cause, à tout moment, la séquence établie. Pour une réactivité maximale, il est impossible de garantir une longue séquence figée en entrée de la ligne de montage. Suite à un interdit, il doit être possible de recalculer les prochains véhicules à lancer en montage en un minimum de temps. De même, quand un interdit est levé, il peut être également nécessaire de recalculer la séquence d'entrée. En effet, les véhicules possédant des options touchées par cet interdit ont vraisemblablement été accumulés dans le stock de re-séquencement. Il est alors nécessaire d'engager ces véhicules afin que les délais de production soient respectés<sup>2</sup> et que la composition du stock redevienne plus représentative du flux global.

### 2.2.5.2 Le roulement de stock

A cause des engagements en ligne<sup>3</sup> et des arrivées de véhicules de l'atelier de peinture, on observe un roulement continu du stock. Les données du problème changent constamment et cela a des conséquences directes sur les objectifs de la procédure de re-séquencement. En effet, si l'on suppose que l'on a établi une séquence contenant les  $L$  prochains véhicules à engager en montage, il est possible qu'un véhicule arrivant de l'atelier de peinture soit tel qu'il permette d'améliorer sensiblement la qualité de la séquence. Ce scénario n'est possible que dans le cas où il n'y a pas d'autres véhicules dans le buffer de re-séquencement possédant les mêmes options que celles du véhicule arrivant<sup>4</sup>.

### 2.2.5.3 Conséquences sur la méthode de re-séquencement

Les deux phénomènes qui viennent d'être décrits, le roulement continu de stock et les interdits de montage, expriment l'incertitude qui pèse sur les données du problème. Il faut accepter cette incertitude sur la composition du buffer de re-séquencement comme une caractéristique intrinsèque au problème et en tenir compte dans la procédure

---

<sup>1</sup> Un interdit se produit quand une pièce nécessaire au montage est en rupture de stock.

<sup>2</sup> Il faut pour cela que les véhicules ne restent pas trop longtemps dans le buffer.

<sup>3</sup> Lancements des véhicules en atelier de montage.

<sup>4</sup> En terme de classes de véhicules, la classe était vide.

de re-séquencement. Par conséquent et même s'il est parfois souhaitable que le gestionnaire du flux connaisse les prochains véhicules qui vont être produits sur un horizon minimal, il apparaît clairement qu'il n'est pas raisonnable d'établir à chaque temps de cycle, une séquence trop longue, et a fortiori une séquence qui comprenne l'intégralité des véhicules présents à cet instant dans le buffer.

Dans le cas général, seuls les  $Q$  premiers véhicules d'une séquence prévisionnelle de longueur  $L$  sont définitivement enlignés. Ensuite, un ou plusieurs véhicules venant de l'atelier de peinture sont admis dans le buffer de re-séquencement et une nouvelle séquence de véhicules est construite. La Figure 2.1 illustre cet aspect dynamique du problème.  $Q$  correspond au nombre de véhicules enlignés par itération, c'est-à-dire la période de relance de la procédure de re-séquencement sur le temps de cycle.

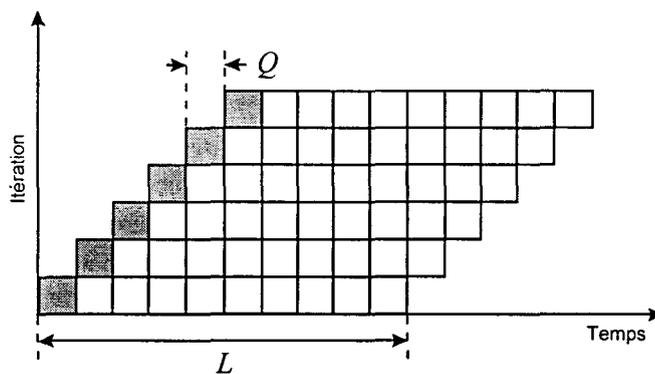


Figure 2.1 - Illustration de l'aspect dynamique du problème de re-séquencement

Pour chaque décision d'enlignement, la méthode de re-séquencement doit tenir compte de l'état instantané du stock de véhicules. Ce stock est soumis à une variation continue due aux arrivées de véhicules venant de peinture et à des changements imprévisibles dus à d'éventuels interdictions de montage. En ce qui concerne le buffer, une méthode pour laquelle  $Q = 1$  utilise donc pour chaque enlignement le maximum d'information disponible.

En toute rigueur, la longueur de la séquence prévisionnelle ( $L$ ) doit être égale à 1, parce que la composition des véhicules pouvant être engagés peut changer à tout moment. La procédure de re-séquencement consiste alors à envoyer en montage le meilleur véhicule présent dans le buffer à condition que celui-ci soit accessible (dans le cas d'une architecture à tiroirs) et enlignable (dont les options ne sont pas touchées par des interdictions de montage). Régler la longueur de la séquence prévisionnelle à 1, rend cependant la procédure de re-séquencement myope et cela présente un inconvénient majeur. En effet, si  $L$  n'est pas de taille suffisante, il est possible d'enligner un véhicule qui paraît optimal vis-à-vis de ce qui est déjà enligné mais pour lequel il n'est pas possible de trouver de successeur compatible avec les différentes contraintes du montage. Il faut donc que la séquence prévisionnelle soit suffisamment

longue pour éviter de tomber aveuglément dans un sous-optimum local. Le réglage de la longueur de la séquence prévisionnelle est lié à plusieurs aspects du problème :

- Si le choix de véhicules est grand, la probabilité de trouver des véhicules compatibles avec les contraintes et les objectifs donnés est grande également. Un grand choix de véhicules permet alors de réduire l'horizon de prévision sans pour autant risquer de se retrouver ultérieurement dans un sous-optimum local. Le terme 'grand choix' ne désigne pas seulement la taille du stock<sup>1</sup> mais également sa diversité, car les véhicules qui composent le stock peuvent être identiques.
- Le temps de calcul augmente avec l'horizon de prévision et il est impératif qu'il reste inférieur au temps de cycle.

## 2.2.6 Conclusion

Les différents paramètres du problème sont désormais connus et il est possible d'énoncer clairement le but de notre procédure de re-séquencement. Notre objectif est donc de bâtir, à chaque temps de cycle et à partir des véhicules présents dans le buffer, autostockeur ou architecture à tiroirs, une séquence prévisionnelle de longueur  $L$  qui respecte au mieux les différentes contraintes de l'atelier de montage. La ligne considérée est une ligne de production à cadence de lancement constante (CLC) et les contraintes considérées sont les contraintes de lissage de la charge et les contraintes juste-à-temps.

Le premier objectif de notre procédure de re-séquencement, c'est-à-dire de lissage de la charge de travail des différents postes, nécessite la modélisation du flux des véhicules en montage. Deux approches de modélisation ont été envisagées : la modélisation de la charge effective des postes de travail et la modélisation par espacement de critères.

---

<sup>1</sup> i.e. la contenance maximale dans le cas d'un autostockeur et le nombre de FIFOS en parallèle dans le cas d'une architecture à tiroirs.

## 2.3 Modélisation du flux des véhicules en montage

### 2.3.1 Introduction

Pour lisser la charge de travail tout au long de la journée de production, le flux des véhicules doit être modélisé. Deux approches de modélisation sont possibles. La première approche consiste à modéliser la charge effective des différents postes de travail de la ligne. La seconde modélise les contraintes imposées par les postes de travail sur la séquence de véhicules grâce à la notion d'espacement entre options. Dans cette partie, ces deux approches sont décrites et critiquées puis leurs caractéristiques sont comparées suivant plusieurs critères : finesse de modélisation, données requises, complexité et utilisabilité.

### 2.3.2 Modélisation de la charge effective des postes de travail

#### 2.3.2.1 Introduction

La modélisation explicite de la charge effective des postes de travail de la ligne d'assemblage fait appel aux tâches qui doivent être exécutées sur ces postes. Afin d'alléger la présentation, la modélisation qui est décrite concerne un poste de travail unique. La généralisation au cas à postes multiples sera abordée ensuite. Notons toutefois que si l'on fait l'hypothèse d'un équilibrage parfait<sup>1</sup>, ce qui n'est pas notre cas, il suffit de considérer le premier poste de la ligne puisque tous les postes sont identiques.

#### 2.3.2.2 Charge effective d'un poste de travail

Il est possible de modéliser un poste de travail dans le domaine spatial ou temporel. Le passage d'une représentation à l'autre est immédiat en tenant compte de la vitesse d'avancement de la ligne. Pour simplifier et sans perdre en généralité, nous supposons que le temps de cycle est égal à une unité de temps. Par conséquent, les temps opératoires et les distances parcourues par les opérateurs se confondent. Nous supposons également que le

---

<sup>1</sup> L'équilibrage parfait suppose que le temps total d'assemblage de chacun des véhicules est divisé équitablement entre tous les postes de travail de la ligne.

poste de travail considéré ( $j$ ) est un poste fermé, qu'il est occupé par un seul opérateur et qu'il réalise des tâches de type 2<sup>1</sup>.

Les notations suivantes seront utilisées :

- $I$  nombre de type de véhicules différents
- $i$  type du véhicule ( $i = 1, \dots, I$ )
- $M$  nombre de postes de travail
- $j$  indice du poste de travail ( $j = 1, \dots, M$ )
- $N$  nombre de véhicules à séquencer sur le poste  $j$
- $\gamma$  temps de cycle constant = 1 UT
- $v_c$  vitesse du convoyeur
- $l$  distance entre 2 véhicules consécutifs ( $l = \gamma \cdot v_c$ )
- $v_0$  vitesse de remontée de l'opérateur
- $d_r$  durée de remontée de l'opérateur entre deux véhicules consécutifs
- $d_{ij}$  durée opératoire de la tâche réalisée au poste  $j$  sur le véhicule de type  $i$
- $L_j$  longueur du poste  $j$
- $p$  position dans la séquence ( $p = 1, \dots, N$ )
- $t_{jp}$  date à laquelle le travail sur le véhicule qui occupe la position  $p$  de la séquence commence au poste  $j$
- $f_{jp}$  date à laquelle le travail sur le véhicule occupant la position  $p$  se termine au poste  $j$
- $T_{jp}$  quantité de travail non terminé au poste  $j$  sur le véhicule occupant la position  $p$
- $I_{jp}$  quantité d'inactivité au poste  $j$  sur le véhicule occupant la position  $p$

La Figure 2.2 présente la modélisation d'un poste d'un travail.

---

<sup>1</sup> Tâches de durées différentes selon le type de véhicule  $i$  présent dans le poste.

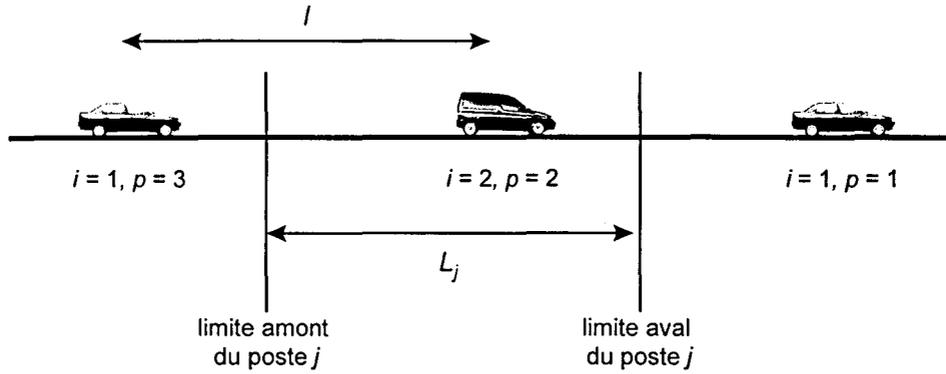


Figure 2.2 - Modélisation d'un poste de travail

Après avoir terminé sa tâche sur un véhicule, l'opérateur remonte le long de la ligne à une vitesse  $v_0$  pour travailler sur le prochain véhicule. La durée de remontée  $d_r$  est supposée constante. On a :

$$d_r = \frac{l}{v_c + v_0}$$

Suite à un certain nombre de véhicules légers (i.e. sans option ou avec une option représentant une faible charge de travail) consécutifs, il est possible que l'opérateur se trouve à la limite amont de son poste pour travailler sur le prochain véhicule. Comme le poste considéré est un poste fermé, l'opérateur doit attendre que le véhicule pénètre dans sa zone de travail. La perte d'efficacité qui apparaît alors est une inactivité. Si le poste était un poste ouvert, l'opérateur serait autorisé à franchir la limite amont et la perte d'efficacité ainsi créée serait un manque de travail.

Comme le convoyeur se déplace à vitesse constante, il est facile de connaître les dates de début ( $t_{jp}$ ) et les dates de fin ( $f_{jp}$ ) des tâches réalisées sur les différents véhicules de la séquence au poste  $j$ . On a :

$$t_{jp} = \max [f_{j,p-1} + d_r, p-1], \text{ avec } t_{j1} = 0$$

$$f_{jp} = \min [t_{jp} + d_{ij}, p-1 + L_j]$$

Les quantités de travail non terminé et d'inactivité causées au poste  $j$  par le véhicule occupant la position  $p$  de la séquence sont alors faciles à obtenir. On a :

$$T_{jp} = t_{jp} + d_{ij} - f_{jp}$$

$$I_{jp} = t_{jp} - f_{j,p-1} - d_r$$

Prenons un exemple simple. Supposons un poste de travail  $j$  fermé, dont la longueur  $L_j$  est égale à 2 et dont l'activité consiste à monter les lève-vitres électriques ou manuels selon le type de véhicule. Si le véhicule de type

$i$  nécessite les lève-vitres électriques alors  $i = 1$ . S'il nécessite les lève-vitres manuels alors  $i = 2$ . Les durées opératoires sont les suivantes :  $d_{1j} = 1,3$  UT et  $d_{2j} = 0,2$  UT. Le temps de cycle est de 1 UT, la vitesse du convoyeur ( $v_c$ ) est égale à 1 et la vitesse de remontée de l'opérateur ( $v_o$ ) est égale à 2,3 unités. La durée de remontée de l'opérateur ( $d_r$ ) est donc égale à 0,3 UT.

Supposons que la séquence arrivant dans ce poste soit la suivante : 1-2-2-1-1-1, où 1 symbolise un véhicule de type 1, nécessitant donc les lève-vitres électriques et où 2 symbolise un véhicule léger nécessitant les lève-vitres manuels.

Suivons pas à pas l'évolution de la situation au poste  $j$  :

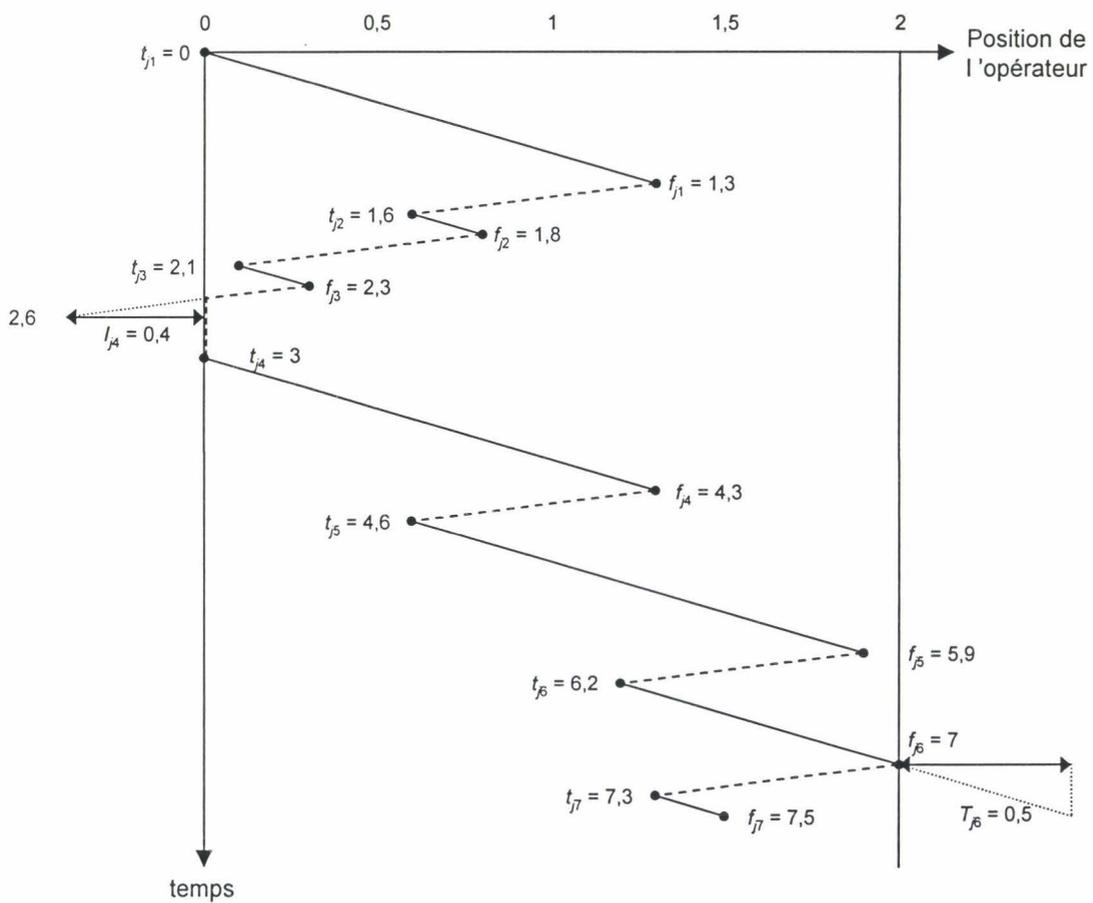


Figure 2.3 - Évolution du travail de l'opérateur dans un poste de travail fermé

Les lignes diagonales continues correspondent au travail de l'opérateur sur un véhicule. Les lignes les plus longues correspondent à la durée (ou à la distance) nécessaire à l'opérateur pour monter les lève-vitres électriques. Les lignes diagonales les plus courtes correspondent à la durée nécessaire à l'opérateur pour installer les lève-vitres manuels. Les lignes diagonales en pointillé représentent les temps de remontée de l'opérateur le long de la chaîne de production.

Suivons l'évolution du travail de l'opérateur recevant la séquence 1-2-2-1-1-1. L'opérateur commence son travail sur un véhicule de type 1 au temps 0. La tâche a une durée de 1,3 UT, l'opérateur termine donc sa tâche à la date 1,3. Les deux véhicules suivants sont des véhicules de type 2, l'opérateur termine donc ses tâches près de la limite amont de son poste à la date 2,3. Il remonte la ligne et atteint la limite de son poste à la date 2,6. Comme le véhicule suivant ne se présente qu'à la date 3, une inactivité de 0,4 UT apparaît. Ce véhicule et le suivant sont des véhicules de type 1, et l'opérateur termine la tâche sur le deuxième véhicule à la date 5,9. Il est proche de la limite aval de son poste de travail. Le véhicule suivant étant également un véhicule de type 1, le travail sur le véhicule ne peut être terminé avant que celui-ci ne quitte le poste. Le poste étant un poste fermé, un travail non terminé de 0,5 UT apparaît. La charge de travail représentée par la séquence de véhicules n'est pas assez lissée pour le poste considéré. Par conséquent, deux pertes d'inactivité sont apparues pour le quatrième et le sixième véhicule.

Ce n'est pas la charge de travail totale nécessitée par les véhicules qui est en cause mais l'ordre dans lequel ceux-ci arrivent dans le poste. En effet, une séquence contenant la même proportion de véhicules de type 1 et de type 2 telle que celle-ci : 1-1-2-1-2-2-1 répartit mieux la charge de travail et permet de ne pas avoir de pertes d'efficacité. L'importance de l'ordre dans lequel les véhicules se présentent apparaît ici clairement. La modélisation de la charge effective des postes permet de connaître l'influence d'une séquence de véhicules sur la ligne de production. Les pertes d'efficacité qui apparaissent sont pénalisées grâce à une fonction de coût dont le principe est brièvement présenté dans le paragraphe suivant.

### 2.3.2.3 Fonction de coût

L'évaluation d'un séquencement au niveau d'un poste de travail nécessite de pénaliser les pertes d'efficacité. Dans le cas précédent concernant un poste fermé, les deux pertes d'efficacité susceptibles de se produire sont l'inactivité et le travail non terminé. Yano et Bolat [YAN 89] ont montré que le problème de minimisation des travaux non terminés était le même que le problème de minimisation des inactivités. L'objectif linéaire qui est utilisé ne doit donc pas pénaliser à la fois ces deux pertes d'efficacité. La fonction objectif à minimiser pour lisser la charge du poste  $j$  est donc de la forme :

$$z_j = \sum_{p=1}^N T_{jp}$$

La valeur de cette fonction objectif est ici directement proportionnelle au travail non terminé. Cette fonction peut être adaptée pour, par exemple, sanctionner plus fortement les travaux non terminés les plus importants.

#### 2.3.2.4 Cas multi-postes

Si l'on considère à présent l'ensemble des postes de travail composant la ligne de montage, la forme générale de la fonction objectif est la suivante :

$$z_1 = \sum_{j=1}^M \theta_j \sum_{p=1}^N T_{jp}$$

où  $M$  est le nombre de postes de travail et où  $\theta_j$  est un facteur de pondération permettant de moduler les pénalités encourues en fonction du poste de travail considéré. On peut ainsi prendre en compte des coûts de main d'œuvre ou des coûts de fonctionnement différents selon les postes, ou encore pénaliser plus fortement les opérations non terminées représentant des retouches coûteuses.

La formulation de la fonction objectif pour un poste fermé est relativement simple mais le nombre de postes à considérer est de plusieurs centaines et la plupart sont des postes ouverts. La modélisation réaliste de ces postes pose certains problèmes pour des raisons qui seront données dans le paragraphe 2.3.2.6. De plus, étant donné le nombre élevé de postes de travail, il est important de savoir s'il est nécessaire de surveiller la charge de tous les postes ou, sinon, de déterminer quels sont ceux à surveiller afin de limiter la complexité du calcul de la fonction objectif.

#### 2.3.2.5 Identification de postes critiques

Il est intéressant d'identifier les postes critiques afin de n'étudier l'impact du séquencement que sur un nombre réduit de postes. Certains postes, notamment ceux réalisant des tâches de type 2, présentent, pour certains types de véhicules, des temps opératoires supérieurs au temps de cycle. Ce type de poste peut être considéré comme critique car il est fréquemment en surcharge et il est impératif d'étudier comment ces surcharges évoluent. D'autres postes peuvent être qualifiés de potentiellement critiques. Un poste potentiellement critique est un poste qui devient critique si les conditions pour lequel il est potentiellement critique apparaissent fréquemment. Malheureusement une grande proportion des postes de la ligne sont des postes critiques ou potentiellement critiques. Une solution possible afin de limiter le nombre de postes dont la charge est à surveiller, est d'intégrer la fréquence des surcharges possibles des postes critiques ou potentiellement critiques en tenant compte des quantités de production de chaque type de

véhicule. Si un poste potentiellement critique devient critique quand plusieurs véhicules d'un type particulier se suivent, mais que ce type de véhicule ne représente que 5% de la production, on peut considérer que ce poste a peu de chance de poser des problèmes. La probabilité d'avoir ces quelques véhicules à la suite est faible.

La détermination des postes à étudier n'est cependant pas facile et cette identification peut être remise en cause quand le « mix »<sup>1</sup> des véhicules varie fortement d'un jour à l'autre.

### 2.3.2.6 Critique de la modélisation par postes de travail

La modélisation par postes de travail, même si elle permet potentiellement de suivre précisément les surcharges ou les famines des différents postes, présente plusieurs inconvénients qui la rendent difficile à mettre en pratique :

- Les temps opératoires sont des données difficiles à obtenir. De plus, ils ont tendance à évoluer en fonction de l'apprentissage et à varier d'un opérateur à l'autre. L'utilisation d'un modèle stochastique tenant compte des distributions statistiques des temps opératoires est envisageable. Cependant le remplacement du modèle déterministe est difficile à mettre en œuvre à cause du trop grand nombre de conditions à explorer [MAC 73].
- Les longueurs des différents postes de travail sont des données difficiles à connaître car elles ne sont pas précisément établies. Il est par exemple difficile de définir les limites de déplacement des opérateurs en dehors de leur poste de travail quand le poste est ouvert. Or ces valeurs sont nécessaires pour bâtir la fonction objectif.
- Les postes comportant plusieurs opérateurs sont délicats à modéliser. De plus, quand une interférence entre les opérateurs de deux postes adjacents risque de se produire, ceux-ci ont tendance à changer l'ordre dans lequel ils réalisent leurs opérations, quand cela est possible, afin d'éviter les conflits [BHA 93]. Il est donc, par exemple, difficile de mesurer précisément les conséquences d'une surcharge de travail dans un tel cas.
- Le nombre de postes à surveiller est important et l'identification des postes critiques n'est pas aisée.

En conclusion, la modélisation de la charge effective des postes de travail nécessite un grand nombre de données précises qui ne sont pas toutes connues ou accessibles. Si ces données ne sont pas fiables, la modélisation ne peut pas représenter fidèlement ce qui se passe dans les différents postes de travail. Une autre approche de modélisation, plus facile à mettre en œuvre, est possible : la modélisation par espacement de critères.

---

<sup>1</sup> i.e. l'ensemble des véhicules à produire.

### 2.3.3 Modélisation par espacement de critères

#### 2.3.3.1 Introduction

Comme nous l'avons vu dans le premier chapitre de cette thèse, les différents postes de travail composant la ligne de production sont conçus pour pouvoir traiter un ratio prédéterminé de voitures portant certaines options. Supposons par exemple, que 30% des voitures nécessitent la direction assistée. Le poste de travail chargé de monter cette option a été dimensionné pour pouvoir traiter ce ratio et la séquence ne doit comporter qu'au plus trois véhicules ayant la direction assistée parmi toute sous-séquence de dix véhicules consécutifs. Parmi les deux séquences suivantes où les voitures claires nécessitent la direction assistée, seule la première respecte la contrainte de ratio de 30%.

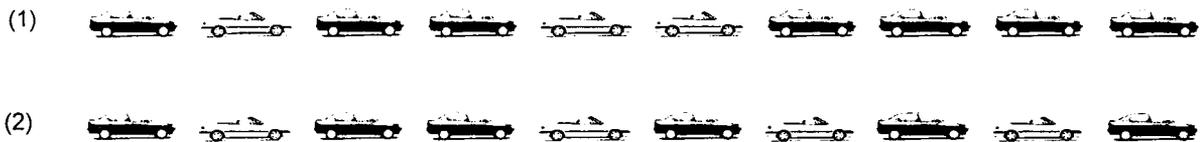


Figure 2.4 - Exemple de contrainte de ratio

Pour chaque option de ce type, susceptible de causer des surcharges de travail dans certains postes de l'atelier de montage<sup>1</sup>, une contrainte de ratio peut être définie. Ces contraintes sont des contraintes de la forme 'pas plus de  $k$  véhicules portant un critère particulier parmi  $n$  véhicules consécutifs'. Le terme option a été remplacé par le terme critère car les caractéristiques des véhicules pouvant créer des surcharges ne sont pas forcément à proprement parler des options. Un critère correspond en fait à un attribut particulier porté par les véhicules. Cet attribut peut être : une option (direction assistée, toit ouvrant, etc.), un type de véhicule (direction à droite, voiture école, etc.) ou encore un type de motorisation (Diesel, Turbo Diesel, etc.). Le nombre de critères à considérer est un paramètre qui dépend de la ligne de montage et des différents postes de travail.

Un type de contrainte similaire existe : la contrainte d'espacement. Elle est de la forme 'au moins  $k$  véhicules sans critère entre deux véhicules avec critère'. Considérons l'exemple suivant dans lequel la contrainte d'espacement est 'au moins deux véhicules sans critère entre deux véhicules avec critère' et où les voitures claires sont les voitures avec critère.

<sup>1</sup> Ce type d'option est appelé option lourde.

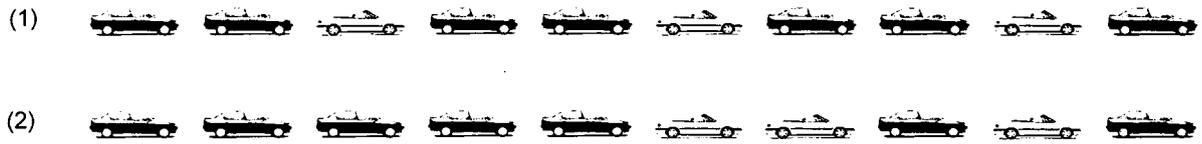


Figure 2.5 - Exemple de contrainte d'espace

Seule la première séquence respecte la contrainte d'espace. La seconde présente deux violations. La contrainte d'espace est en fait un cas particulier de la contrainte de ratio pour laquelle  $k = 1$ . Ce type de contrainte est le plus fréquent en pratique. Dans la suite, nous regrouperons abusivement sous le terme générique de contraintes d'espace, car c'est le terme le plus fréquemment employé dans la littérature, à la fois les contraintes de ratio et les contraintes d'espace.

### 2.3.3.2 Définition des espaces

La modélisation est basée sur le respect des espaces. Un espace sur un ensemble d'entités ( $X$  de cardinalité  $C$ ) comportant un sous-ensemble non vide ( $x$  de cardinalité  $c$ ) dont les éléments présentent une certaine caractéristique, est défini comme suit :

$$Espace = \frac{C}{c} - 1$$

En partant de l'enveloppe journalière qui contient  $N$  véhicules à produire, on peut donc définir l'espace optimal ( $E_{opt}$ ) entre véhicules possédant le même critère  $c$  :

$$E_{opt}^c = \frac{N}{n(c)} - 1$$

où  $n(c)$  est le nombre de véhicules possédant le critère  $c$ . Cet espace correspond donc à l'espace moyen calculé sur la journée de production entre les véhicules portant le critère  $c$ .

Un autre espace, appelé espace acceptable ( $E_{acc}$ ) est, quant à lui, fourni pour chaque critère par les responsables de production en fonction des capacités des postes de travail et de l'équilibrage réalisé. Cet espace correspond à l'espace minimal devant séparer deux véhicules présentant un critère particulier. Si l'espace réel entre deux véhicules portant un critère est inférieur à l'espace acceptable, des problèmes de production apparaîtront (travail non terminé, surcharge). Les espaces acceptables pour les différents critères sont définis en

fonction des contraintes imposées par les postes de travail concernés par ces critères. Si la contrainte d'espacement d'un critère  $c$  est : 'pas plus de  $k_c$  véhicules portant le critère parmi  $n_c$ ' alors,

$$E_{acc}^c = \frac{n_c}{k_c} - 1$$

L'espacement acceptable est un nombre entier quand la contrainte est une vraie contrainte d'espacement ( $k_c = 1$ ), c'est un nombre réel quand la contrainte est une contrainte de ratio. L'espacement des critères est la base de cette approche car, par définition, la violation d'un espacement acceptable provoque des surcharges en montage.

Les contraintes d'espacement imposent que chaque espacement ( $E$ ) de la séquence soit partout, et pour chaque critère, supérieur ou égal à l'espacement acceptable en se rapprochant le plus possible de l'espacement optimal. On peut établir une analogie directe entre le non-respect des règles d'espacement et les pertes d'efficacité constatées dans la modélisation de la charge effective des postes de travail. Si l'on considère que les postes de travail ont été dimensionnés de telle façon que si l'espacement optimal est respecté, il n'y a aucune perte d'efficacité, les non-respects des espacements acceptable et optimal peuvent être facilement traduits en pertes d'efficacité. En effet, pour le critère ou le poste considéré, deux cas se présentent :

- le cas  $E < E_{acc}$  correspond à du travail non terminé ou à une surcharge,
- le cas  $E_{opt} \leq E$  correspond à une inactivité ou à un manque de travail.

La Figure 2.6 illustre la comparaison entre les deux approches de modélisation dans le cas d'un poste fermé.

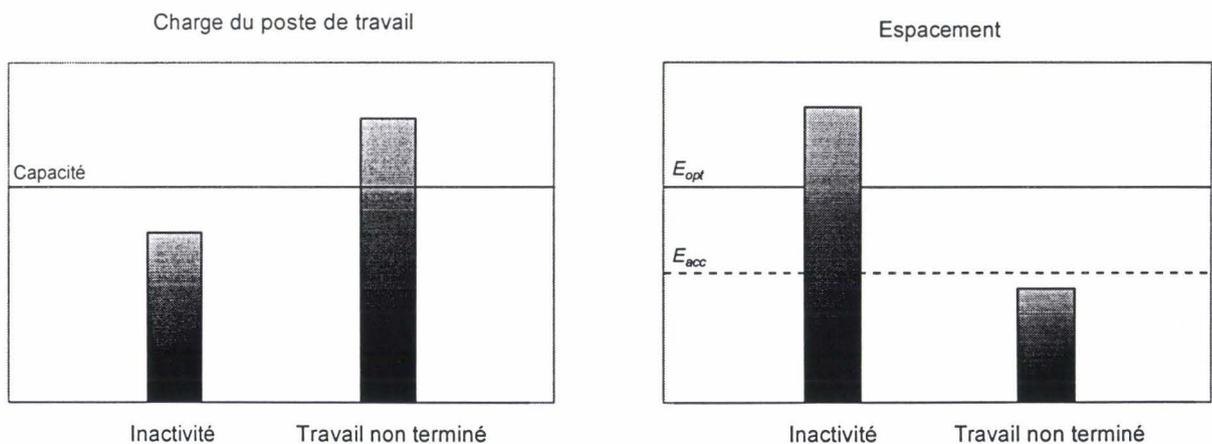


Figure 2.6 - Comparaison entre les violations des règles d'espacements et les pertes d'efficacité

Si l'objectif du séquencement est de minimiser le nombre des travaux non terminés, il faut que les espacements entre les différents critères respectent le plus possible les espacements acceptables. Cela permet d'engager les

véhicules avec une densité de critères maximale, sans pour autant passer en dessous de l'acceptable. Si l'espacement acceptable est inférieur à l'espacement optimal, une marge est progressivement construite qui pourra ensuite être utilisée afin de faire face à des afflux massifs de certains critères dans le stock ou à des interdicts. En l'absence d'interdit, cette marge subsistera jusqu'à la fin de la journée et impliquera une répartition hétérogène de la charge de travail sur la journée.

Si l'on désire que la charge de travail soit parfaitement équilibrée tout au long de la journée de production, il faut que les espacements soient les plus proches possible des espacements optimaux.

En résumé, dans l'approche par espacement entre critères, le respect des espacements acceptables constitue une contrainte dure, liée aux limitations des installations et de la main d'œuvre, qu'il ne faut pas violer. Le respect de l'espacement optimal permet de mieux lisser la charge de travail, mais il ne s'agit que d'une préférence à satisfaire dans la mesure du possible.

On peut introduire un nouveau type d'espacement, appelé espacement cible ( $E_{cib}$ ). Cet espacement correspond à l'espacement que l'on souhaite suivre. C'est cet espacement que la procédure de re-séquencement s'efforcera de respecter. L'idéal est que cet espacement de travail soit égal à l'espacement optimal mais il peut être nécessaire, quand des interdicts de montage apparaissent ou quand la qualité du contenu du buffer l'oblige, de rapprocher cet espacement de travail de l'espacement acceptable.

Les objectifs de la procédure de re-séquencement qui a été développée sont présentés plus en détail dans le troisième chapitre.

Une condition nécessaire évidente pour qu'un séquencement puisse respecter les contraintes d'espacement acceptable est que :

$$E_{opt}^c \geq E_{acc}^c, \forall c$$

Donc, tant que l'espacement moyen dépasse l'espacement minimum, le maintien de l'espacement moyen satisfait les contraintes d'espacement minimum. Pour chaque critère, plus l'espacement optimal est proche de l'espacement acceptable et plus le flux de véhicules est dit contraint. Et plus le flux est contraint, plus la situation est délicate à gérer, car la « marge de manœuvre » devient plus faible.

La condition  $E_{opt}^c \geq E_{acc}^c, \forall c$  est une condition nécessaire pour qu'une séquence puisse respecter les contraintes d'espacements acceptables. Cette condition n'est suffisante que dans le cas où l'on ne considère qu'un seul critère. A

cause des croisements de critères<sup>1</sup>, il est possible qu'il n'y ait pas de séquence respectant  $E_{acc}^c$  pour tous les critères, bien que la relation  $E_{opt}^c \geq E_{acc}^c$  soit vérifiée individuellement. L'exemple suivant illustre cette situation :

Considérons des véhicules pouvant posséder 3 critères  $A, B$  et  $C$ . Supposons que 25% des véhicules possèdent ces 3 critères, 25% possèdent le critère  $B$  seul, 25% possèdent le critère  $C$  seul et 25% aucun critère. Supposons également que les espacements acceptables des différents critères soient égaux aux espacements optimaux. Pour les différents critères, on a :

$$\text{critère } A \quad E_{cib}^A = E_{acc}^A = E_{opt}^A = 3$$

$$\text{critère } B \quad E_{cib}^B = E_{acc}^B = E_{opt}^B = 1$$

$$\text{critère } C \quad E_{cib}^C = E_{acc}^C = E_{opt}^C = 1$$

L'espacement de 3 pour le critère  $A$  impose la séquence suivante pour les 25% de véhicules possédant les critères  $A, B$  et  $C$  :

$A$	$A$	$x$	$x$	$x$	$A$												
$B$	$B$	$x$	$x$	$x$	$B$												
$C$	$C$	$x$	$x$	$x$	$C$												

Pour respecter la contrainte d'espacement sur le critère  $B$ , il faut intercaler les véhicules portant le critère  $B$  seul entre les véhicules  $ABC$  :

$A$	$A$	$x$	$.$	$x$	$A$												
$B$	$B$	$x$	$B$														
$C$	$C$	$x$	$.$	$x$	$C$												

Il est alors impossible de placer les véhicules possédant le critère  $C$  seul sans violer la contrainte d'espacement<sup>2</sup>.

Si on suppose maintenant que 25% des véhicules possèdent les trois critères, 25% possèdent les critères  $B$  et  $C$ , et 50% de véhicules légers. Les différents espacements sont identiques au cas précédent car le nombre cumulé de critères est le même qu'avant. Il est cette fois-ci possible de trouver une séquence qui vérifie toutes les contraintes :

<sup>1</sup> Présence de plusieurs critères sur un même véhicule.

<sup>2</sup> Entre deux véhicules portant le critère  $C$ , il en faut au moins un sans le critère.

<i>A</i>	<i>A</i>	.	.	.	<i>A</i>												
<i>B</i>	<i>B</i>	.	<i>B</i>														
<i>C</i>	<i>C</i>	.	<i>C</i>														

L'exemple choisi est un cas extrême parce que  $E_{acc}^c = E_{opt}^c, \forall c$ , ce qui est très peu réaliste car cela correspond à un flux extrêmement contraint. Cependant il est possible que pour un critère donné, l'espacement acceptable soit très proche voire égal à l'espacement optimal. Le critère est dit très contraint.

### 2.3.3.3 Contraintes croisées

L'approche par espacement de critères présentée suppose que l'on connaisse effectivement l'espacement minimal  $E_{acc}^c$  entre deux véhicules possédant le même critère  $c$ . L'hypothèse de cette approche consiste à dire qu'une suite composée de  $E_{acc}^c$  véhicules sans le critère  $c$  suffit pour que les opérateurs des postes concernés puissent rattraper le retard dû à la présence du critère  $c$ . Implicitement, on suppose alors que les véhicules sans le critère  $c$  sont légers par rapport à ces postes, i.e. qu'un poste n'est concerné que par un seul critère.

Les contraintes diagonales que nous avons considérées jusque là ne suffisent pas à traduire correctement les contraintes sur la charge de travail. Il faut introduire un autre type de contrainte permettant de considérer deux critères différents : les contraintes croisées.

Considérons l'exemple d'un poste chargé du montage d'une option particulière. Supposons que le temps de montage de cette option dépende du type de véhicule considéré et qu'il soit plus long sur les véhicules portant les critères  $A$  ou  $B$ . Les données sont les suivantes :

- temps de cycle  $\gamma = 2$  mn,
- temps opératoire pour un véhicule ayant le critère  $A = 3$  mn,
- temps opératoire pour un véhicule ayant le critère  $B = 3$  mn,
- Temps opératoire pour un véhicule sans le critère  $A$  et sans le critère  $B = 1$  mn,
- $E_{acc}^A = 1$  et  $E_{acc}^B = 1$ .

On suppose pour simplifier l'exposé que les temps opératoires comprennent les temps de remontée des opérateurs. En tenant compte de  $E_{acc}^A$ , la séquence suivante devrait être acceptable pour le poste considéré :

*A* . *A* . *A* . *A*

En fait, elle est seulement acceptable si les véhicules présents entre les véhicules de type *A* sont effectivement légers. La séquence suivante :

A - A B A B A

respecte bien les espacements acceptables de *A* et de *B* mais est néanmoins totalement inacceptable parce que l'absence du critère *A* sur un véhicule n'implique pas que celui-ci soit léger. En cas de croisement de critères sur des postes de travail, il est nécessaire d'introduire les contraintes d'espacement croisées.

Les contraintes d'espacement croisées concernent deux critères. Dans l'exemple précédent, il faudrait ajouter les contraintes croisées suivantes :  $E_{acc}^{A/B} = 1$  et  $E_{acc}^{B/A} = 1$ . Ces contraintes stipulent qu'il faut au moins un véhicule léger entre un véhicule portant le critère *A* et un véhicule portant le critère *B*.

Considérons par exemple, deux critères différents : ABS et boîte automatique (BA). Les espacements acceptables de ces critères sont les suivants :  $E_{acc}^{ABS} = 7$ ,  $E_{acc}^{BA} = 3$ . Ces espacements acceptables figurent sur la diagonale du Tableau 2-1. Il faut en plus tenir compte des contraintes croisées (non symétriques) suivantes  $E_{acc}^{ABS/BA} = 3$  et  $E_{acc}^{BA/ABS} = 2$ . Le tableau des contraintes d'espacement est donc le suivant :

	<i>ABS</i>	<i>BA</i>
<i>ABS</i>	<b>7</b>	<b>3</b>
<i>BA</i>	<b>2</b>	<b>3</b>

Tableau 2-1 - Synthèse des contraintes d'espacement

Cela signifie qu'au mieux, la séquence suivante peut être obtenue :

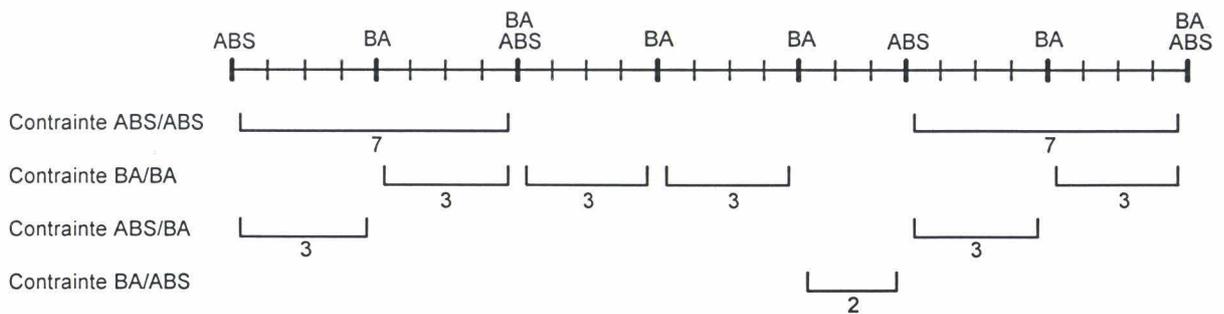


Figure 2.7 - Exemple de bonne séquence respectant les contraintes diagonales et croisées

Les contraintes croisées permettent donc de tenir compte des croisements de critères sur un même poste et de traduire fidèlement les situations que l'on peut réellement rencontrer sur les lignes de production.

Les divers espacements étant maintenant bien définis, il est possible d'introduire la fonction de coût chargée de pénaliser le non-respect des contraintes d'espacement.

### 2.3.3.4 Principe de la fonction de coût associée

La mesure de la qualité d'une séquence de véhicules peut être effectuée par des indicateurs, qui pénalisent tout écart par rapport à  $E_{opt}^c$  et a fortiori, toute violation de  $E_{acc}^c$ .

- *Indicateur de déviation par rapport à l'espacement optimal*

Soit  $E^c$  l'espacement effectif. Alors ,

$$a_p = |E_{opt}^c - E^c|$$

La pénalité totale reçue pour les écarts par rapport à l'espacement optimal pour le critère  $c$  est alors de la forme :

$$\sum_{p=1}^N a_p$$

- *Indicateur de déviation par rapport à l'espacement acceptable*

On procède de la façon suivante :

$$b_p = \max(0, E_{acc}^c - E^c)$$

La pénalité totale reçue pour les écarts par rapport à l'espacement acceptable pour le critère  $c$  est de la forme :

$$\sum_{p=1}^N b_p$$

La fonction objectif globale à minimiser pour le critère  $c$  est alors :

$$\sum_{p=1}^N (a_p + \beta b_p)$$

La pondération du second terme par le facteur  $\beta$  ( $\beta > 1$ ) permet de pénaliser plus fortement la violation de l'espacement acceptable qui est une contrainte dure alors que le respect de l'espacement optimal est une préférence.

Ce paragraphe n'a fait que décrire brièvement le principe de la fonction objectif. La présentation détaillée de celle qui a été utilisée est donnée dans le chapitre 3 concernant les méthodes de résolution employées.

### 2.3.3.5 Critique de la modélisation par espacement

La principale critique que l'on peut adresser à la modélisation par espacement est qu'elle introduit naturellement une vision locale de la séquence et que cela peut induire un détachement de l'origine temporelle pourtant nécessaire pour décrire fidèlement le comportement d'un poste de travail. L'exemple suivant illustre cette situation :

Considérons un seul critère  $A$  tel que  $E_{acc}^A = E_{opt}^A = 4$ .

La séquence suivante ( $S_1$ )

$A . . . . A . . A . . . . A . . . . A . . . . A . . . . . A$

possède un espacement de 2 et, 15 véhicules plus tard un espacement de 6.

La séquence ( $S_2$ )

$A . . . . A . . A . . . . . A . . . . A . . . . A . . . . A$

possède, elle, un espacement de 2 et tout de suite après un espacement de 6, qui permet instantanément de rattraper le retard.

Si on ne comptabilise que les espacements, c'est-à-dire

- 5 intervalles corrects (espacement de 4),
- 1 intervalle trop court ne respectant pas l'espacement acceptable (espacement de 2)
- 1 intervalle trop long, supérieur à l'espacement optimal (espacement de 6)

les deux séquences  $S_1$  et  $S_2$  sont équivalentes. Cependant, sur les postes, la situation réelle est complètement différente parce que  $S_1$  induit un dépassement qui est rattrapé beaucoup plus tard que celui de  $S_2$ .

La séquence  $S_3$

$A . . . . A . . . . . A . . . . A . . . . A . . A . . . . A$

est toujours équivalente d'un point de vue espacement, mais l'intervalle long (espacement de 6) est devant l'intervalle court (espacement de 2). C'est en fait la plus mauvaise des trois séquences parce que le retard persiste et n'est jamais rattrapé.

Cet exemple montre donc que l'approche par espacement se limite dangereusement à une vision locale de la séquence. Les espacements ne sont pas mesurés par rapport à une origine fixe, or la situation effective des postes doit être retrouvée par rapport à une origine. L'approche par charge effective des postes intègre (au sens mathématique du terme) directement les temps opératoires et permet de traduire plus finement la situation de la ligne. Il est à remarquer que cet inconvénient de l'approche par espacement s'avéra, finalement, être intéressant dans l'approche par recuit simulé présentée dans le troisième chapitre.

### 2.3.4 Prise en compte des contraintes juste-à-temps

Nous avons défini dans le paragraphe 2.2.4, les deux objectifs de notre procédure de re-séquencement des véhicules en entrée de montage. Ces deux objectifs sont :

- (1) lisser la charge de travail des différents postes,
- (2) minimiser les variations du taux de consommation des pièces.

Les deux approches de modélisation du flux des véhicules présentées permettent toutes deux de lisser la charge des différents postes de travail mais les méthodologies proposées doivent tenir compte des deux objectifs simultanément et par conséquent intégrer les contraintes juste-à-temps.

#### 2.3.4.1 Prise en compte des contraintes juste-à-temps dans la modélisation par postes

Dans le cas de la modélisation par postes de travail, la fonction objectif est la forme :

$$z_1 = \sum_{j=1}^M \theta_j \sum_{p=1}^N T_{jp}$$

La minimisation de cette fonction permet de lisser la charge de travail en minimisant les travaux non terminés. La seule façon d'intégrer les contraintes juste-à-temps est d'utiliser une formulation bi-critères.

La formulation mathématique de la minimisation des variations du taux de consommation des pièces proposée ici s'inspire des études réalisées sur les systèmes juste-à-temps et notamment de la méthode employée chez Toyota, la procédure de Goal Chasing [MON 83][MIL 89a][MIL 89b][INM 92][SUM 92][BAR 94][NGW 94]. Comme

Miltenburg [MIL 89a] ou Inman et Bulfin [INM 92], nous ne considérons que le premier niveau du système de production, c'est-à-dire le niveau des produits finis, les véhicules. En effet, la séquence du niveau le plus élevé affecte le séquencement dans tous les niveaux inférieurs (sous-assemblages, composants, matières premières). Si les différents types de véhicules sont séquencés de façon régulière, les taux de consommation des différentes pièces seront constants dans tous les niveaux. La simplification réalisée en ignorant les autres niveaux permet à la méthode de séquencement d'être plus rapide tout en restant très efficace.

La formulation nécessite l'introduction des variables suivantes :

- $n_i$  nombre de véhicules de type  $i$  à produire
- $I$  nombre de types de véhicules différents
- $N$  nombre total de véhicules à séquencer
- $r_i$  proportion de véhicule de type  $i$  dans la production totale
- $p$  position occupée par le véhicule dans la séquence
- $x_{ip}$  nombre de véhicules de type  $i$  présents entre les positions 1 à  $p$  de la séquence

Les relations suivantes sont évidentes :

$$N = \sum_{i=1}^I n_i \quad \text{et} \quad r_i = \frac{n_i}{N}$$

Les variables de décision sont les  $x_{ip}$ . Ces variables définissent le programme de production des véhicules. L'objectif est que la proportion de véhicules de type  $i$  produits sur chaque période de temps soit la plus proche possible du ratio  $r_i$ . La valeur des  $x_{ip}$  doit donc être la plus proche possible de la valeur de  $p.n_i/N$ . Ce concept simple est illustré sur la Figure 2.8.

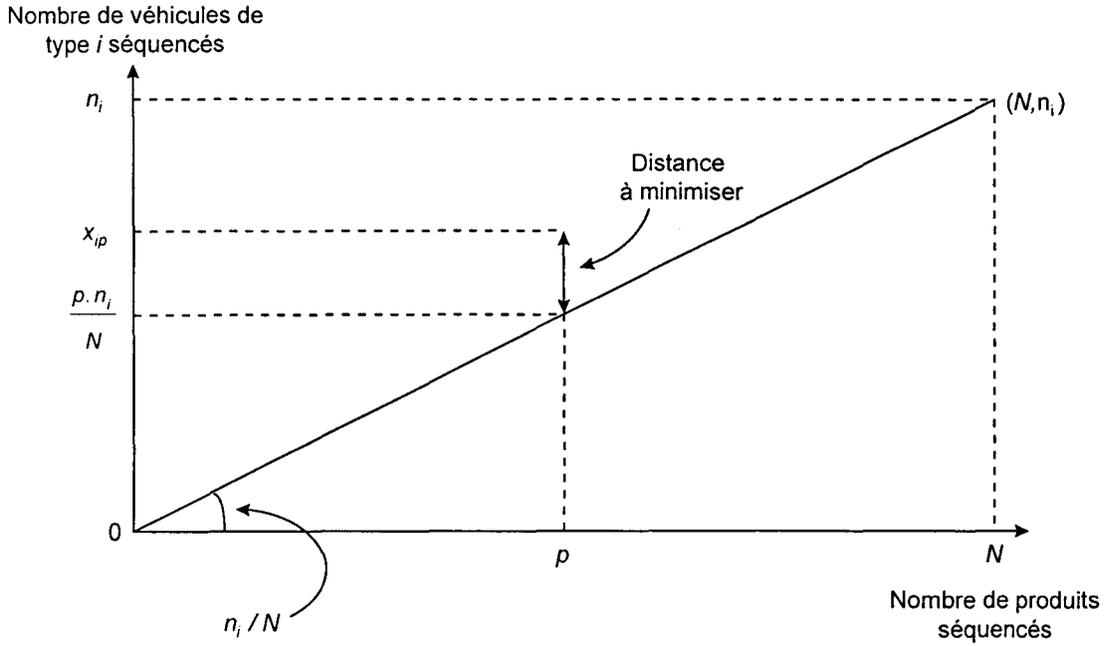


Figure 2.8 - Relation entre les  $x_{ip}$  et  $p.n_i/N$

Afin d'assurer une « vitesse de consommation » constante de chaque type de véhicule, il faut minimiser la distance entre les points  $(x_{ip}, p)$  et  $(p.n_i/N, p) = (p.r_i, p)$ . La fonction objectif à minimiser est donc de la forme suivante :

$$z_2 = \sum_{p=1}^N \sum_{i=1}^I (x_{ip} - p.r_i)^2$$

avec

$$0 \leq x_{ip} - x_{i(p-1)} \leq 1 \text{ et } x_{ip} \text{ est un entier, } i = 1, 2, \dots, I ; p = 1, 2, \dots, N$$

Cette contrainte assure qu'il n'est pas possible d'ordonnancer moins de 0 unité et plus de une unité par position de la séquence.

Appliquons cette fonction objectif à un petit exemple. Supposons qu'il y ait 3 types de véhicules à assembler ( $I = 3$ ). Les nombres de véhicules de chaque type à assembler sont respectivement  $n_1 = 4$ ,  $n_2 = 2$ ,  $n_3 = 3$ . Le nombre total de véhicules à produire ( $N$ ) est donc égal à 9 et les ratios de production sont les suivants :  $r_1 = 4/9$ ,  $r_2 = 2/9$ ,  $r_3 = 3/9$ . La construction pas à pas de la séquence est donnée dans le Tableau 2-2 où le vecteur  $X_p$  correspond au vecteur  $(x_{1p}, x_{2p}, x_{3p})$  :

$p$	$X_{(p-1)}$	$p.r_i$	$f_1$	$f_2$	$f_3$	Type choisi
1	0,0,0	(4/9, 2/9, 3/9)	<u>0,47</u>	0,91	0,69	1
2	1,0,0	(8/9, 4/9, 6/9)	1,88	0,77	<u>0,32</u>	3
3	1,0,1	(12/9, 6/9, 9/9)	0,89	<u>0,22</u>	1,56	2
4	1,1,1	(16/9, 8/9, 12/9)	<u>0,17</u>	1,95	1,06	1
5	2,1,1	(20/9, 10/9, 15/9)	1,06	1,28	<u>0,17</u>	3
6	2,1,2	(24/9, 12/9, 18/9)	<u>0,22</u>	0,89	1,56	1
7	3,1,2	(28/9, 14/9, 21/9)	1,21	<u>0,32</u>	0,76	2
8	3,2,2	(32/9, 16/9, 24/9)	0,69	2,25	<u>0,47</u>	3
9	3,2,3	(36/9, 18/9, 27/9)	<u>0</u>	2	2	1

Tableau 2-2 - Construction progressive d'une séquence respectant les contraintes juste-à-temps

avec

$$f_1 = \sum_{i=1}^3 (x_i - p.r_i)^2 \quad \text{si } X_p = (x_{1p-1} + 1, x_{2p-1}, x_{3p-1}),$$

$$f_2 = \sum_{i=1}^3 (x_i - p.r_i)^2 \quad \text{si } X_p = (x_{1p-1}, x_{2p-1} + 1, x_{3p-1}),$$

$$f_3 = \sum_{i=1}^3 (x_i - p.r_i)^2 \quad \text{si } X_p = (x_{1p-1}, x_{2p-1}, x_{3p-1} + 1).$$

La séquence obtenue est donc la suivante : 1-3-2-1-3-1-2-3-1.

La fonction  $z_2$  qui vient d'être décrite correspond à l'objectif de respect de la contrainte juste-à-temps. L'objectif global de la procédure de re-séquencement est de minimiser la combinaison linéaire du travail non terminé total et du montant de l'écart entre la production et la demande. La fonction bi-critères à minimiser pour atteindre simultanément les deux objectifs du re-séquencement est donc :

$$z = \beta z_1 + (1 - \beta) z_2,$$

$$z = \sum_{p=1}^N \left( \beta \sum_{j=1}^M \theta_j T_{jp} + (1 - \beta) \sum_{i=1}^I (x_{ip} - p.r_i)^2 \right)$$

La pondération par le facteur  $\beta$  permet d'obtenir une solution qui réalise un bon compromis entre les travaux non terminés et les variations du taux de consommation des pièces. Cette méthode présente cependant deux inconvénients majeurs :

- l'objectif de minimisation de la variation des taux d'utilisation des pièces nécessite un nombre limité de modèles différents. Il faut donc que les différents véhicules à produire puissent être classés par type en fonction des pièces qu'ils nécessitent.

- la minimisation d'une fonction bi-critères pondérée n'est pas toujours facile car il faut réaliser un bon compromis entre les deux objectifs.

#### 2.3.4.2 Prise en compte des contraintes juste-à-temps dans la modélisation par espacement

La fonction objectif

$$z_2 = \sum_{p=1}^N \sum_{i=1}^I (x_{ip} - p.r_i)^2$$

utilisée dans le paragraphe précédent pour minimiser la variabilité du taux de consommation des pièces n'est qu'une mesure relative qui n'a pas, à proprement parler, de signification physique. Comme le notent Inman et Bulfin [INM 92], une interprétation différente peut être faite de 'garder une vitesse constante de consommation de chaque pièce'. L'objectif peut être interprété comme 'maintenir un intervalle constant entre l'utilisation de chaque unité d'une pièce'. On retrouve ici la même notion d'espacement que dans la modélisation du flux des véhicules par espacement de critères présentée dans le paragraphe 2.3.3. L'objectif de maintenir un espacement constant entre les différents critères prend en compte à la fois l'objectif de lissage de la charge des différents postes de travail et l'objectif de maintien d'un taux de consommation constant de chaque pièce. La fonction objectif utilisée ne doit donc pas être modifiée. Par contre, il peut être nécessaire d'introduire des critères supplémentaires afin de prendre en compte des options ou des pièces utilisées en montage qui ne l'étaient pas encore car elles n'étaient pas utiles dans la procédure de lissage de la charge des différents postes de travail.

### 2.3.5 Conclusion

Les deux approches de modélisation, par charge effective des postes de travail et par espacement de critères, présentent chacune des inconvénients. L'approche par modélisation de la charge effective des postes de travail est a priori plus fine et traduit explicitement ce qui se passe dans chaque poste. Elle nécessite cependant, de connaître parfaitement les longueurs de chaque poste de travail ainsi que les différents temps opératoires. Or, comme le notent Yano et Bolat [YAN 89], ces données sont en général plus difficiles à obtenir que les règles d'espacement et les poids associés aux violations. Il est donc inutile d'essayer de modéliser finement la réalité de chaque poste de travail si les données de départ sont fausses. De plus, même si les données nécessaires sont connues, leur nombre rend le modèle impraticable dans le cadre d'une procédure de re-séquencement temps-réel. Par contre, l'expérience des

opérateurs et des gestionnaires de la ligne est telle qu'elle permet de connaître facilement les diverses règles d'espacement à respecter. Par conséquent et même si la notion d'espacement de critères provient implicitement des charges que ces critères font peser sur les postes de travail et les opérateurs, c'est la modélisation par espacement qui sera utilisée par la suite. Cette méthode est, en outre, plus intuitive et certainement plus facile à manipuler que le calcul explicite de la charge des postes. De plus les contraintes de lissage de la charge et les contraintes juste-à-temps à respecter sont prises en compte simultanément grâce à l'espacement régulier des critères.

## 2.4 Complexité du problème

### 2.4.1 Introduction

Le problème est désormais clairement défini. Notre objectif est de re-séquencer les véhicules arrivant de l'atelier de peinture afin que la séquence envoyée en montage respecte les contraintes d'espacement des différents critères. Pratiquement, il s'agit de déterminer à chaque temps de cycle quel est le prochain véhicule à lancer en montage, étant donné les contraintes de cet atelier, les véhicules déjà lancés et les véhicules présents dans le buffer de re-séquencement. Chaque minute, une séquence prévisionnelle de longueur  $L$  doit être construite<sup>1</sup>. La contrainte de temps<sup>2</sup> est prioritaire sur les contraintes d'espacements car on préfère généralement envoyer un 'mauvais véhicule' que pas de véhicule du tout. En effet, un trou dans la séquence est synonyme d'un véhicule produit en moins.

Comme nous l'avons vu dans le premier chapitre, les véhicules arrivant du processus de peinture sont placés dans un moyen de stockage intermédiaire appelé buffer de re-séquencement. Ce buffer de re-séquencement peut être soit un autostockeur soit une architecture à tiroirs. Évidemment le type de buffer influe directement sur la complexité du problème.

---

<sup>1</sup> Cf. paragraphe 2.2.5.3.

<sup>2</sup> Un véhicule doit être lancé en montage à chaque temps de cycle.

## 2.4.2 Complexité du problème dans le cas d'un autostockeur

Dans le cas d'un autostockeur, les véhicules arrivant de peinture sont répartis aléatoirement dans les différentes travées afin que le contenu de chaque travée soit représentatif du flux pour que l'influence d'une panne de travée soit limitée. Dans une telle architecture, chaque véhicule est accessible individuellement. Sur une journée de production, la meilleure séquence<sup>1</sup>, compte tenu de la composition du stock, est donc potentiellement faisable. Ce type de buffer, quand il n'y a pas de panne de travée, n'ajoute donc pas de contraintes supplémentaires au problème général.

A chaque temps de cycle, une séquence prévisionnelle de taille  $L$  doit être bâtie. Si le nombre de véhicules présents dans l'autostockeur est  $N$  et si l'on suppose que les véhicules sont tous distincts alors le nombre de séquences différentes, de longueur  $L$ , pouvant être bâties, correspond au nombre d'arrangements de  $N$  objets pris par  $L$  :

$$A_N^L = \frac{N!}{(N-L)!}$$

Si l'on considère un autostockeur contenant 100 véhicules et une séquence prévisionnelle de longueur 10, le nombre de séquences à comparer est donc de l'ordre de  $10^{20}$ . L'exploration exhaustive d'un tel espace de solutions est bien évidemment inconcevable.

Si l'on envisage de bâtir une séquence comprenant l'intégralité des véhicules du stock<sup>2</sup>, le problème est identique à un problème d'affectation à  $N$  tâches. Ce problème est connu pour être NP-complet. Le nombre de séquences à comparer est égal au nombre de permutations de  $N$  objets :  $N!$ .

## 2.4.3 Comparaison avec la complexité dans le cas d'une architecture à tiroirs

Dans les cas d'un buffer constitué de tiroirs en parallèle, les contraintes propres à cette architecture limitent les possibilités de re-séquencement. Le nombre de véhicules accessibles en sortie est limité. Le choix du prochain véhicule qui sera lancé en montage est limité au premier véhicule de chaque tiroir. La combinatoire est plus faible mais le problème s'avère plus délicat à traiter car l'ordre d'entrée des véhicules dans le buffer conditionne fortement l'ordre de sortie.

---

<sup>1</sup> Celle qui respecte le mieux les contraintes d'espacement des différents critères.

<sup>2</sup> Ce problème correspond au problème d'ordonnement prévisionnel statique présenté dans le premier chapitre.

Les véhicules arrivant de peinture peuvent entrer dans n'importe lequel des  $T$  tiroirs en parallèle, à condition que ce tiroir ne soit pas rempli. Comme chaque tiroir est géré en FIFO, le véhicule qui arrive se retrouve en dernière position du tiroir dans lequel il a été affecté. Le choix du véhicule à enligner est évidemment limité et est égal au nombre de tiroirs ( $T$ ). Pour comparer la combinatoire d'une architecture à tiroirs avec celle de l'autostockeur, nous comparerons d'abord le nombre de séquences différentes comprenant l'intégralité des véhicules du buffer que l'on peut bâtir.

### 2.4.3.1 Nombre de séquences possibles

Nous avons vu dans le paragraphe précédent que le nombre d'ordonnements différents comprenant l'intégralité des véhicules présents dans l'autostockeur ( $N$ ) est égal à  $N!$ . Considérons l'architecture à tiroirs de la Figure 2.9.

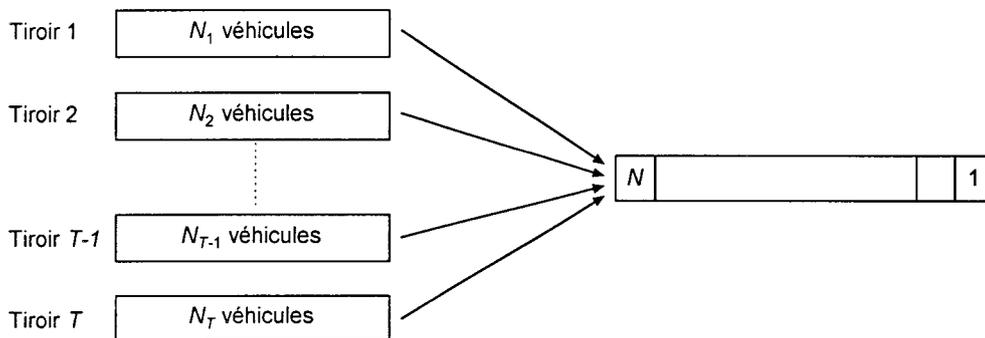


Figure 2.9 - Architecture à tiroirs

Si l'on considère que tous les véhicules présents dans l'architecture sont différents, le nombre de séquences différentes que l'on peut élaborer est :

$$S(N) = \frac{N!}{N_1! N_2! \dots N_T!}$$

Ce nombre est égal au nombre de placements de  $N$  objets distincts et non ordonnés dans  $T$  cases distinctes et non ordonnées [KAU 68].

Ce dénombrement suscite plusieurs remarques :

- A capacité égale, les possibilités de re-séquencement augmentent avec le nombre de tiroirs. Mieux vaut trois tiroirs de dix places ( $S(N) = 5,5 \cdot 10^{12}$ ) que deux de quinze ( $S(N) = 1,5 \cdot 10^8$ ).
- Deux véhicules quelconques appartenant à deux tiroirs différents sont toujours permutable<sup>1</sup>. Par contre, à l'intérieur du tiroir  $t$ , la combinatoire passe de  $N_t!$  à 1.
- Plus les tiroirs sont équilibrés et plus les possibilités de re-séquencement augmentent. Si l'on veut un maximum de possibilités en sortie, il faut que la condition suivante soit remplie :

$$N_1 = N_2 = \dots = N_T$$

- Si on a deux tiroirs contenant  $p$  véhicules pour le premier et  $N-p$  pour le second, le nombre de séquences pouvant être générées est égal au nombre de combinaisons de  $N$  objets pris par  $p$  :

$$S(N) = \frac{N!}{p!(N-p)!} = C_n^p$$

- Si l'on considère le cas limite où l'on a un seul tiroir de  $N$  véhicules, aucun ré-ordonnement n'est possible. L'efficacité est nulle :

$$S(N) = \frac{N!}{N!} = 1$$

- L'autre cas limite pour lequel on a  $N$  tiroirs contenant chacun 1 véhicule correspond évidemment à l'autostockeur :

$$S(N) = \frac{N!}{(1!)^N} = N!$$

Considérons l'exemple suivant :

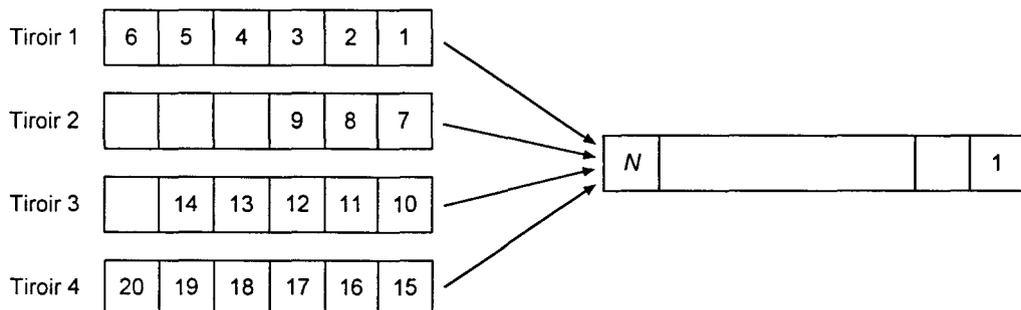


Figure 2.10 - Exemple de construction de séquences prévisionnelles

<sup>1</sup> On peut toujours ordonnancer l'un avant l'autre ou l'inverse.

Le nombre de séquences différentes, comportant l'ensemble des véhicules présents dans le buffer, pouvant être générées est égal à :  $\frac{20!}{6! \times 3! \times 5! \times 6!} = 6,5 \cdot 10^9$ . Ce nombre est à comparer avec les  $20! = 2,4 \cdot 10^{18}$  séquences dans le cas de l'autostockeur. La combinatoire est très fortement réduite. Cependant le nombre de combinaisons restantes est trop important pour envisager une exploration exhaustive de l'espace des solutions.

Il est clair que le problème est beaucoup plus contraint dans le cas d'un buffer composé de tiroirs en parallèle que dans le cas de l'autostockeur. Moins la structure physique du buffer est flexible, moins la combinatoire à explorer est grande et moins la solution générée a de chance d'être bonne. Le problème de re-séquencement des véhicules dans une architecture à tiroirs n'est pas pour autant plus simple que dans un autostockeur et ce pour deux raisons :

- Nous avons vu dans la partie 2 de ce chapitre qu'il était nécessaire d'avoir une séquence prévisionnelle de longueur  $L$  suffisante. Ce regard vers l'avenir empêche la sélection d'un véhicule paraissant optimal vis-à-vis de ce qui a déjà été enligné mais qui dégrade la qualité des solutions futures. Le fait que le nombre de véhicules pouvant être enlignés soit limité dans une architecture à tiroirs rend cette nécessité encore plus impérative. Il est indispensable de se soucier de la qualité des prochaines séquences et la longueur de la séquence prévisionnelle doit être suffisante pour éviter les sous-optimums locaux.
- La qualité des séquences que l'on génère en sortie des tiroirs est évidemment fortement corrélée avec la façon dont les véhicules y sont affectés. Si l'on désire que les véhicules disponibles en sortie ne provoquent pas trop de violation de contraintes en montage, il est nécessaire de s'intéresser au problème d'affectation des véhicules dans les tiroirs.

### 2.4.3.2 Affectation des véhicules dans les tiroirs

L'affectation dans un tiroir d'un véhicule arrivant de peinture conditionne la position que celui-ci peut occuper dans la séquence prévisionnelle. Considérons l'exemple suivant :

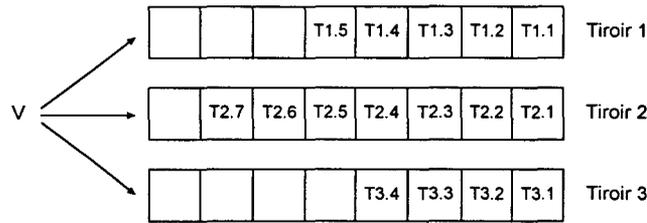


Figure 2.11 - Affectation d'un véhicule en entrée des tiroirs

Le véhicule V peut être affecté dans n'importe lequel des tiroirs car aucun n'est plein. Supposons que la séquence prévisionnelle construite auparavant soit la suivante :

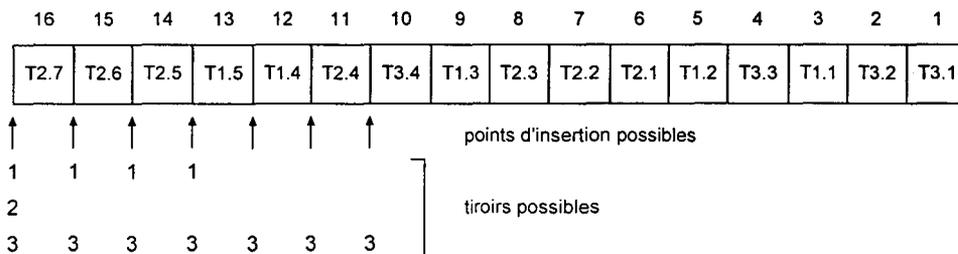


Figure 2.12 - Conséquences du placement d'un véhicule dans la séquence prévisionnelle sur l'affectation

Le véhicule V sera obligatoirement placé derrière l'un des derniers véhicules des trois tiroirs (T1.5, T2.7 ou T3.4). Si l'on veut insérer V avant le 11ème, 12ème ou 13ème véhicule, seule l'affectation dans le 3ème tiroir permet cette insertion. Si on veut insérer V avant le 14ème ou 15ème véhicule, on peut affecter V dans le 1er ou le 3ème tiroir. Enfin, si l'on veut insérer V après le 18ème véhicule, on peut affecter V dans n'importe lequel des trois tiroirs.

Etant donné le nombre très important d'ordonnements différents, il est impossible de déterminer l'affectation de V en fonction de la meilleure séquence globale (i.e. les  $N$  véhicules dans les tiroirs + V). Plusieurs techniques d'affectation sont envisageables : l'utilisation d'une enveloppe ré-ordonnançable, l'équilibrage des critères dans les tiroirs ou encore le classement par richesse. Avant la présentation de ces trois méthodes, nous supposons, ce qui est le cas pratiquement, que nous connaissons les prochains véhicules qui arrivent du processus de peinture. L'entrée dans le buffer ne concerne donc plus un seul véhicule mais un certain nombre  $N_p$ .

- *Enveloppe ré-ordonnançable*

Comme nous l'avons vu, il est impossible de toujours re-séquencer l'ensemble des véhicules présents dans le stock lorsque des décisions d'entrée doivent être prises. Une solution est de considérer qu'une partie des

véhicules du buffer est déjà ordonnancée et que cet ordre n'est plus remis en cause. L'autre partie est constituée de véhicules dont la position dans la séquence prévisionnelle peut changer. Cette partie des véhicules constitue l'enveloppe ré-ordonnançable.

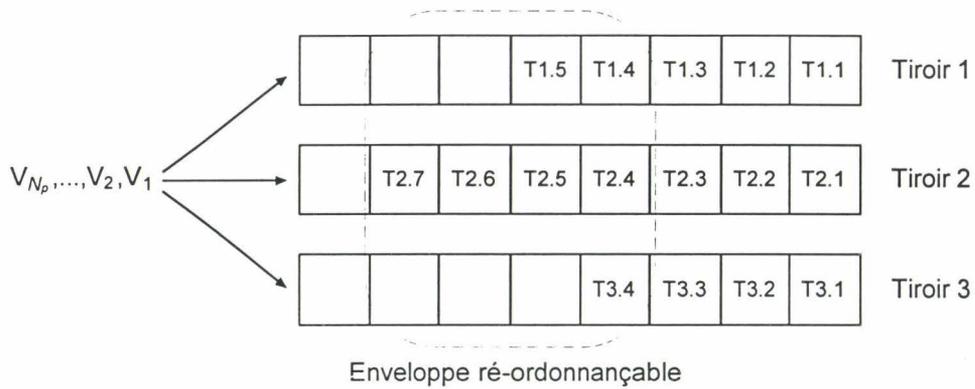


Figure 2.13 - Exemple d'enveloppe ré-ordonnançable

Le re-séquencement d'une seule partie du stock permet de limiter l'effort de calcul. La taille de l'enveloppe ré-ordonnançable et le nombre de véhicules pris en compte en entrée ( $N_p$ ) constituent des paramètres que l'on peut régler en fonction du temps imparti. L'algorithme de sortie est dans ce cas trivial car il suffit de sélectionner le premier véhicule de la liste prévisionnelle.

Il est également important que la procédure construite des séquences prévisionnelles qui soient compatibles avec l'architecture du buffer de re-séquencement. Il est en effet possible qu'une séquence prévisionnelle ne puisse pas être respectée à cause des contraintes physiques de l'architecture à tiroirs. Considérons l'exemple suivant :

Six véhicules arrivent de peinture ( $N_p = 6$ ). Supposons que la fin de la séquence prévisionnelle calculée soit : ... -  $V_1$  -  $V_2$  -  $V_3$  -  $V_4$  -  $V_5$  -  $V_6$ . Comme deux véhicules d'un même tiroir ne peuvent se doubler, les véhicules doivent être placés dans un ordre croissant dans chaque tiroir. L'ordre dans lequel les véhicules arrivent de peinture ( $V_2$  -  $V_6$  -  $V_3$  -  $V_5$  -  $V_4$  -  $V_1$ ) et les contraintes physiques des tiroirs ne permettent pas de respecter la séquence calculée. Le véhicule  $V_1$  est forcément placé derrière un véhicule et ne pourra donc pas être comme prévu le premier véhicule enligné. La séquence calculée est donc inapplicable (cf. Figure 2.14). Il apparaît nécessaire de construire à chaque fois des séquences prévisionnelles en tenant compte des contraintes physiques du buffer.

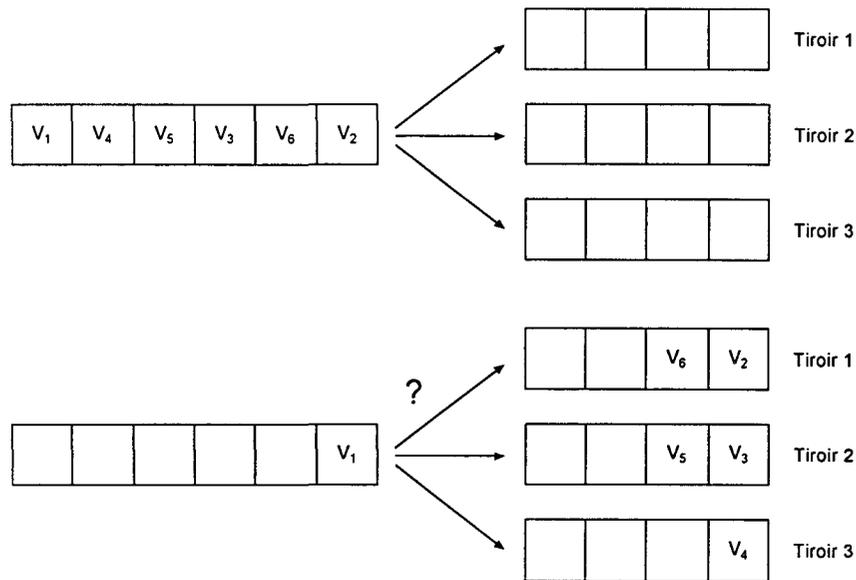


Figure 2.14 - Influence de l'architecture sur la faisabilité de la séquence prévisionnelle

L'inconvénient de cette méthode apparaît quand un des tiroirs est vide. Un véhicule arrivant peut alors en principe sortir très rapidement du buffer, mais l'existence de l'enveloppe déjà ordonnancée l'en empêche. Cela peut être gênant si ce véhicule correspond exactement au type de véhicule permettant de respecter au mieux les espacements en montage. On se prive « bêtement » d'une bonne solution. Une solution possible est d'utiliser une enveloppe de taille variable qui tienne compte du véhicule occupant la dernière place d'un des tiroirs le mieux placé dans la séquence prévisionnelle. L'inconvénient de cette approche est que, comme la taille de l'enveloppe est variable, le temps de calcul l'est également. Si un des tiroirs est vide, il est par exemple nécessaire de re-séquencer tout le stock.

- *Équilibrage des critères dans les tiroirs*

Une autre solution consiste à répartir uniformément les critères entre les différents tiroirs. L'objectif de cette stratégie est d'avoir un choix varié et équilibré en sortie des tiroirs. Les véhicules sont affectés afin que les différents critères, notamment les plus critiques, soient répartis uniformément dans chaque tiroir. L'intérêt de cette méthode réside dans le fait qu'elle ne nécessite pas de calculs importants et permet donc d'utiliser pleinement le temps imparti pour le calcul de la séquence de sortie des véhicules. Cependant quand la qualité du flux est dégradée, cette méthode montre rapidement ses limites. De plus, même si cette méthode donne des résultats moyens corrects, la qualité des solutions est relativement variable au cours du temps. Il est possible qu'à un moment, la qualité du flux nécessite un rangement unique et particulier. Si les véhicules sont affectés

différemment, la qualité de la séquence construite en sortie peut être très inférieure à ce qu'elle aurait potentiellement pu être avec l'affectation adéquate.

- *Classement par richesse*

Une dernière approche consiste à pré-affecter les critères à lisser à des tiroirs donnés en fonction de la difficulté que leurs présences induisent au montage. Les différents critères sont donc classés en fonction de leur 'poids'. Un critère lourd est un critère qui pose des problèmes en montage car il crée, par exemple, des surcharges sur de nombreux postes de travail. A l'inverse un critère léger ne pose absolument pas de problème. Ainsi si le classement par poids des critères est le suivant :

Critère	Poids
ABS	Lourd
Boîte automatique	Lourd
Climatisation	Moyen
Turbo diesel	Moyen
Toit ouvrant	Léger

Tableau 2-3 - Classement des critères en fonction de la difficulté de montage

et que le nombre des tiroirs est égal à trois, on a une affectation de ce type :

Tiroir	Critères
Tiroir n°1	ABS, Boîte automatique
Tiroir n°2	Climatisation, Turbo Diesel
Tiroir n°3	Toit ouvrant

Tableau 2-4 - Pré-affectation des critères aux tiroirs

Si un véhicule présente plus d'un critère, il est affecté dans le tiroir auquel est pré-affecté son critère le plus lourd. Dans cette méthode, comme dans la précédente, tout l'effort de calcul est reporté en sortie des tiroirs.

### 2.4.3.3 Conclusion

Même si la combinatoire est réduite dans le cas d'une architecture à tiroirs, le problème de re-séquencement n'en est pas pour autant simplifié car il faut prendre en compte à la fois la sortie et l'entrée des véhicules dans les tiroirs. Plusieurs méthodes d'affectation ont été proposées, certaines découplant l'entrée et la sortie, d'autres les faisant

communiquer. Ces méthodes d'affectation des véhicules en entrée des tiroirs nécessitent d'être plus approfondies et elles font d'ailleurs l'objet d'études de la part de Baratou dans le cadre d'une thèse sous convention CIFRE [BAR 97].

## 2.5 Conclusion

Le problème industriel du re-séquencement des véhicules en entrée montage est un problème combinatoire de grande taille car le buffer de re-séquencement peut contenir plusieurs centaines de véhicules. De plus les données et certaines contraintes du problème sont dynamiques :

- des véhicules arrivent dans le stock et à chaque temps de cycle un véhicule est engagé en montage (contrainte de cadence).
- les contraintes de pannes, de limitations et de ruptures apparaissent brutalement puis lorsqu'elles sont résolues, disparaissent.

La modélisation du flux des véhicules qui a été choisie permet de bâtir une fonction de coût pénalisant le non-respect de l'espace des critères. La résolution du problème revient à minimiser à chaque temps de cycle cette fonction de coût. La méthode utilisée pour résoudre ce problème NP-difficile dynamique doit permettre de bâtir rapidement de bonnes séquences prévisionnelles afin que les différents objectifs de production soient atteints.

Le prochain chapitre s'intéresse aux différentes méthodes de résolution envisageables pour traiter efficacement le problème de re-séquencement afin que la charge de travail des différents postes de la ligne soit lissée et que les taux de consommation des pièces soient constants pour que les objectifs de production soient respectés en qualité et en volume et que les coûts de production soient réduits.



## CHAPITRE 3

---

# APPROCHES DE RÉOLUTION



# Chapitre 3

## Approches de résolution

---

### 3.1 Introduction

Le problème du re-séquencement d'une ligne d'assemblage à modèles mélangés est un problème trop difficile<sup>1</sup> pour qu'on puisse espérer trouver un algorithme rapide permettant de le résoudre de façon exacte. Il n'est pas raisonnable, bien que leur nombre soit fini, d'énumérer toutes les solutions afin de retenir la meilleure. Tous les algorithmes exacts nécessitent un temps de calcul trop important pour qu'il soit envisageable de les employer pratiquement. L'utilisation d'une méthode heuristique s'avère être nécessaire. Bien que ces méthodes approchées d'optimisation combinatoire ne garantissent pas l'optimalité des solutions fournies, elles sont efficaces pour traiter de nombreux problèmes d'ordonnancement où une bonne solution suffit, ce qui est ici le cas. Les méthodes que nous avons envisagées pour résoudre le problème de re-séquencement de la ligne d'assemblage à modèles mélangés peuvent être classées en trois types : les méthodes par voisinage, les méthodes liées à l'intelligence artificielle et les méthodes arborescentes.

#### 1. Méthodes par voisinage

- Descente Stochastique
- Recuit Simulé
- Méthode Tabou

#### 2. Méthodes liées à l'intelligence artificielle

- Système Expert
- Programmation Logique sous Contraintes
- Algorithmes Génétiques

---

<sup>1</sup> C'est un problème NP-difficile.

### 3. Méthodes arborescentes

- Méthode par Séparation et Evaluation
- Recherche par Faisceau
- Construction Progressive

La construction progressive n'est pas à proprement parler une méthode arborescente puisqu'elle consiste à chaque temps de cycle à sélectionner le meilleur véhicule accessible présent dans le buffer de re-séquencement. Nous considérons en fait que cette méthode est un cas particulier de méthode arborescente où un seul niveau est à chaque fois considéré.

La première partie de ce chapitre présente chacune des méthodes envisageables ainsi qu'une analyse critique de celles-ci dans le cadre de notre problème de re-séquencement. La mise en œuvre des deux méthodes que nous retiendrons est décrite dans la seconde partie.

## 3.2 Approches de résolution envisageables

### 3.2.1 Méthodes par voisinage

#### 3.2.1.1 Conséquences sur la méthode de re-séquencement

Les méthodes par voisinage, également appelées méthodes par affinements successifs sont des méthodes heuristiques qui partent d'une solution initiale du problème et qui tentent de l'améliorer en générant une solution voisine de la solution de départ. Ces méthodes réalisent un calcul itératif de la solution par des modifications élémentaires de faibles coûts. Une modification élémentaire peut être définie comme suit :

*On appelle modification toute opération permettant de changer une solution  $X$  de l'ensemble des solutions  $S$  en une autre solution  $X'$  de  $S$ . Une modification est considérée comme élémentaire si elle ne modifie que faiblement la structure de la solution à laquelle on l'applique [CHA 96].*

Le voisinage d'une solution peut alors être défini :

*Etant donné une modification élémentaire, le voisinage  $V(X)$  d'une solution  $X$  est l'ensemble des solutions que l'on peut obtenir en appliquant à  $X$  cette modification élémentaire [CHA 96].*

Plusieurs types de modifications élémentaires sont fréquemment mis en œuvre dans les méthodes par voisinage :

- \* la permutation, qui consiste à intervertir deux éléments de la solution,
- \* l'insertion, qui consiste à choisir deux positions  $a$  et  $b$  et à insérer l'élément occupant la position  $a$  en position  $b$  puis à décaler d'un cran les éléments se trouvant entre ces deux positions.
- \* l'inversion, qui consiste à choisir deux positions  $a$  et  $b$  et à inverser l'ordre des éléments situés entre ces deux positions.

Pour que les méthodes par voisinage soient efficaces, il faut que ces modifications élémentaires soient simples car il est nécessaire de pouvoir évaluer rapidement les conséquences de chaque modification afin que de nombreuses modifications puissent être tentées.

Plusieurs heuristiques peuvent être qualifiées de méthodes par voisinage :

- \* la descente stochastique qui cherche une solution voisine améliorante,
- \* le recuit simulé qui utilise des règles probabilistes,
- \* la méthode Tabou qui choisit le meilleur élément du voisinage.

Le recuit simulé et la descente stochastique sont des algorithmes stochastiques et sans mémoire tandis que la méthode Tabou est une méthode déterministe et possédant une mémoire.

Ces méthodes sont des heuristiques, cependant les résultats obtenus peuvent être très bons même pour des problèmes combinatoires de grande taille. Il est toutefois nécessaire de bien maîtriser certains paramètres d'évolution. Ces paramètres sont les suivants [CHE 94] :

- \* le choix de la solution initiale,
- \* le choix de la méthode de génération des solutions voisines,
- \* le critère d'acceptation de la solution,
- \* le critère d'arrêt.

Les trois méthodes par voisinage (descente stochastique, recuit simulé et méthode Tabou) sont décrites et critiquées dans les paragraphes suivants.

3.2.1.2 Descente stochastique

- *Présentation de la méthode*

La descente stochastique, également appelée amélioration itérative, est la méthode de voisinage la plus simple à mettre en œuvre. Elle consiste à n'accepter que les modifications élémentaires qui améliorent la solution courante. Son principe est le suivant :

A partir de la solution initiale qui constitue la solution courante ( $S$ ), une solution voisine ( $S'$ ) est générée grâce à une modification élémentaire. Cette solution est évaluée à l'aide d'une fonction de coût et si son coût est inférieur à celui de la solution courante, on remplace  $S$  par  $S'$ . Si son coût est supérieur, une autre solution voisine est générée. Le processus est itéré jusqu'à ce qu'il n'y ait plus aucune amélioration de la qualité de la solution pendant un certain temps. Voici l'organigramme de l'algorithme de descente stochastique :

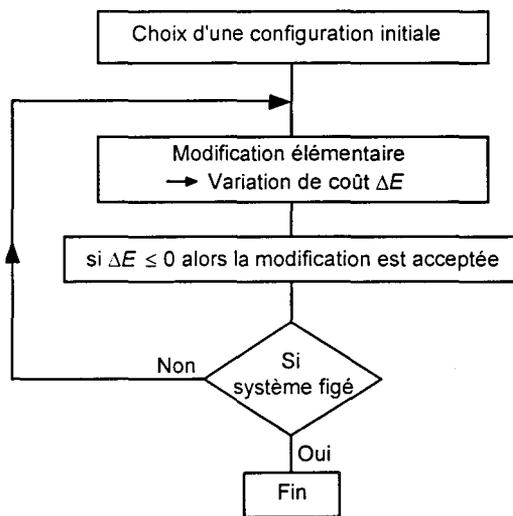


Figure 3.1 - Organigramme de la descente stochastique

- *Critique de la descente stochastique*

La descente stochastique présente les inconvénients des méthodes du gradient quand l'espace de recherche n'est pas convexe. Elle permet d'obtenir rapidement une solution mais la qualité de celle-ci dépend uniquement de la configuration initiale. Malheureusement, il n'existe pas de technique permettant de trouver de bonnes solutions initiales ayant de grandes probabilités d'atteindre l'optimum.

L'inconvénient de la descente stochastique est donc qu'elle conduit la plupart du temps à un minimum local (Figure 3.2). Ce minimum local correspond à la meilleure solution accessible à partir de la solution initiale.

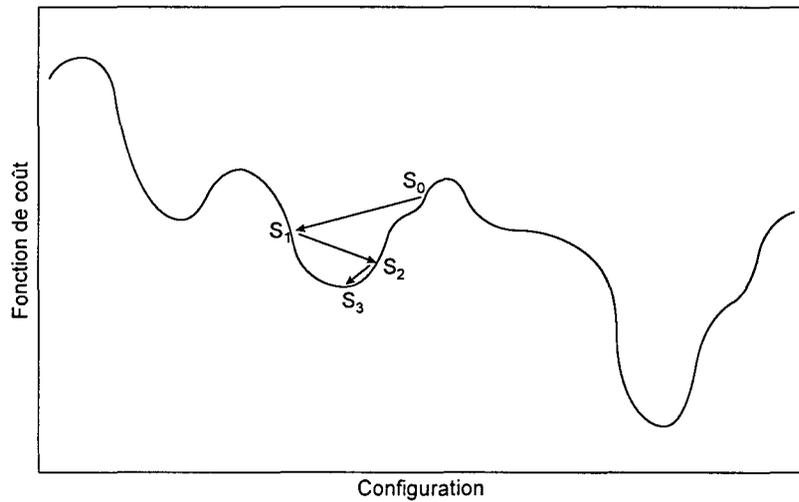


Figure 3.2 - Recherche de la solution par descente stochastique

Pour augmenter les chances d'aboutir au minimum global, il est possible de réaliser plusieurs descentes sur des solutions initiales différentes et de garder la meilleure solution obtenue. Si  $r$  est la probabilité qu'une séquence initiale atteigne l'optimum par application de la méthode et si  $S$  est le nombre de solutions initiales à générer pour avoir une probabilité  $P$  qu'au moins une d'entre elles atteigne la solution optimale, on a [OKA 79] :

$$S = \frac{\log (1 - P)}{\log (1 - r)}$$

La probabilité  $r$  est difficile à évaluer, mais pour avoir un ordre de grandeur, supposons que  $r$  soit égal à une chance sur un million et que l'on désire avoir la solution optimale avec une probabilité  $P = 0,95$ , alors il faut générer près de 3 millions de séquences initiales.

L'exécution de l'algorithme sur un grand nombre de configurations initiales permet d'améliorer l'efficacité de la méthode mais la probabilité de trouver la solution optimale reste faible et cela augmente sensiblement le temps de calcul.

Afin d'éviter d'être piégé dans un minimum local, il peut être envisageable d'accepter, sous certaines conditions, des modifications qui dégradent la solution. C'est le principe de l'algorithme du recuit simulé.

### 3.2.1.3 Recuit simulé

- *Présentation de la méthode*

Le recuit simulé est une méthode d'optimisation qui a été créée en 1982 par trois chercheurs d'IBM, Kirkpatrick, Gelatt et Vecchi [KIR 83] dans le but d'éviter les minima locaux. Cette méthode est fondée sur une analogie thermodynamique. Pour obtenir un état solide ordonné d'énergie minimale, les physiciens portent le matériau à l'état liquide. Dans cet état, les particules sont dans un état d'énergie élevée. Le matériau est ensuite refroidi très lentement par paliers successifs afin que les particules s'ordonnent dans un état de basse énergie. Si le refroidissement se fait brusquement, les particules ne se cristallisent pas en état d'énergie minimale mais se trouvent sous forme de polycristal à énergie plus élevée. Afin d'atteindre l'état d'énergie minimale, l'idée essentielle est donc la lenteur du refroidissement, laissant ainsi le temps aux particules de se repositionner les unes par rapport aux autres.

La méthode du recuit simulé repose sur cette technique issue de la métallurgie ainsi que sur les travaux du physicien Boltzmann et sur un algorithme découvert en 1953, appelé algorithme de Metropolis. Le principe du recuit simulé consiste à minimiser une fonction de coût au lieu d'une énergie, dans le recuit réel. La température  $T$  est le paramètre qui permet de contrôler le nombre d'états accessibles. Si la température est abaissée suffisamment lentement afin que, pour chaque valeur de  $T$ , un équilibre soit atteint, c'est-à-dire que la fonction de coût varie peu, alors l'état de plus basse énergie, l'optimum global, a des chances d'être atteint.

L'algorithme du recuit simulé s'appuie sur le résultat de physique statistique suivant : la probabilité qu'un système physique, se trouvant dans un état d'équilibre à une température  $T$ , possède une énergie  $E$  est proportionnelle au facteur de Boltzmann :  $\exp(-E/k_B T)$ , où  $k_B$  est la constante de Boltzmann. Pour simuler l'évolution du système vers son équilibre thermodynamique à une température  $T$ , Metropolis a proposé un algorithme. Le principe de cet algorithme est de faire subir au système une modification élémentaire. Si cette modification permet d'abaisser l'énergie du système, elle est acceptée. Par contre, si la transformation provoque une augmentation de l'énergie, elle est acceptée avec une probabilité  $\exp(-\Delta E/k_B T)$ , où  $\Delta E$  est la différence d'énergie entre l'état perturbé et l'état courant. Ce critère est connu sous le nom de critère d'acceptation de Metropolis. La séquence de configurations engendrée par l'application itérative de ce critère constitue en fait une chaîne de Markov car chaque configuration ne dépend que de la précédente [SIA 89]. Quand cette chaîne est de

longueur suffisante, le système se rapproche de l'équilibre à la température considérée<sup>1</sup>. En théorie, une chaîne de longueur infinie atteint même l'équilibre thermodynamique. Le rôle de la température dans le critère de Metropolis est important. Les modifications qui augmentent l'énergie sont acceptées avec d'autant plus de réticences que la température est faible. A haute température,  $\exp(-\Delta E/k_B T)$  est voisin de 1, pratiquement toutes les modifications sont tolérées, mais à basse température,  $\exp(-\Delta E/k_B T)$  est voisin de 0 et on n'accepte pratiquement que celles qui réduisent l'énergie. Quand la température est fixée à zéro, la procédure de recuit simulé correspond donc à une descente stochastique. Les modifications qui accroissent l'énergie sont tolérées dans l'espoir d'échapper aux minima locaux et d'atteindre le minimum global (cf. Figure 3.3).

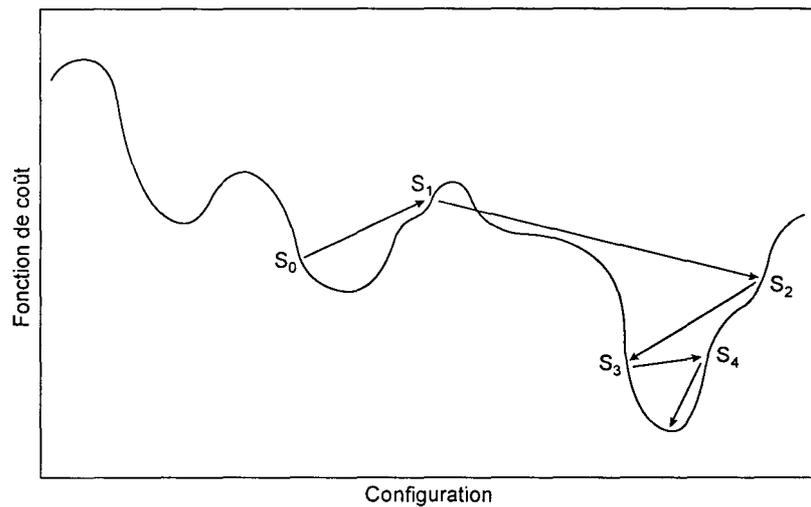


Figure 3.3 - Recherche de la solution par recuit simulé

L'algorithme du recuit simulé est donc une séquence d'algorithmes de Metropolis effectuée selon une loi de décroissance de la température. La transposition de la physique statistique à la résolution des problèmes d'optimisation repose sur les équivalences suivantes :

- \* les états du solide deviennent les configurations du problème,
- \* la fonction énergie devient la fonction de coût du problème,
- \* la température devient un paramètre de contrôle également appelé température,
- \* l'objectif d'atteindre l'état de plus basse énergie devient celui de trouver la configuration optimale.

Voici l'énoncé formel de l'algorithme du recuit simulé [SIA 89] :

<sup>1</sup> Propriété d'ergodicité.

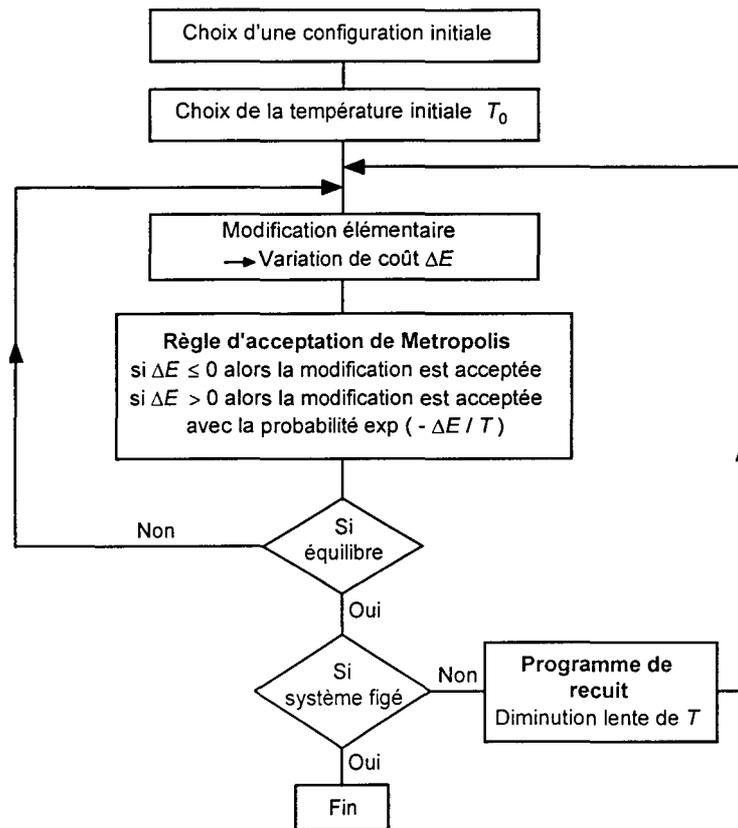


Figure 3.4 - Organigramme de l'algorithme du recuit simulé

Le recuit simulé est contrôlé par quatre paramètres principaux qu'il faut régler, on appelle cela fixer le plan du recuit. Ces quatre paramètres sont les suivants :

- \* la valeur initiale de la température,
- \* le critère d'arrêt de l'algorithme,
- \* la longueur des chaînes de Markov, i.e. la longueur des paliers de température constante,
- \* la loi de décroissance de la température.

Il existe de nombreux plans de recuit. On peut trouver un tableau récapitulatif des principaux plans dans la thèse de Chevalier Milhe [CHE 94].

• *Conditions de convergence théorique du recuit simulé*

La condition de convergence vers l'optimum global dépend fortement de la notion de voisinage entre les configurations. Deux conditions doivent être respectées :

- \* la réversibilité : l'inversion de toute modification doit être permise,

- \* la connexité : toute configuration peut être atteinte à partir de n'importe quelle autre après un certain nombre de modifications.

Si ces conditions sont vérifiées et si les différents paramètres sont bien réglés, l'algorithme du recuit simulé converge vers l'optimum global avec une probabilité égale à 1 [HAJ 88]. Si les conditions sont vérifiées et si chaque calcul élémentaire de  $\Delta E$  est suffisamment rapide pour pouvoir tenter un grand nombre de modifications, on peut obtenir des résultats particulièrement probants.

- *Critique de la méthode de recuit simulé*

Comme le note Siarry [SIA 89], l'avantage de la méthode du recuit simulé est qu'elle permet d'obtenir une solution de bonne qualité et que c'est une méthode facilement applicable.

Les inconvénients majeurs sont relatifs au réglage des différents paramètres. De ces réglages dépendent l'efficacité de la méthode et la maîtrise du temps de calcul afin qu'il ne soit pas excessif. Bien que de nombreux plans de recuit existent et que des travaux théoriques fournissent une aide au réglage des paramètres, cette phase présente un caractère quelque peu empirique. Ces réglages peuvent poser quelques problèmes pour l'implantation d'une méthode de re-séquencement d'une ligne de montage automobile à base de recuit simulé. Il semble par exemple délicat d'adapter le plan de recuit à chaque changement du mix des véhicules. L'optimalité n'est donc pas garantie, mais une bonne solution suffit et le recuit simulé présente un compromis intéressant entre la qualité des solutions et le temps de calcul.

#### 3.2.1.4 Méthode Tabou

- *Présentation de la méthode*

La méthode Tabou est une méthode d'optimisation combinatoire qui a été développée par Glover à la fin des années 80 [GLO 89][GLO 90]. Le processus fondamental par lequel la méthode Tabou cherche à dépasser l'optimalité locale est l'introduction d'un ensemble de règles qui rendent certains mouvements interdits, tabous. La méthode Tabou consiste à mémoriser une partie des configurations déjà visitées et à interdire le retour vers celles-ci pendant un certain nombre d'itérations. On espère ainsi que l'algorithme aura suffisamment de temps pour sortir des minima locaux.

Le principe général de la méthode Tabou est le suivant :

A partir de la configuration courante, l'ensemble des configurations voisines est généré et la meilleure configuration appartenant à cet ensemble est choisie. Cette solution est acceptée ou rejetée grâce à deux mécanismes de contrôle : la file tabou et le critère d'aspiration.

\* la file tabou

Afin de ne pas revenir sur des configurations déjà explorées, une sous-liste, appelée file tabou, mémorise les solutions déjà acceptées précédemment comme solutions courantes. La longueur de cette file est bien évidemment limitée car la mémorisation de toutes les configurations explorées et de leurs fonctions de coûts consomme trop de place mémoire et trop de temps de calcul puisqu'il faut comparer chaque configuration voisine à chaque élément de la file tabou. Une solution possible pour ne pas être obligé de garder en mémoire trop de configurations explorées, est de conserver la modification élémentaire qui a permis de passer de la configuration courante à la configuration voisine. Ce ne sont plus désormais les configurations qui sont tabous, ce sont les modifications élémentaires. Cela limite la place mémoire nécessaire mais cela appauvrit le voisinage car en rendant tabous certaines modifications, on s'interdit l'exploration de certaines configurations.

La taille de la file apparaît comme étant un paramètre important car si elle est trop petite, on risque de boucler, et si elle est trop grande, le voisinage est appauvri et le temps de calcul augmente considérablement.

\* le critère d'aspiration

Il est parfois souhaitable de retourner dans une configuration  $S'$  déjà explorée, bien que celle-ci soit tabou, afin d'explorer un nouveau voisinage plus intéressant de cette configuration. Le critère d'aspiration permet de lever la statut tabou d'une solution  $S'$  voisine de  $S$  si la condition suivante est vérifiée :  $f(S') \leq A \cdot f(S)$  où  $A$  est un nombre réel et où  $f$  est la fonction de coût. La configuration  $S'$  devient donc candidate lors de la sélection du meilleur voisin de  $S$  [HER 94].

L'algorithme s'arrête quand on a effectué un grand nombre d'itérations sans amélioration ou quand le sous-ensemble des configurations admissibles<sup>1</sup> du voisinage de la solution courante est épuisé. Dans ce cas, Glover suggère de relancer la procédure en utilisant alternativement deux types de mémorisation [CHE 94] :

---

<sup>1</sup> Les configurations n'appartenant pas à la file tabou ou vérifiant le critère d'aspiration.

\* la mémoire à moyen terme

La mémoire à moyen terme enregistre la fréquence des modifications qui ont permis de trouver des configurations qui ont été acceptées. Si on relance l'algorithme en appliquant à la dernière solution obtenue les modifications élémentaires les plus fréquentes, on intensifie la recherche dans la région qui a fourni la meilleure configuration.

\* la mémoire à long terme

La mémoire à long terme a pour objectif de guider la recherche vers les régions non encore explorées. Une solution possible pour atteindre cet objectif est de mémoriser les minima locaux rencontrés et de relancer la recherche à partir de ces minima.

L'organigramme de la méthode Tabou est présenté sur la Figure 3.5.

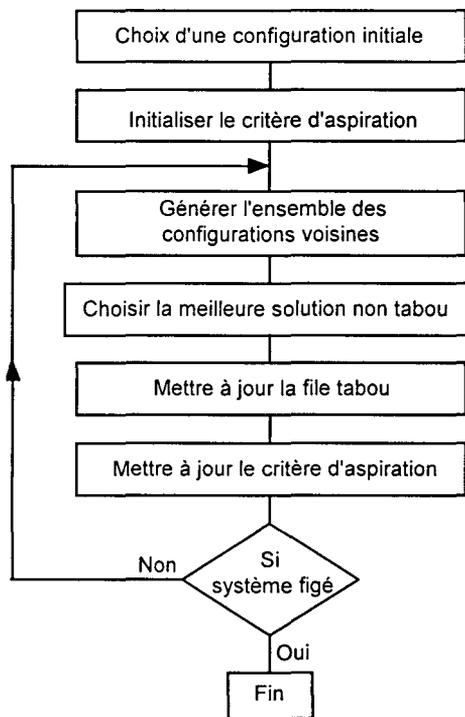


Figure 3.5 - Organigramme de la méthode Tabou

- *Critique de la méthode Tabou*

Bien que la méthode Tabou possède un mécanisme intéressant pour surmonter l'optimalité locale et qu'elle présente peu de paramètres à régler, sa mise en œuvre peut poser quelques problèmes quand le voisinage d'une configuration est très vaste. En effet, contrairement au recuit simulé qui ne s'intéresse qu'à un seul voisin à la fois, la méthode Tabou nécessite d'explorer de façon exhaustive le voisinage. Si le cardinal de ce voisinage est élevé, le nombre de solutions à explorer et à évaluer est alors trop important. Dans notre problème où le buffer de re-séquencement a classiquement une taille supérieure à 100, il est impossible d'essayer toutes les modifications élémentaires possibles pour sélectionner la meilleure. La combinatoire est trop importante. De plus la mémorisation des configurations déjà visitées est un processus gourmand en espace mémoire quand le problème considéré est un problème de grande taille. La vérification de la présence ou non de chaque configuration générée dans la liste tabou exige également un temps de calcul important. La méthode Tabou semble donc difficilement exploitable dans le cadre de notre problème de re-séquencement d'une ligne d'assemblage à modèles mélangés.

## 3.2.2 Méthodes liées à l'intelligence artificielle

### 3.2.2.1 Introduction

Des méthodes telles que les Systèmes Experts ou la Programmation Logique sous Contraintes sont des méthodes d'Intelligence Artificielle qui peuvent être appliquées aux problèmes de combinatoire et d'ordonnement NP-complets afin de restreindre ou de retarder l'explosion combinatoire. Elles ont notamment été appliquées au problème hautement combinatoire du séquencement statique des lignes de production automobile. Ce problème a même été présenté comme un challenge pour les méthodes liées à l'Intelligence Artificielle sous l'appellation 'Car Sequencing Problem' (C.S.P.). Une autre classe de méthodes liées à l'intelligence artificielle est constituée par les algorithmes génétiques. Ce sont des algorithmes aléatoires comme la descente stochastique ou le recuit simulé, mais ils n'utilisent pas la notion de voisinage mais les théories de l'évolution pour faire progresser une population de solutions.

### 3.2.2.2 Systèmes Experts

- *Présentation de la méthode*

Les Systèmes Experts sont apparus dans les années 70. La technique employée par de nombreux Systèmes Experts est la déduction à base de règles. La connaissance d'un expert humain est représentée à l'aide d'un ensemble de règles très simples à partir duquel sont déduites des conclusions expertes grâce au moteur d'inférence. La séparation entre les connaissances spécifiques d'un domaine et de leurs mécanismes d'interprétation permet aux Systèmes Experts d'être simples à mettre en œuvre et à faire évoluer. Le problème essentiel du développement consiste à recueillir et à synthétiser sous forme de règles les connaissances utilisées par les experts humains. Les Systèmes Experts permettent d'informatiser des tâches telles que le diagnostic ou l'aide à la décision. Ils sont également parfois utilisés pour piloter des systèmes ou pour résoudre des problèmes d'ordonnements dynamiques [NIL 88][CAU 93].

- *Critique des systèmes experts*

Bien que les règles du re-séquencement aient été clairement identifiées dans le chapitre précédent, la difficulté du problème est telle que l'approche Système Expert semble peu prometteuse pour le cas que nous étudions. En effet, comme nous l'avons vu dans le premier chapitre, le re-séquencement en entrée de l'atelier de montage est traditionnellement réalisé par un expert humain et celui-ci ne peut prendre en compte toutes les données et ne traite donc le problème que très approximativement. En outre, les données mises en jeu sont des données quantitatives et non qualitatives. De plus, la durée du temps d'inférence peut être très variable d'une configuration à expertiser à une autre et peut ne pas être compatible avec le temps de réaction admissible. C'est le principal inconvénient des Systèmes Experts temps réel. A l'heure actuelle, les réalisations opérationnelles de conduite dynamique de process par Systèmes Experts concernent d'ailleurs plutôt des processus continus dont le temps de réaction est lent. En conclusion, une solution de type Système Expert au problème de re-séquencement ne paraît pas être efficace.

### 3.2.2.3 Programmation Logique sous Contraintes

- *Présentation de la méthode*

L'idée de combiner la Programmation Logique et les techniques de contrôle de consistance de contraintes est une idée intéressante. L'intérêt de l'introduction des contraintes dans la Programmation Logique est de pouvoir utiliser des outils mathématiques tels que le simplexe pour résoudre les contraintes numériques et l'utilisation des techniques telles que la propagation de contraintes pour réduire a priori l'espace de recherche au lieu de les utiliser comme tests.

La Programmation Logique permet une représentation symbolique des informations. La sémantique déclarative permet de décrire très précisément les problèmes. On n'a alors pas besoin de connaître la manière de les résoudre. L'interprète du langage cherche des solutions qui satisfont la description du problème. L'inconvénient de cette approche est qu'elle utilise en fin de compte un algorithme de type « générer-tester » qui rend la procédure de recherche inefficace pour les problèmes de grande taille. En effet, la Programmation Logique manipule des informations symboliques mais ne peut que difficilement manipuler les nombres. Cette incapacité ne permet pas de détecter rapidement les solutions incohérentes. Comme le note Varnier [VAR 96], '*ceci amène la procédure de résolution à explorer des espaces de recherche dans lesquels on aurait pu identifier facilement qu'il n'existait pas de solutions*'.

La Programmation Logique sous Contraintes est une généralisation de la Programmation Logique. Elle permet de voir l'unification comme un mécanisme de résolution de contraintes sur un domaine de calcul particulier et d'introduire de nouveaux domaines de calcul [JAF 86][DIN 88][LEF 93].

Les langages de Programmation Logique sous Contraintes introduisent de l'arithmétique dans la Programmation Logique afin d'améliorer son efficacité. Les contraintes numériques que peuvent manipuler les langages de Programmation Logique sous Contraintes permettent par exemple de prendre en compte les contraintes d'espacement des critères et de réduire l'espace de recherche grâce au test de consistance et à la propagation de contraintes.

Supposons par exemple une contrainte de la forme 'pas plus de  $k_c$  véhicules avec le critère  $c$  parmi  $n_c$  véhicules consécutifs'. Soit  $V_{cp}$  une variable égale à 1 si le véhicule occupant la position  $p$  de la séquence présente le critère  $c$  et égale à 0 dans le cas contraire. La contrainte d'espacement peut être exprimée sous la forme de la contrainte numérique suivante :

$$V_{cp} + V_{c,p+1} + \dots + V_{c,p+n_c} \leq k_c$$

La Programmation Logique sous Contraintes permet donc de simplifier grandement la déclaration du problème tout en ayant une efficacité permettant de résoudre des problèmes de tailles industrielles. Cette efficacité provient de la capacité de cette approche à utiliser simultanément des contraintes numériques et des contraintes symboliques afin de réduire rapidement l'espace de recherche. Les contraintes, traitées au niveau global, permettent l'identification rapide des solutions. Alors qu'en Programmation Logique, on choisit, à chaque point de choix, une branche locale à explorer, la résolution de contraintes consiste au contraire à se demander ce qu'on peut déduire sur toutes les variables lorsque l'on fait un choix. Les langages de Programmation sous Contraintes les plus connus sont : Prolog III, Prolog IV, CHIP ou encore Ilog Solver.

- *Critique de l'approche par Programmation Logique sous Contraintes*

La Programmation Logique sous Contraintes a déjà été utilisée pour résoudre le problème de séquençement des lignes d'assemblage automobile. Cette technique permet de spécifier et de résoudre efficacement des problèmes de grande taille. Le 'Car Sequencing Problem' est même devenu un des benchmarks de la Programmation sous Contraintes. Cependant la description de ce problème statique est souvent simplifiée et peu en rapport avec la réalité industrielle. Comme le notent Chew et al. [CHE 91], certaines contraintes du problème sont des contraintes dures alors que d'autres correspondent à des préférences. Dans la résolution des problèmes sous contraintes, la seule façon de rendre possible la découverte de bonnes solutions, dans le cas où il n'existe pas de solutions respectant toutes les contraintes, est de relaxer les contraintes jusqu'à ce qu'une solution acceptable soit trouvée. La relaxation de contraintes s'avère délicate à réaliser dans le cas du problème de séquençement de lignes automobiles. Supposons que l'on constate une violation d'espacement d'un critère  $c$ . Pour cette simple violation d'un espacement, il est nécessaire de relaxer une classe entière de contraintes. Si la contrainte était 'pas plus de  $k_c$  véhicules avec critère parmi  $n_c$  véhicules consécutifs, la contrainte devient 'pas plus de  $k_c + 1$  véhicules parmi  $n_c$ '. En relaxant toutes les contraintes de la même classe, la solution peut être très détériorée. L'introduction de contraintes floues dans les méthodes de PLC semble être une approche prometteuse pour contourner ce problème.

Un autre inconvénient présenté par les méthodes de résolution utilisant la PLC est que celles-ci sont guidées par les contraintes. Le temps de calcul est par conséquent très variable car les changements de contraintes sont fréquents.

L'utilisation de la Programmation Logique sous Contraintes pour un problème de re-séquencement de lignes de production automobile de taille industrielle nous semble peu envisageable notamment dans le cas d'un autostockeur.

[DEL 96a]. La Programmation Logique sous Contraintes semble mieux adaptée aux architectures à tiroirs et à ses contraintes d'ordre total. Plus il y a de contraintes strictes et plus la propagation de contraintes est efficace.

#### 3.2.2.4 Algorithmes génétiques

- *Présentation de la méthode*

L'utilisation des algorithmes génétiques pour l'optimisation des problèmes combinatoires est une technique récente (fin des années 70) inspirée du principe d'évolution biologique des espèces. L'idée sous-jacente est de respecter les phénomènes d'hérédité et de loi de survie énoncés par Darwin [CAU 94]. Une analogie est donc faite entre les individus d'une population et les solutions d'un problème. Le principe de base est le suivant : partant d'une population de solutions générées aléatoirement, on applique à chaque étape des mécanismes d'évolution, croisements et mutations, entre les individus les plus forts<sup>1</sup>, en espérant ainsi créer un nouvel individu, membre de la génération suivante, qui sera assez fort pour résister à la sélection naturelle. L'exécution répétée de cet algorithme doit permettre de créer une population (i.e. un ensemble de solutions) où les individus sont tous très forts (i.e. constituent des bonnes solutions).

La mise en œuvre d'un algorithme génétique nécessite de disposer [CAU 94] :

- \* d'un codage approprié des solutions sous la forme de chromosomes,
- \* des opérateurs génétiques adaptés au problème,
- \* d'une population initiale, composée de solutions (d'individus) générées aléatoirement,
- \* des paramètres tels que la taille de la population ou la probabilité de mutation bien dimensionnés.

Voici la présentation formelle d'un algorithme génétique :

---

<sup>1</sup> Ceux qui minimisent la fonction de coût.

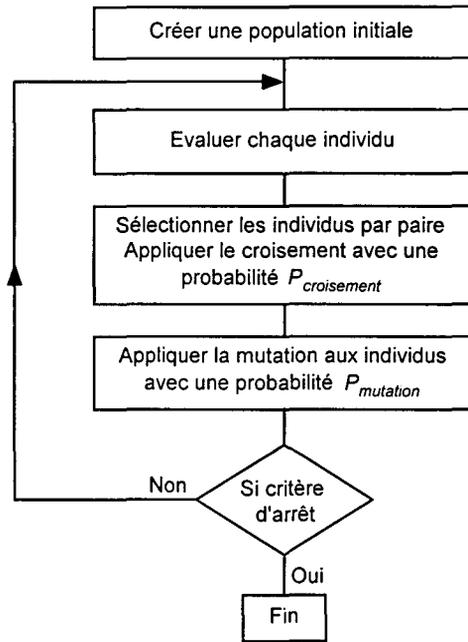


Figure 3.6 - Organigramme d'un algorithme génétique

- *Opérateurs génétiques*

Il existe deux classes d'opérateurs génétiques : les opérateurs de croisement et les opérateurs de mutation. Les opérateurs de croisement nécessitent la présence de deux parents pour générer un enfant tandis que les opérateurs de mutation n'ont besoin que d'un seul parent. On dit que l'opérateur de croisement est un opérateur sexué et que l'opérateur de mutation est un opérateur asexué.

- \* l'opérateur de croisement

Il existe de nombreux opérateurs de croisement. Nous donnons ici la description du croisement le plus simple. Le principe est le suivant : deux individus sont sélectionnés aléatoirement dans la population. Un point de croisement est choisi aléatoirement entre 1 et  $l$ , où  $l$  est la longueur du vecteur de codage décrivant un individu. Le point de croisement correspond donc à la position de la coupure. Considérons un exemple de croisement entre deux individus :

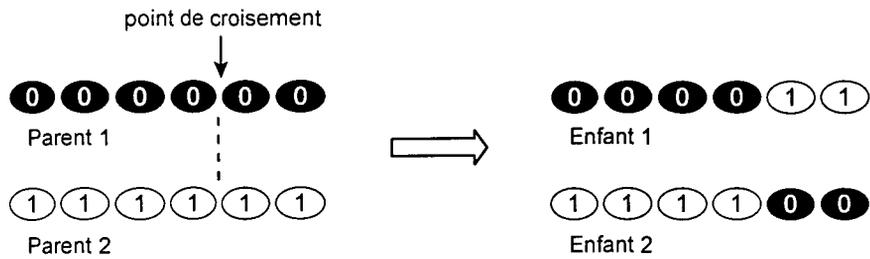


Figure 3.7 - Exemple de croisement

Le processus de croisement est répété pour chaque paire d'individus de la population avec une probabilité  $P_{croisement}$ . Il existe d'autres opérateurs de croisement tels que des opérateurs de croisement multiples pour lesquels il existe plusieurs points de croisement.

\* l'opérateur de mutation

L'opérateur de mutation est ensuite appliqué aux individus issus du croisement avec une probabilité  $P_{mutation}$ . La mutation la plus simple consiste à sélectionner aléatoirement un gène du chromosome d'un individu et à modifier sa valeur :



Figure 3.8 - Exemple de mutation

D'autres types de mutation sont envisageables tels que la permutation de deux gènes. L'opérateur de mutation doit être utilisé avec parcimonie afin d'obtenir de bons résultats [GOL 89]. Il permet néanmoins d'enrichir utilement le patrimoine génétique de la population parfois appauvri par l'opérateur de croisement.

• Remarque sur les extensions des algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques tels qu'ils ont été brièvement présentés sont caractérisés par les diverses phases de l'algorithme (sélection - croisement - mutation) et par un codage binaire des solutions. Les algorithmes génétiques peuvent en réalité être considérés comme une classe particulière des algorithmes à stratégie d'évolution [MIC 92][MUL 93]. Dans les algorithmes à stratégie d'évolution, le codage des solutions et la structure de l'algorithme ne sont pas imposés. Un codage en nombre réel est par conséquent concevable, ce qui permet parfois de

mieux décrire les problèmes d'ordonnement. De nouveaux opérateurs génétiques mieux adaptés aux problèmes sont également utilisables. Il est par exemple possible qu'un croisement génère un fils unique ou toute une famille.

- *Critique des algorithmes génétiques*

Deux caractéristiques des algorithmes génétiques permettent d'éviter les minima locaux :

- \* le choix aléatoire des parents et la possibilité de mutation,
- \* le fait qu'il s'agit d'une méthode multi-gradients dans laquelle on espère qu'un individu au moins convergera vers l'optimum global.

Contrairement au recuit simulé, les algorithmes génétiques ne cherchent pas à améliorer progressivement une seule solution mais à faire évoluer une population constituée de plusieurs solutions. L'avantage est qu'à tout instant, on peut disposer de plusieurs bonnes solutions et donc avoir une bonne réactivité aux aléas. Cependant, pour que l'algorithme converge, il est nécessaire d'avoir des populations de grande taille. Pour mémoire, les buffers de re-séquencement peuvent contenir plusieurs centaines de véhicules caractérisés par la présence ou l'absence de plus de dix critères. Si l'on considère l'intégralité des véhicules présents à chaque instant dans le buffer, un individu est donc une liste de plusieurs centaines de véhicules. L'espace mémoire nécessaire pour stocker à chaque itération toute une population de solutions devient vite un paramètre critique interdisant l'utilisation des algorithmes génétiques pour résoudre les problèmes de re-séquencement de taille industrielle.

### 3.2.3 Méthodes arborescentes

#### 3.2.3.1 Introduction

Les méthodes arborescentes sont des méthodes fréquemment utilisées pour résoudre effectivement les problèmes d'optimisation combinatoire et notamment le problème de séquencement statique des lignes d'assemblage à modèles mélangés. Le principe des Procédures par Séparation et Evaluation (P.S.E. ou « Branch and Bound » en anglais) est donné dans le paragraphe suivant. Une variante heuristique de ces méthodes sera ensuite décrite : la recherche par faisceau.

### 3.2.3.2 Méthode par séparation et évaluation

- *Présentation de la méthode*

Les méthodes par séparation et évaluation réalisent une exploration intelligente du domaine des solutions réalisables du problème d'optimisation combinatoire considéré. L'ensemble des solutions du problème est décomposé progressivement et forme une arborescence que l'on explore. A chaque étape, les sommets pendants de l'arborescence correspondent à des solutions partielles. La racine de l'arborescence contient toutes les solutions réalisables possibles. L'efficacité de cette exploration est accrue si l'on peut n'explorer qu'une partie de l'arborescence. L'exploration dépend de quatre paramètres : la séparation, l'évaluation, les bornes et la stratégie de développement [SAK 84][CHA 96].

- \* la séparation

La séparation consiste à partager l'ensemble des solutions en fonction d'un certain critère ou de la valeur d'une certaine variable. L'arborescence est alors séparée en sous-ensembles fils du sommet considéré. Pour connaître la solution optimale du problème, il suffit de calculer la valeur de la fonction de coût pour toutes les feuilles de l'arborescence ainsi créée. Cette procédure est évidemment inefficace si le problème à résoudre est un problème de grande taille car l'arborescence engendrée atteint rapidement une dimension énorme.

- \* l'évaluation et les bornes

Afin d'éviter l'examen de certaines parties de l'arborescence, on utilise deux principes : l'évaluation et les bornes. Certaines branches peuvent ne pas être explorées si l'on sait qu'elles ne contiennent pas la solution optimale. L'évaluation d'un sommet consiste à déterminer un minorant<sup>1</sup> de l'ensemble des valeurs de la fonction de coût correspondant aux solutions que contient le sommet. Aucune des solutions contenues dans un sommet évalué ne peut avoir un coût inférieur à ce minorant. La borne, quant à elle, correspond à la valeur de la fonction de coût d'une solution du problème. Dans le cas d'une minimisation, la borne constitue un majorant du minimum, on dit que c'est une borne supérieure.

Comme le notent Charon et al. [CHA 96], un sommet peut ne pas être exploré dans les deux cas suivants (si l'on considère toujours une minimisation) :

---

<sup>1</sup> Dans le cas où le problème d'optimisation est écrit sous forme de minimisation d'un objectif.

- a) quand on sait que toutes les solutions contenues dans le sommet ne sont pas meilleures que la borne, c'est-à-dire quand l'évaluation du sommet est supérieure ou égale à la borne.
- b) quand l'évaluation du sommet est exacte<sup>1</sup> et est strictement inférieure à la borne. La borne est alors modifiée et prend la valeur de l'évaluation exacte.

Il apparaît clairement que plus la borne et la fonction d'évaluation sont fines et plus il est possible d'élaguer rapidement des branches de l'arborescence. Il est également important que le temps de calcul de l'évaluation d'un sommet soit court.

\* la stratégie de développement

Le dernier paramètre à fixer concerne l'ordre dans lequel le critère de séparation va être appliqué. Plusieurs stratégies sont possibles :

- en profondeur d'abord ('depth-first search')

Cette stratégie consiste à descendre dans les branches jusqu'à ce que l'on trouve un sommet que l'on peut éliminer. On remonte alors dans l'arborescence pour redescendre dans une autre branche. Cette stratégie est également appelé exploration par backtracking. Le processus de recherche en profondeur d'abord avance le long d'une branche jusqu'à ce qu'il atteigne une limite de profondeur. Il commence alors à considérer d'autres branches de même ou de moindre profondeur. Cette méthode de recherche arborescente appartient à la classe des Procédures de Séparation et Evaluation Séquentielles (P.S.E.S.). La taille de l'arborescence dépend de la finesse de l'évaluation des sommets.

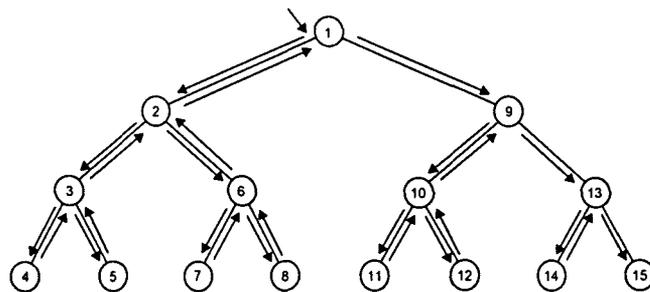


Figure 3.9 - Recherche en profondeur d'abord

<sup>1</sup> i.e. l'évaluation de la fonction de coût est atteinte par une des solutions contenues dans le sommet.

- en largeur d'abord ('breadth-first search')

La stratégie d'exploration en largeur d'abord, ou par niveau, consiste à développer successivement les nœuds d'un même niveau de profondeur. A chaque niveau, c'est le plus ancien des nœuds mémorisés qui est développé en priorité. Cette technique algorithmique de développement de l'arbre de résolution est surtout utilisée pour trouver des solutions aux problèmes d'intelligence artificielle. Cette méthode relève des Procédures de Séparation et Evaluation Progressive (P.S.E.P.).

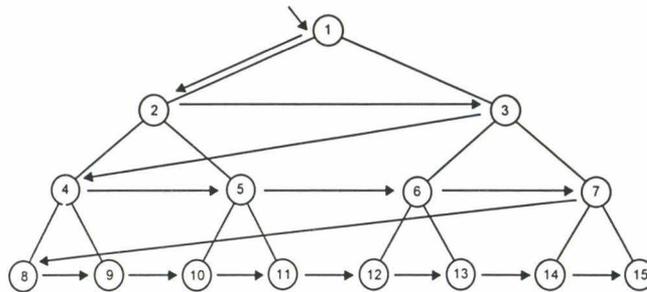


Figure 3.10 - Recherche en largeur d'abord

- le meilleur d'abord ('best-first search')

On sélectionne le sommet dont l'évaluation est la plus faible, en espérant qu'il contient la solution optimale. Cette stratégie peut être parfois la plus rapide car on essaie d'explorer à chaque fois la direction qui semble la plus prometteuse.

L'exploration en profondeur d'abord offre plusieurs avantages : l'encombrement en mémoire est réduit et on obtient rapidement une solution. Par contre, l'inconvénient est que l'on peut être amené à traiter des sommets qui ont peu de chance de contenir la solution optimale. Ce type de procédure d'exploration est davantage dédié aux problèmes très contraints, pour lesquels l'obtention d'une solution admissible sous-optimale n'est pas triviale et suffit [ALJ 90]. L'exploration en largeur d'abord nécessite un espace mémoire très important car le nombre de nœuds qui doivent être mémorisés à un niveau donné croît de façon exponentielle. Cela la rend inapplicable dans de nombreux cas. Ce type de stratégie de développement n'est pas adapté pour traiter notre problème de re-séquencement. La recherche de type 'meilleur d'abord' nécessite une gestion plus délicate de l'arborescence et nécessite également un large espace mémoire.

- *Critique des différentes méthodes par séparation et évaluation*

Les méthodes par séparation et évaluation pures qui ont été présentées semblent inadaptées à notre problème de re-séquencement. Les contraintes liées au problème dans le cas de l'autostockeur ne permettent pas de supprimer de solutions. Toutes les séquences sont acceptables bien que non nécessairement bonnes. Une méthode par séparation et évaluation peut par conséquent aboutir à une énumération quasi exhaustive inacceptable étant donné la taille du problème et le temps imparti. A moins que des procédures rapides fournissant des bornes inférieures très fines soient disponibles, il est peu probable que de nombreuses alternatives soient éliminées tôt dans la recherche. Enfin, même si la séquence prévisionnelle à générer possède une taille  $L$  limitée, le temps de calcul, et parfois l'espace mémoire, nécessités par ce type de méthode est rédhibitoire. Dans le cas plus contraint d'une architecture à tiroirs, où il est nécessaire de vérifier la faisabilité à chaque développement d'un sommet, les procédures de séparation et évaluation séquentielles semblent a priori mieux adaptées.

Le prochain paragraphe décrit une méthode par séparation et évaluation heuristique ou tronquée qui permet de réduire le temps de calcul nécessaire à la découverte d'une bonne solution.

### 3.2.3.3 Recherche par faisceau

- *Présentation de la méthode*

La recherche par faisceau (« beam search » en anglais) a été développée par la communauté de l'Intelligence Artificielle dans le milieu des années 70. Elle a été pour la première fois utilisée par Lowerre en 1976 dans un programme de reconnaissance vocale [LOW 76]. Elle fut ensuite employée pour résoudre des problèmes d'ordonnancement [FOX 83][OW 88]. La recherche par faisceau est une méthode proche de la méthode par séparation et évaluation en largeur d'abord présentée dans le paragraphe précédent car elle procède également niveau par niveau. Cependant, contrairement à cette dernière, la recherche par faisceau ne garde que les meilleurs nœuds à chaque niveau ('best-few search'). L'idée est donc de n'explorer qu'un certain nombre de branches non élaguées et ainsi de limiter le nombre de solutions explorées en parallèle. Plus simplement, on peut dire qu'à chaque niveau de l'arborescence les  $b$  meilleures branches sont gardées. La Figure 3.11 présente un exemple où seuls les 2 meilleurs sommets ou nœuds sont gardés à chaque niveau.

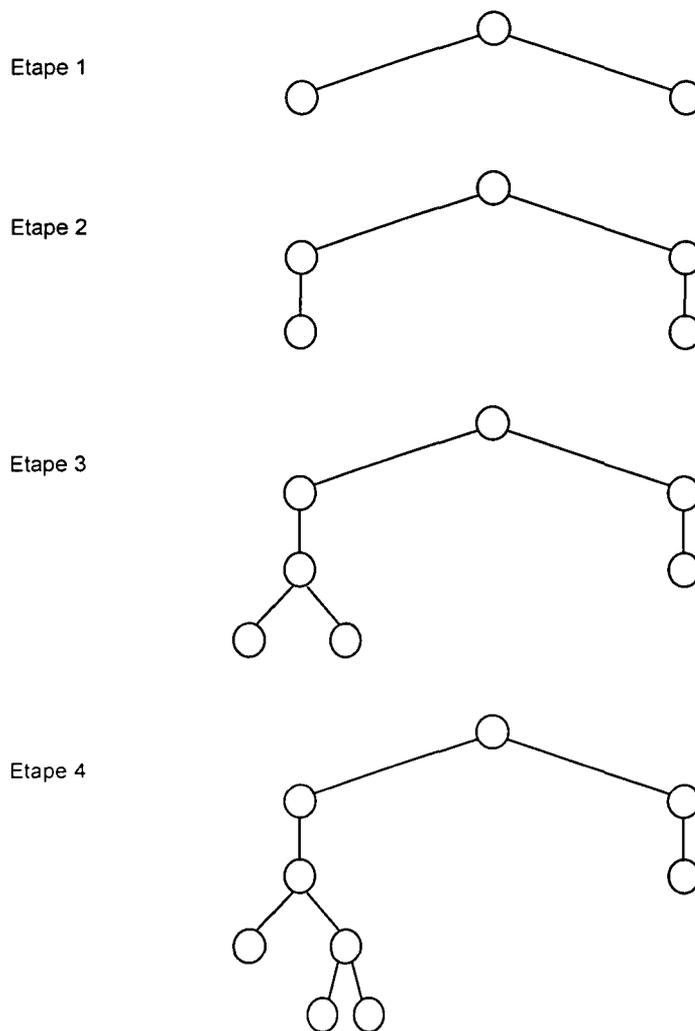


Figure 3.11 - Les différentes étapes d'une recherche par faisceau

L'inconvénient de cette méthode en vue de son application à notre problème de re-séquencement est que les meilleurs successeurs gardés à chaque niveau proviennent souvent des mêmes nœuds. A moins de retenir un nombre très important de nœuds à chaque niveau, la partie de l'espace de recherche explorée est très restreinte. En effet, supposons qu'à chaque niveau, les quatre meilleurs véhicules soient gardés. Il arrive alors fréquemment qu'au niveau 2, les quatre véhicules conservés proviennent tous du meilleur nœud du niveau précédent, c'est-à-dire du niveau 1. La recherche est alors circonscrite dans une petite partie de l'arbre.

Afin d'éviter cet inconvénient, nous avons développé une variante de la recherche par faisceau. Elle consiste à garder non plus les  $b$  meilleurs nœuds à chaque niveau, mais à garder, au niveau  $n$ , les  $b_n$  meilleurs successeurs de chaque nœud. La recherche par faisceau ainsi modifiée est présentée sur la Figure 3.12. Le temps de calcul et l'espace mémoire nécessaires sont évidemment supérieurs mais l'élagage moins violent permet d'explorer une plus grande partie de l'espace de recherche.

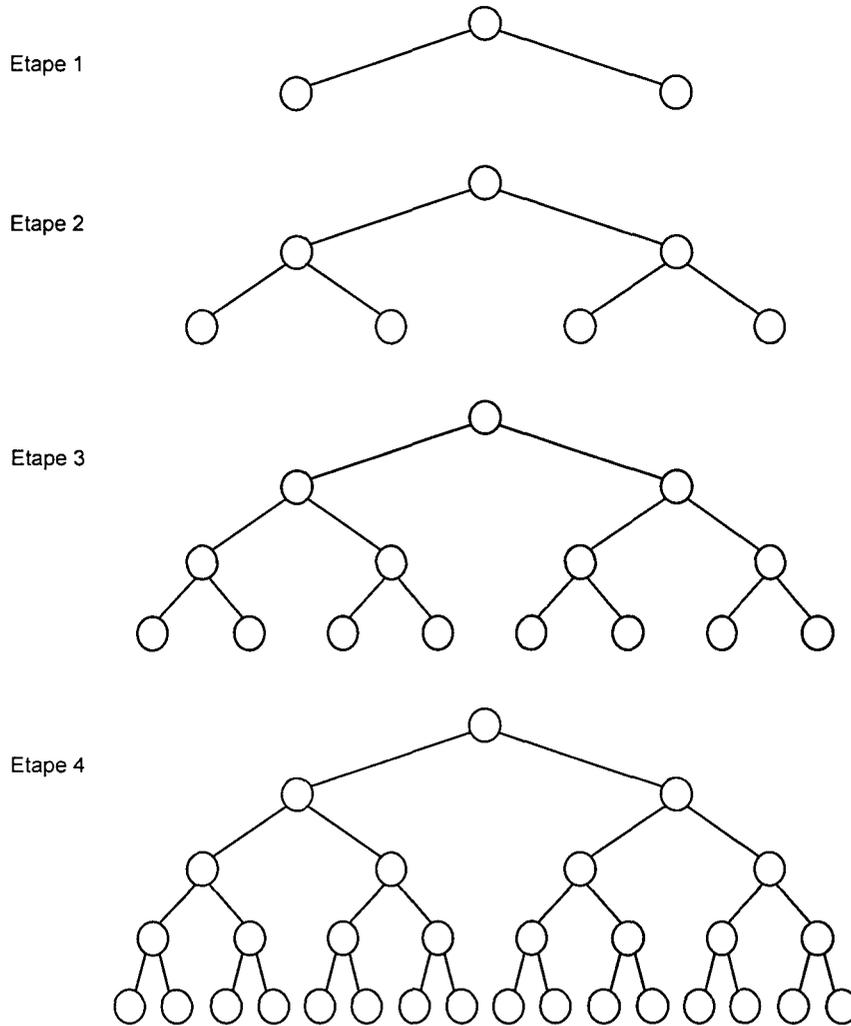


Figure 3.12 - Les différentes étapes d'une recherche par faisceau modifiée

Dans la suite, on appellera recherche par faisceau cette version modifiée de la méthode.

- *Critique de la méthode*

La recherche par faisceau étant une méthode heuristique, la solution optimale peut ne pas être découverte. Les meilleurs nœuds sont explorés à chaque niveau mais rien n'indique qu'ils contiennent la meilleure solution possible. Cependant, une bonne solution a de grande chance d'être découverte. De plus, cette méthode est paramétrable en fonction du temps de calcul imparti. Le nombre de nœuds gardés à chaque niveau peut être choisi. Plus ce nombre est grand, plus la probabilité de trouver la solution optimale augmente. Bien sûr, l'espace mémoire et le temps de calcul nécessaires augmentent parallèlement. La profondeur de recherche, quant à elle, dépend de la longueur  $L$  de la séquence prévisionnelle à bâtir. Si cette longueur est égale à 1, la procédure devient une procédure de génération ou de construction progressive. Comme nous l'avons déjà signalé, ce type de procédure est 'myope' car elle ne tient

aucun compte des prochains véhicules qui seront enlignés. Quand la profondeur de recherche est suffisante, la recherche par faisceau ne présente pas cet inconvénient et semble bien adaptée à notre problème, à sa complexité et à sa dynamique.

### 3.2.4 Conclusion sur le choix des méthodes de résolution

Notre volonté concernant le choix d'une méthode de résolution est qu'elle soit rapide, facile à implanter et applicable à tous les types de buffers de re-séquencement. Le Tableau 3.1 résume les analyses de chacune des méthodes de résolution envisageables présentées dans les paragraphes précédents. Chaque méthode est évaluée en fonction de cinq critères :

- l'exactitude, i.e. la proximité des solutions par rapport à la solution optimale,
- le temps de calcul, le facteur le plus critique de notre problème,
- la place mémoire,
- la réactivité face aux aléas, i.e. la possibilité d'interrompre la procédure et de la relancer rapidement pour obtenir une nouvelle solution (même dégradée),
- la robustesse face aux changements de contraintes et de composition du flux des véhicules arrivant de l'atelier de peinture.

NB : l'objet de ce tableau n'est pas de classer les différentes méthodes en fonction de leurs qualités intrinsèques mais de les évaluer dans l'optique de leur application à notre problème de re-séquencement.

Méthodes	Exactitude	Temps de calcul	Place mémoire	Réactivité	Robustesse
Descente stochastique	+	+++	+++	+++	+++
Recuit simulé	++	++	+++	++	-
Méthode Tabou	++	++	-	++	+
Système Expert	-	--		---	---
P.L.C.	+++	+		---	
Algorithmes génétiques	++	++	--	++	+
Méthode par séparation et évaluation	+++	--	profondeur : +++ largeur : ---	-	+++
Recherche par faisceau	++	+++	++	+++	++
Construction progressive	+	++++	+++	+++	+++

Tableau 3-1 - Comparaison des différentes méthodes envisageables

De cette phase d'analyse des différentes méthodes susceptibles de fournir une solution au problème de re-séquencement en entrée de montage envisageables, deux méthodes émergent :

- le recuit simulé,
- la recherche par faisceau.

En effet, ces deux méthodes semblent capables de fournir de bonnes solutions, bien qu'en général sous-optimales, rapidement, sans nécessiter une place mémoire rédhibitoire, et en étant relativement réactive et robuste dans le cas de la recherche par faisceau. Le réglage des différents paramètres contrôlant la procédure de recuit simulé, éventuellement nécessaire pour adapter la méthode à la qualité du flux, peut en effet constituer un handicap lors d'une mise en œuvre industrielle. Toutefois le compromis qualité - temps de calcul réalisé par chacune des deux méthodes semble a priori intéressant.

Deux autres méthodes, la descente stochastique et la construction progressive constituent des méthodes opérationnelles simples mais ne peuvent a priori pas garantir de bons résultats moyens car la première ne permet pas de sortir des optimums locaux et la seconde est une procédure myope. Il est à noter que ces deux méthodes sont respectivement des versions 'bridées' du recuit simulé (à température nulle) et de la recherche par faisceau (avec un seul niveau considéré).

## 3.3 Mise en œuvre des méthodes de résolution retenues

### 3.3.1 Introduction

La phase d'analyse nous a permis d'identifier deux méthodes de résolution : la recherche par faisceau et le recuit simulé. La mise en œuvre de ces deux méthodes est l'objet de ce paragraphe. Les fonctions de coût utilisées par chacune des méthodes sont très proches de la fonction de coût qui nous permettra par la suite de juger la qualité des séquences produites. La fonction de coût mesurant la qualité des séquences a posteriori est appelée la **métrique évaluative**, les fonctions de coût utilisées pour bâtir en temps réel les séquences prévisionnelles sont appelées les **métriques génératives**. La métrique évaluative sera présentée dans un premier temps. Les métriques génératives s'en inspirant seront présentées dans les parties relatives à la mise en œuvre de chacune des méthodes.

Nous avons fait plusieurs hypothèses ou simplifications concernant le problème de re-séquencement lors de l'application des deux méthodes :

- 1) Pour tenir compte de l'aspect dynamique du problème, on fait l'hypothèse qu'après chaque engagement en ligne, il y a une nouvelle arrivée d'un véhicule provenant de l'atelier de peinture. Nous supposons donc, ce qui n'est pas toujours le cas en pratique, que les véhicules arrivent de l'atelier de peinture à intervalles réguliers. Cette hypothèse constitue une bonne approximation de la réalité. On travaille donc à volume de stock constant.
- 2) On suppose, ce qui est vrai en réalité, que l'enveloppe journalière est connue. Les véhicules qui vont arriver de l'atelier de peinture dans la journée sont donc a priori connus. Leur ordre d'arrivée est cependant inconnu<sup>1</sup>.
- 3) La modélisation choisie est, comme nous l'avons vu dans le deuxième chapitre, la modélisation par espacement de critères. Seules les contraintes d'espacement diagonales seront considérées par la suite car elles sont souvent les seules employées pratiquement.

### 3.3.2 Métrique évaluative

#### 3.3.2.1 Introduction

Les méthodes de re-séquencement que nous avons mises en œuvre permettent à chaque temps de cycle de sélectionner le véhicule à envoyer en montage. Ces méthodes s'appuient sur des fonctions de coût pénalisant le non-respect des espacements entre les différents critères. Ces fonctions de coût utilisent des données instantanées et susceptibles de changer au cours du temps. L'appréciation de la qualité du re-séquencement se fait quant à elle avec une vue globale en fin de journée afin de vérifier si les objectifs généraux ont été respectés. La fonction de coût utilisée pour juger de la qualité d'une séquence en fin de journée est appelée métrique évaluative. Celles utilisées dans les deux méthodes de re-séquencement sont appelées métriques génératives et comportent un aspect adaptatif afin de bien prendre en compte la dynamique du problème.

Il est bien évident que sanctionner d'une note une séquence de plusieurs centaines de véhicules pouvant porter plus d'une dizaine de critères est quelque peu réducteur. Même si la métrique mise en place est relativement fine, une partie des informations contenues dans la séquence n'est pas ou mal traduite dans le coût calculé par la métrique.

---

<sup>1</sup> Rappelons que la séquence de véhicules lancée en entrée de la ligne de fabrication est fortement modifiée dans les ateliers de ferrage et de peinture.

La qualité des séquences que nous obtenons sur les différents jeux d'essais (cf. chapitre 4) ne sera, par conséquent, pas jugée sur ce seul chiffre.

### 3.3.2.2 Présentation de la métrique évaluative

Le principe de la métrique évaluative a été brièvement décrit dans le deuxième chapitre. Elle doit pénaliser tout non respect de l'espace optimal et sanctionner fortement toute violation de l'espace acceptable. La métrique évaluative doit détecter et pénaliser toutes violations des contraintes d'espace. Une métrique très simple consiste à compter le nombre de violations sans tenir compte de leur gravité. Cette approche peut être utilisée comme métrique générative si le temps imparti nécessite un calcul rapide de la fonction de coût mais elle ne permet pas de juger finement la séquence générée au cours de la journée de production. La métrique évaluative développée tient donc compte de l'importance des violations.

La pénalité reçue  $P_p$  par un véhicule occupant la position  $p$  de la séquence est la somme pondérée des pénalités  $P_p^c$  reçues pour la violation des espacements des différents critères :

$$P_p = \sum_{c=1}^C \theta^c P_p^c$$

$C$  correspond au nombre de critères pris en compte et les facteurs de pondération  $\theta^c$  sont des paramètres permettant de tenir compte de l'importance relative des différents critères entre eux. Plus la valeur d'un paramètre  $\theta^c$  est grande par rapport aux autres, plus les contraintes d'espace relatives au critère  $c$  ont de chance d'être respectées.

La pénalité  $P_p^c$  reçue par un véhicule occupant la position  $p$  de la séquence (que nous appellerons désormais véhicule  $p$ ) pour le critère  $c$  est donnée par :

- $P_p^c = P_{(1)}$  , si  $E^c < E_{acc}^c$  et si le véhicule  $p$  présente le critère  $c$ ,
- $P_p^c = P_{(2)}$  , si  $E^c \geq E_{acc}^c$  ,  $E^c < E_{opt}^c$  et si le véhicule  $p$  présente le critère  $c$ ,  
ou si  $E^c \geq E_{acc}^c$  ,  $E^c > E_{opt}^c$  et si le véhicule  $p$  ne présente pas le critère  $c$ ,
- $P_p^c = 0$  , sinon.

Rappelons que  $E^c$ , l'espacement effectif, est la distance<sup>1</sup> entre le véhicule  $p$  et le dernier véhicule de la séquence présentant le critère  $c$ .  $E_{acc}^c$  est l'espacement acceptable à respecter absolument et  $E_{opt}^c$  est l'espacement optimal, c'est-à-dire l'espacement moyen sur la journée de production considérée. Les pénalités  $P_{(1)}$  et  $P_{(2)}$  sont définies de la manière suivante :

$$P_{(1)} = \beta \frac{[E_{acc}^c - E^c]^x}{E_{acc}^c} \quad \text{et} \quad P_{(2)} = \frac{|E_{opt}^c - E^c|^y}{E_{opt}^c}$$

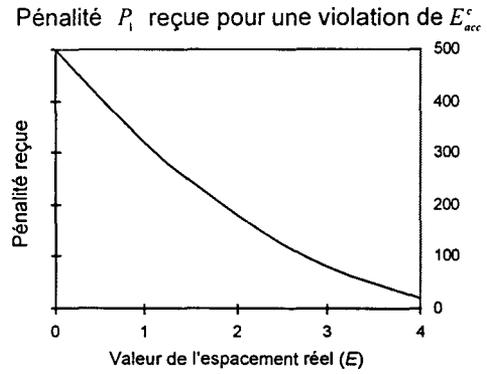
- $P_{(1)}$  constitue la pénalité reçue pour le non-respect de l'espacement acceptable. La division de  $[E_{acc}^c - E^c]^x$  par  $E_{acc}^c$  relativise le non-respect d'un espacement acceptable. Ainsi par exemple, la pénalisation d'un espacement effectif de 7 pour un espacement acceptable de 8 sera plus petite que celle d'un espacement effectif de 1 pour un espacement acceptable de 2, bien que la valeur de  $E_{acc}^c - E^c$  vaille 1 dans les deux cas. Le coefficient  $x$  permet de pénaliser d'autant plus fortement les violations de l'espacement acceptable que celles-ci sont importantes. La pondération  $\beta$  ( $\beta > 1$ ) permet de considérer le respect de l'espacement acceptable comme étant l'objectif prioritaire. On peut ainsi régler l'importance relative de la violation d'un espacement acceptable par rapport à la violation d'un espacement optimal.
- Le coût  $P_{(2)}$  pénalise le non-respect de l'espacement optimal. Comme pour  $P_{(1)}$ , le numérateur est divisé par l'espacement, optimal ici, afin de relativiser la violation et le coefficient  $y$  permet de pénaliser de façon plus importante les fortes violations.

La métrique proposée est donc paramétrable. Les trois paramètres ajustables en fonction des objectifs des responsables de production sont  $x$ ,  $y$  et  $\beta$ . Considérons par exemple un critère ayant un espacement acceptable égal à 5 à respecter en priorité et un espacement optimal égal à 8. Si  $x = 2$ ,  $y = 1,6$  et  $\beta = 100$ , alors les pénalités reçues selon la valeur de l'espacement effectif  $E$  sont les suivantes :

---

<sup>1</sup> En nombre de véhicules.

$E$	Pénalité reçue
0	500
1	320
2	180
3	80
4	20



$E$	Pénalité reçue
5	0,72
6	0,38
7	0,13
8	0,00
9	0,13
10	0,38
11	0,72
12	1,15

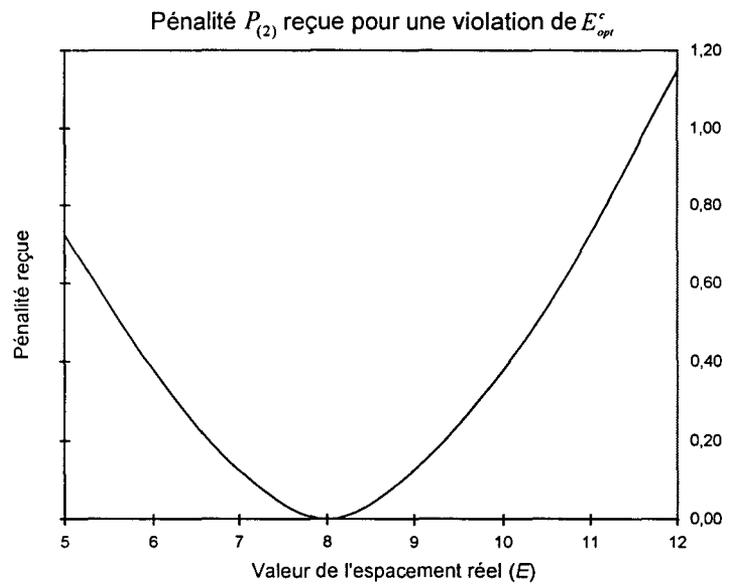


Figure 3.13 – Exemple de pénalités  $P_{(1)}$  et  $P_{(2)}$  reçues pour les violations d’espacement

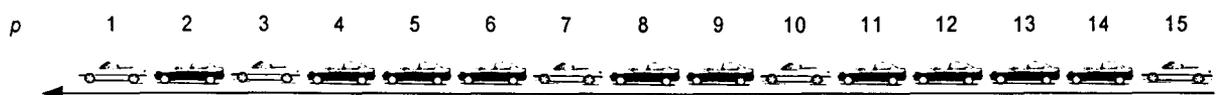
La pénalité  $P_S$  reçue par une séquence  $S$  de véhicules est la somme des pénalités reçues par chacun de ces véhicules. On a donc :

$$P_S = \sum_{p=1}^N P_p = \sum_{p=1}^N \sum_{c=1}^C \theta^c P_p^c$$

Voyons sur un exemple l’application de cette métrique évaluative sur une séquence  $S$  quelconque composée de 15 véhicules :

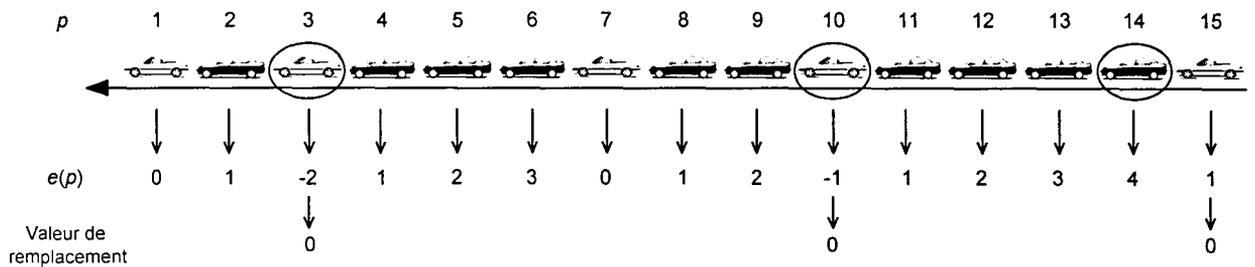
Considérons un critère  $c$  dont l’espacement optimal est égal à 3 et dont l’espacement acceptable est égal à 2.

La séquence à évaluer est la suivante : les véhicules clairs portent le critère  $c$  :



La procédure de pénalisation utilise une variable  $e(p)$  qui est incrémentée de 1 si le véhicule  $p$  ne porte pas le critère  $c$  et qui est décrétementée de la valeur de l'espace optimal si le véhicule porte le critère. Quand la valeur de  $e(p)$  devient négative, c'est que l'espace entre le dernier véhicule portant le critère et le véhicule  $p$  est inférieur soit à l'espace optimal, soit à l'espace acceptable. Si l'espace acceptable est violé, le véhicule  $p$  reçoit la pénalité  $P_{(1)}$ . Si c'est l'espace optimal qui est violé, le véhicule  $p$  reçoit la pénalité  $P_{(2)}$ .  $e(p)$  est ensuite ré-initialisé à 0. Si la valeur de  $e(p)$  devient supérieure à l'espace optimal, c'est que l'espace entre le dernier véhicule portant le critère et le véhicule  $p$  est supérieur à l'espace optimal. Le véhicule reçoit alors une pénalité égale à  $P_{(2)}$  pour violation de l'espace optimal. Si le véhicule  $p$  porte le critère  $c$  et que  $e(p-1)$  est supérieur à l'espace optimal alors  $e(p) = 0$ .

Voyons l'évolution de la valeur de la variable  $e(p)$  pour la séquence précédente :



La procédure de pénalisation fonctionne de la façon suivante :

Si le véhicule  $p$  porte le critère  $c$  alors

$$e(p) = e(p-1) - E_{opt}^c$$

Si  $e(p) \geq 0$ , alors - le véhicule  $p$  ne viole aucun espacement

-  $e(p) = 0$ ,

Si  $e(p) < 0$ , alors -  $E^c = E_{opt}^c + e(p)$

Si  $E^c < E_{acc}^c$ , alors - le véhicule  $p$  viole l'espacement acceptable,

- la pénalité  $P_p^c$  reçue est égale à  $P_{(1)}$ ,

-  $e(p) = 0$ .

Sinon, - le véhicule  $p$  viole l'espacement optimal,

- la pénalité  $P_p^c$  reçue est égale à  $P_{(2)}$ ,

-  $e(p) = 0$ .

Si le véhicule  $p$  ne porte pas le critère  $c$  alors

$$e(p) = e(p-1) + 1$$

Si  $e(p) > E_{opt}^c$ , alors - le véhicule  $p$  viole l'espacement optimal,

- la pénalité  $P_p^c$  reçue est égale à  $P_{(2)}$  avec  $E^c = e(p)$ .

Le véhicule 3 viole l'espacement acceptable ( $E_{acc}^c = 2$ ), le véhicule 10 et le véhicule 14 violent l'espacement optimal ( $E_{opt}^c = 3$ ). Si l'on suppose que  $x = 2$ ,  $y = 1,6$  et  $\beta = 100$ , alors

- le véhicule 3 reçoit une pénalité  $P_3 = 100 \times \frac{(2-1)^2}{2} = 50$

- le véhicule 10 reçoit une pénalité  $P_{10} = \frac{|3-2|^{1,6}}{3} = 0,33$

- le véhicule 14 reçoit une pénalité  $P_{14} = \frac{|3-4|^{1,6}}{3} = 0,33$

Les autres véhicules ne violent pas d'espacement et ne sont donc pas pénalisés. La pénalité totale reçue par la séquence est alors la somme des pénalités individuelles reçues par les véhicules :

$$P_S = \sum_{p=1}^{15} P_p = P_3 + P_{10} + P_{14} = 50,67$$

### 3.3.2.3 Cas des espacements non entiers

La métrique évaluative qui vient d'être exposée permet de sanctionner efficacement les violations d'espacements acceptables ou optimaux. Elle n'est cependant applicable que dans le cas où la règle d'espacement est une règle d'espacement stricte du type : 'au moins  $k$  véhicules sans critère entre 2 véhicules avec critère' (cf. Chapitre 3.3.3.1). Si la règle d'espacement est en fait une règle de ratio de type 'pas plus de  $k$  véhicules portant le critère parmi  $n$  véhicules consécutifs' et que la fraction  $k/n$  est irréductible (avec  $k \neq 1$ ) alors la métrique n'est pas immédiatement applicable. Ce cas correspond à un espacement non entier. Guerre-Chaley [GUE 95b] a montré que ces espacements réels peuvent être ramenés à des espacements entiers. Considérons la règle d'espacement suivante : 'pas plus de 2 véhicules portant le critère parmi 7 véhicules consécutifs'. Si cette règle concerne l'espacement acceptable, alors celui-ci est un nombre réel. On a  $E_{acc} = 2,5$ . Une des solutions consiste à arrondir cet espacement à l'entier immédiatement supérieur. Cela entraîne alors une sous-utilisation de la capacité des postes concernés par ce critère car ils ont été conçus pour supporter une charge supérieure. De plus, si l'espacement optimal (c'est-à-dire l'espacement moyen) a également pour valeur 2,5, alors il sera impossible de respecter un espacement de 3 tout au long de la séquence car le rapport charge/capacité est trop élevé. La solution la plus respectueuse de la règle d'espacement consiste à alterner des espacements de 2 et des espacements de 3.

La règle d'espacement  $k_c/n_c$  ( $k_c > 1$ ) du critère  $c$  est transformée en une sous-séquence vérifiant  $g_c$  fois l'espacement  $(h_c - 1)$  et  $i_c$  fois l'espacement  $(j_c - 1)$ . Les entiers positifs  $g_c, h_c, i_c, j_c$  dont les valeurs doivent être identifiées, vérifient les conditions suivantes :

$$g_c \cdot h_c + i_c \cdot j_c = n_c \quad (1)$$

$$g_c + i_c = k_c \quad (2)$$

$$h_c - j_c = 1 \quad (3)$$

$$j_c \leq \frac{n_c}{k_c} \leq h_c \quad (4)$$

Les équations (1) et (2) assurent que le ratio  $k_c/n_c$  est effectivement respecté. Les relations (3) et (4) permettent de déterminer  $h_c$  et  $j_c$  de façon unique.  $h_c$  et  $j_c$  sont respectivement les entiers immédiatement supérieur et immédiatement inférieur au ratio  $n_c/k_c$ . On obtient alors les valeurs de  $g_c$  et  $i_c$  grâce aux équations :

$$g_c = k_c(1 - h_c) + n_c \quad (5)$$

$$i_c = k_c \cdot h_c - n_c \quad (6)$$

Les valeurs ainsi obtenues sont des entiers positifs, solutions uniques du problème. Pour l'exemple d'un espacement égal à 2,5, on a  $h_c = 3$  et  $j_c = 2$  desquels on déduit, grâce aux équations (5) et (6),  $g_c = 1$  et  $i_c = 1$ . Considérons une autre règle d'espacement pour laquelle  $k_c = 3$  et  $n_c = 13$ . L'espacement est égal à 4,33. Ce nombre est compris entre les entiers  $h_c = 5$  et  $j_c = 4$ . Les valeurs obtenues pour  $g_c$  et  $i_c$  sont alors  $g_c = 1$  et  $i_c = 2$ . La sous-séquence obtenue est donc constituée d'un espacement de longueur  $h_c - 1 = 4$  suivi de deux espacements de longueur  $j_c - 1 = 3$ . La sous-séquence est donc : X - - - - X - - - X - - - (où X représente un véhicule portant le critère). Si la séquence à évaluer est constituée d'une répétition de cette sous-séquence, alors elle n'encourt aucune pénalité. Dans la métrique, l'espacement à prendre en compte, qu'il soit acceptable ou optimal, change donc de valeur et suit répétitivement le cycle 4-3-3.

La règle d'espacement ainsi bâtie est plus stricte que la règle de ratio de laquelle elle est tirée [COM 96b]. Ainsi, pour l'exemple précédent où la règle de ratio était 'pas plus de 3 véhicules portant le critère parmi 13 véhicules consécutifs', la séquence suivante était admissible X - - X - X - - - - - . Elle ne l'est plus quand la règle de ratio est ramenée au respect d'une sous-séquence fixe. Par contre, le lissage de la charge est meilleur.

Par la suite, nous ne considérons donc plus que des contraintes d'espacement strictes, puisque les contraintes de ratio seront dorénavant transformées en contraintes d'espacements du type 'pas plus d'un véhicule portant le critère parmi  $n$  véhicules consécutifs'.

Maintenant que la métrique évaluative est présentée, les mises en œuvre des deux méthodes vont être exposées. Ces méthodes utilisent toutes deux des métriques génératives s'inspirant de la métrique évaluative.

### 3.3.3 Mise en œuvre de la recherche par faisceau

#### 3.3.3.1 Introduction

Comme nous l'avons vu dans le paragraphe 3.2.3.3, la recherche par faisceau est une méthode proche de la méthode par séparation et évaluation en largeur d'abord. Cependant, contrairement à cette dernière, la recherche par faisceau ne garde que les  $b$  meilleurs nœuds à chaque niveau. La recherche par faisceau est également paramétrable en longueur car elle construit à chaque temps de cycle une séquence de véhicules de longueur limitée  $L$ . Comme nous l'avons vu dans le paragraphe 2.2.5.3, il est inutile, étant donné l'aspect dynamique du problème, que la longueur des séquences prévisionnelles soit trop grande.

La recherche par faisceau est donc paramétrable en largeur et en longueur afin de l'adapter facilement au temps de calcul imparti. Le compromis qualité - temps de calcul est donc simple à réaliser. Nous verrons dans la présentation de l'algorithme que des indicateurs formels ont été développés afin de dimensionner correctement l'arbre de recherche.

Avant de présenter la méthode proprement dite, il est nécessaire de réaliser les deux phases suivantes :

- choisir l'espacement cible à respecter,
- créer une métrique générative sanctionnant le non-respect de cet espacement cible.

#### 3.3.3.2 Choix de l'espacement cible

Nous avons défini dans le paragraphe 2.3.3.2 plusieurs types d'espacement. Ont été introduits notamment l'espacement acceptable, qui est l'espacement minimum à respecter sous peine d'introduire des pertes d'efficacité, et l'espacement optimal, qui est l'espacement à respecter pour que les différents critères soient répartis le plus uniformément possible durant la journée de production. L'espacement que la méthode de re-séquencement s'efforcera de respecter a également été présenté, il s'agit de l'espacement cible. Comme nous allons le voir, cet espacement est un espacement dynamique et il peut prendre différentes valeurs selon l'évolution de la production. Nous verrons que plusieurs alternatives apparaissent.

Il est nécessaire, dans un premier temps, de définir trois nouveaux types d'espacements, en complément des espacements déjà présentés. Ces espacements, définis pour chaque critère, permettent de caractériser la composition instantanée du stock et l'état de la ligne : l'espacement buffer, l'espacement d'arrivée et l'espacement global.

- **L'espacement buffer** ( $E_{buffer}^c$ ) : Pour l'ensemble des véhicules présents dans le buffer de re-séquencement, l'espacement buffer correspond, pour chaque critère  $c$ , à l'espacement moyen. L'espacement buffer pour le critère  $c$  est donc le nombre de véhicules présents dans le buffer et portant le critère  $c$  divisé par le nombre total de véhicules présents dans le buffer.
- **L'espacement d'arrivée** ( $E_{arrivée}^c$ ) : Pour l'ensemble des véhicules que l'on attend encore dans la journée, on définit pour chaque critère  $c$ , l'espacement moyen appelé ici l'espacement d'arrivée.
- **L'espacement global** ( $E_{global}^c$ ) : Pour l'ensemble des véhicules présents dans le buffer et des véhicules que l'on attend encore, on définit pour chaque critère  $c$ , l'espacement moyen, appelé ici l'espacement global.

Ces trois indicateurs varient tout au long de la journée de production. En début de journée, l'espacement d'arrivée correspond, pour chaque critère, aux données fournies par l'enveloppe journalière. Il caractérise les véhicules que l'on attend pendant la journée. Il est donc initialement égal à ce que nous avons appelé l'espacement optimal.

L'espacement buffer reflète lui l'état instantané du stock de véhicules. Cet espacement peut changer brutalement lors de la pose ou la levée d'un interdit. La comparaison entre les espacements buffer en début et en fin de journée permet de voir si l'ordonnancement de la journée a laissé, pour la journée suivante, une composition de buffer meilleure, équivalente ou moins bonne que celle de départ.

L'espacement global est une agrégation des deux premiers. Il reflète l'espacement moyen des véhicules qui se trouvent dans le stock et de ceux qui vont arriver jusqu'à la fin de la journée.

Les trois indicateurs définis ci-dessus sont calculables à partir des simples données du problème. Il se pose alors la question de connaître l'espacement à utiliser. Quelle doit être, à un instant  $t$  donné, la valeur de l'espacement cible ? L'idéal est de suivre à tout moment de la journée, l'espacement optimal. Dans ce cas, l'espacement acceptable est toujours respecté, la charge de travail des différents postes est la plus lisse possible et le taux de consommation de chaque pièce est le plus constant possible. De plus, le contenu du buffer de re-séquencement est de qualité quasiment constante. Cependant la ligne de production est sujette à des événements imprévisibles tels que les

interdits de montage ou les décyclages dans les ateliers de peinture ou de ferrage. Quand ces événements se produisent, la qualité du buffer se dégrade brusquement parce que des véhicules deviennent non lançables en montage ou parce que le flux de véhicules arrivant de peinture n'est momentanément pas représentatif de l'enveloppe journalière. Dans de tels cas, il n'est pas possible de suivre l'espacement optimal. Plusieurs solutions sont alors envisageables :

- (1) L'ordonnancement essaie de coïncider le plus possible avec l'espacement acceptable. Ceci permet d'engager les véhicules avec une densité de critères maximale, sans pour autant passer en dessous de l'acceptable. Si on suppose que l'espacement acceptable est plus petit que l'espacement d'arrivée, une marge est progressivement construite qui pourra être ensuite utilisée afin de faire face à des rafales de certains critères ou à des interdictions. En l'absence d'interdit, et avec la condition  $E_{acc}^c < E_{global}^c$  vérifiée, cette marge subsistera jusqu'à la fin de la journée et impliquera alors une répartition hétérogène de la charge de travail sur la journée.
- (2) L'ordonnancement suit l'espacement buffer et engage des véhicules avec des critères, proportionnellement à leur présence dans le buffer de re-séquencement. Cette approche n'utilise pas les informations sur les véhicules qui vont arriver dans la journée et l'objectif de lissage de charge sur la journée est mal traduit, car une dégradation temporelle du stock<sup>1</sup> entraînera subitement une adaptation au niveau espacement.
- (3) L'ordonnancement suit l'espacement global et engage des véhicules avec des critères, proportionnellement à leur présence dans l'enveloppe journalière et dans le buffer de re-séquencement. Dû à des dégradations temporelles du buffer, le respect de l'espacement global peut devenir momentanément impossible. Il y a donc un risque que, subitement, on n'arrive plus à respecter cet espacement. De même, l'espacement global peut tomber en dessous de l'espacement acceptable suite à un interdit, qui, par définition, est imprévisible.

Chaque solution présente des avantages et des inconvénients et, afin de combiner les avantages, on peut imaginer d'utiliser un espacement dynamique s'adaptant à la diversité de situations rencontrées au cours d'une journée de production :

En début de journée, l'espacement cible se colle sur l'espacement acceptable, si celui-ci n'est pas trop éloigné de l'espacement optimal pour dégager progressivement une petite marge. Ensuite, l'espacement cible s'oriente vers l'espacement global, tant que celui-ci ne s'écarte pas trop de l'espacement buffer. Si la composition du stock

---

<sup>1</sup> Due à un interdit ou à une arrivée d'un lot de véhicules avec certains critères.

s'éloigne trop de l'espace global, alors le faisable, c'est-à-dire l'espace buffer, doit avoir priorité sur le souhaitable, c'est-à-dire sur l'espace global. Ces différentes phases sont bien sûr indépendantes pour les différents critères.

D'autres solutions sont envisageables. Pour ne pas perdre en généralité, nous supposons simplement que notre objectif est de respecter l'espace acceptable et de suivre le plus possible l'espace cible sans se soucier de sa nature.

### 3.3.3.3 Algorithme

L'idée de base de la méthode de re-séquencement par recherche par faisceau est simple. Connaissant l'état de la ligne<sup>1</sup>, on détermine les  $b$  meilleurs véhicules ordonnancés et on les classe par ordre croissant de coût en utilisant la métrique générative présentée dans le paragraphe suivant. Pour chacun de ces  $b$  meilleurs véhicules, on cherche à nouveau les  $b$  meilleurs successeurs et ainsi de suite jusqu'à une certaine profondeur de l'arbre ( $L$ ). La meilleure séquence de véhicules, celle qui présente le plus petit coût cumulé, est retenue et le premier véhicule de cette séquence est définitivement engagé. Ensuite un nouveau véhicule venant de peinture est admis dans le stock, les espacements sont mis à jour et l'algorithme itère.

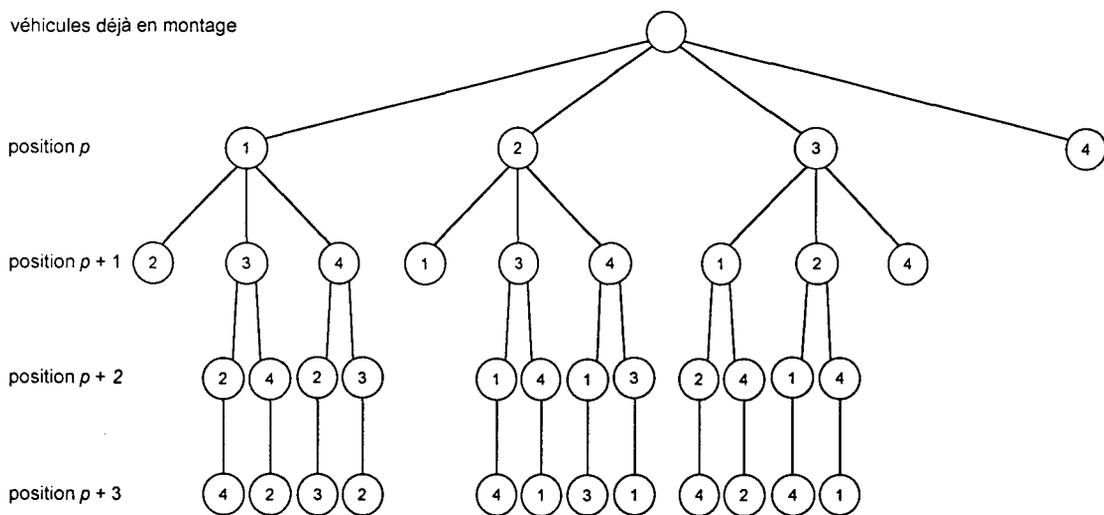


Figure 3.14 - Exemple d'arbre illustrant la méthode par faisceau

<sup>1</sup> i.e. les véhicules occupant les positions  $s$  pour  $s = 1, \dots, p - 1$ .

La Figure 3.14 illustre le cas d'un petit buffer contenant 4 véhicules, avec  $L = 4$ ,  $b_1 = 3$ ,  $b_2 = 2$ ,  $b_3 = 2$  et  $b_4 = 1$ . Le coût de chaque séquence partielle est mesuré grâce à la métrique générative présentée ci-dessous.

### 3.3.3.4 Métrique générative

Nous avons privilégié la recherche d'une métrique générative relativement simple. Cette simplicité présente un triple avantage :

- le principe de la métrique peut être facilement décrit aux différents intervenants de la ligne de production,
- les effets des éventuelles modifications sont facilement prévisibles,
- le temps de calcul respecte le temps de cycle.

Contrairement à la métrique évaluative, le calcul de la fonction de coût n'est ici réalisé que sur une séquence partielle. L'objectif est de chercher quels sont les  $b$  meilleurs véhicules à chaque niveau de l'arborescence. Pour chaque position de la séquence prévisionnelle, on teste donc l'ensemble des véhicules pouvant être envoyés au montage et non encore placés dans la séquence et on garde les  $b$  meilleurs, c'est-à-dire ceux qui donnent les coûts les plus faibles pour la séquence partielle. La longueur de cette séquence partielle dépend du niveau de l'arborescence dans lequel on se situe. Si les  $b$  meilleurs véhicules à trouver sont ceux qui occupent la première position de la séquence prévisionnelle (i.e. la position  $p$ ) alors la longueur de la séquence partielle est de une unité. Si l'on cherche le meilleur véhicule pour occuper la dernière position de la séquence prévisionnelle (i.e. la position  $p + L - 1$ ) alors la longueur de la séquence partielle est égale à  $L$ . Le coût d'une séquence partielle est donc la somme des pénalités reçues par les véhicules la composant. On a donc :

$$P_S = \sum_{s=p}^{p+t-1} P_s = \sum_{s=p}^{p+t-1} \sum_{c=1}^C \theta^c P_s^c$$

où  $t$  est le niveau de l'arborescence dans lequel on se situe. A chaque niveau de l'arborescence, les véhicules choisis et qui seront développés dans le niveau suivant, sont donc les véhicules qui minimisent  $P_S$ .

La pénalité reçue par un véhicule pour le critère  $c$  est donnée par :

- $P_s^c = P_{(1)}^c$ , si  $E^c < E_{acc}^c$  et si le véhicule présente le critère  $c$ ,
- $P_s^c = P_{(2)}^c$ , si  $E^c \geq E_{acc}^c$ ,  $E^c < E_{ctb}^c$  et si le véhicule présente le critère  $c$ ,  
ou si  $E^c \geq E_{acc}^c$ ,  $E^c > E_{ctb}^c$  et si le véhicule ne présente pas le critère  $c$ ,
- $P_s^c = 0$ , sinon.

La métrique générative pour la construction des séquences ressemble à celle utilisée pour l'évaluation mais ce n'est plus l'écart par rapport à l'espacement optimal qui est pénalisé mais celui par rapport à l'espacement cible. En effet, étant donné le caractère dynamique du problème qui induit une incertitude latente sur l'optimalité de chaque décision d'enlèvement d'un véhicule, la métrique comporte un aspect adaptatif. Compte tenu du fait que tout au long de la journée, il faut prendre des décisions basées sur des données instantanées et susceptibles de changer, on peut faire varier la valeur de l'espacement cible en fonction des circonstances<sup>1</sup>. Les pénalités  $P'_{(1)}$  et  $P'_{(2)}$  sont définies de la manière suivante :

$$P'_{(1)} = \beta \frac{[E_{acc}^c - E^c]^x}{E_{acc}^c} \quad \text{et} \quad P'_{(2)} = \frac{|E_{cib}^c - E^c|^y}{E_{cib}^c}$$

La valeur de la pénalité reçue en cas de violation de l'espacement acceptable,  $P'_{(1)}$ , reste inchangée par rapport à la métrique évaluative mais  $P'_{(2)}$  permet de prendre en compte le caractère dynamique du problème en pénalisant tout non-respect de l'espacement cible. De plus, la pénalisation des espacements supérieurs à l'espacement cible permet d'éviter le phénomène de 'cherry picking', c'est-à-dire l'accumulation dans le buffer des véhicules lourds.

Le coût des véhicules dépend bien entendu des véhicules qui les précèdent. Ces véhicules sont, soit des véhicules récemment envoyés en montage, soit des véhicules occupant les premières positions de la séquence prévisionnelle. Il est important de connaître le nombre de véhicules déjà enlignés à prendre en compte. Jusqu'à quel véhicule déjà présent sur la ligne de montage faut-il remonter pour évaluer, par exemple, le premier véhicule de la séquence prévisionnelle ? Avant de répondre à cette question, rappelons les hypothèses suivantes :

- le nombre de véhicules lancés en montage sur une journée de production est égal à  $N$ .
- la longueur de la séquence prévisionnelle est égale à  $L$ .
- la séquence prévisionnelle est donc composée des véhicules occupant les positions  $p$  à  $p + L - 1$ .

Et ajoutons celle-ci :

- le nombre de véhicules présents dans le buffer de re-séquenement à la date  $t$  est égal à  $V$ .

Afin de simplifier l'exposé, nous introduisons le concept de fenêtre [PAR 86][YAN 89]. Une fenêtre peut être définie comme étant une sous-séquence de  $n_c$  véhicules consécutifs si la contrainte d'espacement du critère  $c$  est :

---

<sup>1</sup> Cf. paragraphe 3.3.3.2.

'pas plus d'un véhicule portant le critère parmi  $n_c$  véhicules consécutifs'. Chaque fenêtre parcourt la séquence véhicule par véhicule, de gauche à droite, et, dans chacune de ces fenêtres, on calcule le nombre de véhicules portant le critère. Si ce nombre est supérieur à 1, le ou les véhicules en surnombre sont alors pénalisés.

Ici pour évaluer le meilleur  $p^{\text{ième}}$  véhicule, la seule fenêtre utile est la fenêtre qui contient le véhicule  $p$  à droite :

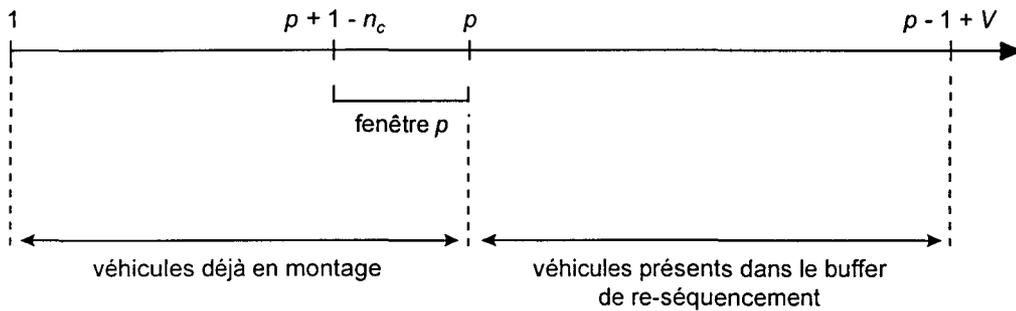


Figure 3.15 - Fenêtre utile pour la sélection du  $p^{\text{ième}}$  véhicule

Le premier véhicule à prendre en compte est donc, pour chaque critère  $c$ , le véhicule  $p+1-n_c$  et les véhicules présents dans cette fenêtre  $p$  sont des véhicules déjà présents sur la ligne de montage. Le fonctionnement de la procédure de pénalisation est proche de celui utilisé pour la métrique évaluative, mais elle est ici limitée aux véhicules occupant les positions  $s$  allant de  $p+1-n_c$  à  $p$  et seul le véhicule occupant la position  $p$  peut recevoir une pénalité. Elle utilise également la variable  $e(s)$  qui est incrémentée de 1 si le véhicule  $s$  ne porte pas le critère  $c$  et qui est décrétementée de la valeur de l'espace cible si le véhicule porte le critère. La procédure de pénalisation pour le premier véhicule de la séquence est la suivante (pour  $s = p+1-n_c, \dots, p$ ) :

Si le véhicule  $s$  porte le critère  $c$  alors

$$e(s) = e(s-1) - E_{cib}^c$$

Si  $e(s) \geq 0$ , alors

- le véhicule  $s$  ne viole aucun espacement,
- $e(s) = 0$ .

Si  $e(s) < 0$ , alors

- $E^c = E_{cib}^c + e(s)$

Si  $E^c < E_{acc}^c$ , alors

- le véhicule  $s$  viole l'espacement acceptable,

- Si  $s = p$ , la pénalité  $P_p^c$  reçue est égale à  $P_{(1)}^c$ ,

- $e(s) = 0$ .

Sinon,

- le véhicule  $s$  viole l'espacement cible,

- Si  $s = p$ , la pénalité  $P_p^c$  reçue est égale à  $P_{(2)}^c$ ,

- $e(s) = 0$ .

Si le véhicule  $s$  ne porte pas le critère  $c$  alors

$$e(s) = e(s-1) + 1$$

Si  $e(s) > E_{cib}^c$ , alors

- le véhicule  $s$  viole l'espacement cible,

- Si  $s = p$ , la pénalité  $P_p^c$  reçue est égale à  $P_{(2)}^c$  avec  $E^c = e(s)$ .

Pour calculer quel est le meilleur véhicule candidat pour occuper la position  $p + 1$  de la séquence prévisionnelle, on utilise la fenêtre  $p + 1$ . Celle-ci est occupée par  $n_c - 2$  véhicules déjà en montage, du véhicule occupant la première position de la séquence prévisionnelle<sup>1</sup>, et du véhicule candidat pour la position  $p + 1$ . La procédure de pénalisation est lancée sur ces véhicules. Les  $b$  meilleurs véhicules sont gardés et le processus est relancé pour les autres positions de la séquence prévisionnelle jusqu'à la position  $p + L - 1$ .

<sup>1</sup> i.e. la position  $p$ .

### 3.3.3.5 Indicateurs de paramétrage de l'algorithme

Les paramètres les plus pertinents de l'algorithme sont les largeurs des différents niveaux et la profondeur de l'arbre de recherche. Pour analyser l'influence de ces paramètres, les indicateurs suivants ont été introduits : le vecteur de stabilité de séquence ( $S$ ) et la matrice de préférence ( $P$ ) [CAS 95][DEL 96b].

- **Vecteur de stabilité de séquence ( $S$ )**

Comme indiqué précédemment, il n'existe aucune garantie qu'une séquence prévisionnelle puisse être maintenue sur un horizon supérieur à 1. Afin de déterminer la stabilité des véhicules de la séquence prévisionnelle, on définit le vecteur  $S$ , de dimension  $L - 1$ <sup>1</sup>, initialisé à 0. La composante  $i$  de ce vecteur représente la fraction de véhicules qui se trouvaient à la position  $i + 1$  dans la séquence prévisionnelle et qui ont été effectivement enlignés au bout de  $i$  itérations plus tard.

En normant les composantes de  $S$ , on obtient un vecteur  $S'$  qui indique la stabilité pour chaque position d'une séquence prévisionnelle.

Considérons l'exemple suivant d'un vecteur  $S$  de dimension 3 :

<i>Itération</i>	<i>Séquence prévisionnelle</i>				<i>Véhicule engagé</i>	<i>Vecteur S</i>		
1	A	B	C	D	A			
2	B	C	D	E	B	1		
3	C	D	E	F	C	2	1	
4	D	E	G	H	D	3	2	1
5	I	E	G	H	I	3	2	1
6	E	G	H	J	E	4	2	1
7	G	H	K	J	G	5	3	1
						83 %	60 %	25 %
						<i>Vecteur S'</i>		

A l'itération 2, la séquence prévisionnelle générée par l'algorithme est B-C-D-E. Le véhicule lancé en montage est donc le véhicule B. Comme ce véhicule se trouvait en deuxième position à l'itération précédente, la première composante du vecteur  $S$  est incrémentée de 1.

<sup>1</sup> Profondeur de l'arbre - 1.

A l'itération 3, la séquence générée est C-D-E-F. Le véhicule engagé est par conséquent le véhicule C. Ce véhicule se trouvait en deuxième position dans la séquence précédente ; la première composante du vecteur  $S$  est incrémentée. Comme ce même véhicule  $C$  se trouvait en 3<sup>ème</sup> position dans la séquence calculée à l'itération 1, la deuxième composante de  $S$  est également incrémentée.

A l'itération 4, le véhicule D est envoyé en montage. Étant donné que ce véhicule occupait respectivement les deuxième, troisième et quatrième positions aux itérations 3,2 et 1, les trois composantes du vecteur sont incrémentées.

Par contre, à la 5<sup>ème</sup> itération, le véhicule enligné ne figurait pas dans les trois séquences précédemment générées<sup>1</sup>. Le vecteur  $S$  reste donc inchangé.

Ainsi si de suite jusqu'à l'itération 7. Le vecteur  $S$  obtenu est le suivant : 5-3-1. Le vecteur  $S'$  est alors : 83 % - 60 % - 25 %. Ce vecteur doit être interprété comme suit : il y a 83 % de chances pour qu'un véhicule se trouvant en deuxième position dans une séquence prévisionnelle soit effectivement envoyé en montage, une itération plus tard. Ce pourcentage n'est plus que de 25 % pour un véhicule occupant la quatrième position d'une séquence prévisionnelle.

Dans le cas général, le vecteur  $S'$  peut servir à deux choses :

- \* Indiquer une profondeur « optimale » de l'arbre de recherche. On peut se fixer un seuil (0,5 par exemple) au delà duquel on juge inopportun de déterminer une séquence, car la probabilité de garder cette séquence est trop faible. Le vecteur  $S$  permet donc de dimensionner la longueur  $L$  de la séquence prévisionnelle.
- \* Utiliser les composantes de  $S'$  pour pondérer le coût d'une séquence prévisionnelle. Effectivement, si on donne le même poids au premier et au dernier véhicule d'une séquence prévisionnelle, on risque d'accepter un « mauvais » véhicule en début de séquence (et donc de l'engager définitivement) seulement parce que le reste de la séquence possède un très faible coût. Comme cette séquence sera remise en cause avec une certaine probabilité, on échange donc une perte certaine contre un gain plus ou moins probable. Si la probabilité de ce gain est trop faible, ce compromis n'est pas intéressant. Une

---

<sup>1</sup> Ce véhicule est peut-être un véhicule qui vient d'arriver dans le stock ou qui était touché par un interdit de montage qui vient d'être levé.

pondération du coût d'une séquence par les probabilités de la garder tient donc compte de l'aspect dynamique du problème, et on évite ainsi de succomber à l'appât d'un gain improbable.

La stabilité de la séquence prévisionnelle dépend également du type de buffer de re-séquencement considéré. Les contraintes physiques que présente une architecture à tiroirs influent directement sur la stabilité de la séquence prévisionnelle. En effet, l'arrivée d'un nouveau véhicule dans un tiroir ne remet pas en cause la séquence bâtie auparavant car le véhicule ne peut pas être enligné rapidement à cause des véhicules qui le précèdent<sup>1</sup>. Dans ce cas, il peut être intéressant de bâtir des séquences prévisionnelles plus longues.

- **Matrice de préférence ( $P$ )**

Si l'arbre de recherche a une profondeur  $L$  et une largeur maximale  $b$ , la matrice  $P$  est de dimension  $L \times b$ . La composante  $p_{ij}$  représente le nombre de fois qu'une séquence retenue contient à sa  $i^{\text{ème}}$  place un véhicule du  $j^{\text{ème}}$  choix. Chaque fois qu'un véhicule est envoyé en ligne, cette matrice est mise à jour.

Considérons par exemple l'arbre de recherche de la Figure 3.16. Le balayage réalisé est de profondeur 4 et de largeur 3 quelque soit le niveau. Seuls les trois meilleurs successeurs de chaque nœud sont développés. Le chiffre associé à chaque branche correspond au classement des nœuds d'un même niveau. Ainsi au niveau 1 de l'arbre, le nœud présentant le plus faible coût est le nœud de gauche, suivi du nœud du centre et du nœud de droite.

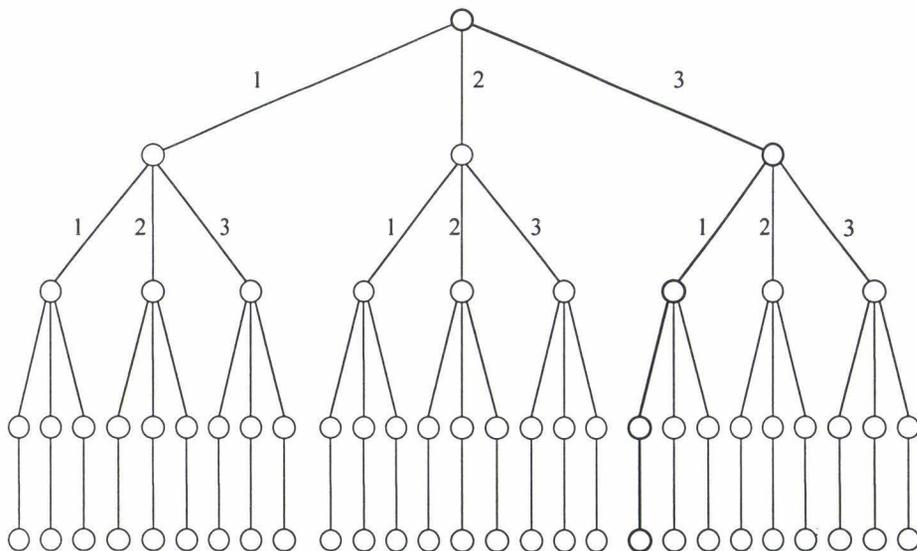


Figure 3.16 - Arbre de recherche

<sup>1</sup> Sauf le tiroir est vide ou très peu rempli.

Pour le dernier niveau, seuls les meilleurs successeurs de chaque nœud sont cherchés car les autres ont forcément des coûts cumulés plus grands.

Suivons l'évolution de la matrice  $P$  dans ce cas. La matrice est tout d'abord initialisée :

$$P = \begin{matrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{matrix}$$

Si la meilleure séquence de véhicules est, par exemple, obtenue sur le chemin 3-1-1-1 (en gras sur la Figure 3.16). Cela signifie que la meilleure séquence est composée du troisième meilleur choix en première position et des meilleurs choix pour les autres positions, le premier véhicule est ordonnancé et la matrice  $P$  est mise à jour :

$$P = \begin{matrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{matrix}$$

Si le prochain véhicule à engager provient du chemin 1-1-1-1, la matrice  $P$  devient :

$$P = \begin{matrix} 1 & 0 & 1 \\ 2 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 \end{matrix}$$

Les expérimentations effectuées sur des données aléatoires indiquent que la matrice a une structure à peu près triangulaire. Une matrice type obtenue à la fin d'une simulation est par exemple :

$$P = \begin{matrix} 40 & 31 & 15 \\ 58 & 26 & 2 \\ 78 & 8 & 0 \\ 86 & 0 & 0 \end{matrix}$$

L'explication est la suivante : si on prend comme premier véhicule de la séquence prévisionnelle un véhicule qui est le deuxième ou troisième choix, il existe une certaine probabilité que cette perte soit rattrapée par trois véhicules suivants à faible coût. Si le troisième véhicule est du deuxième ou troisième choix, il faut absolument que le dernier véhicule de la suite compense cette perte. Cette probabilité est petite et le cas où une telle séquence est la meilleure est rare.

La vérification de ces résultats sur des données réelles peut alors conduire à la définition d'une largeur de recherche  $b$  optimale. On peut même adapter encore plus efficacement la méthode au problème en définissant une

largeur de recherche optimale  $b_s$  pour chaque niveau  $s$  de l'arborescence. On obtient ainsi une caractérisation de l'arbre de recherche optimal. Dans l'exemple de matrice  $P$  donné précédemment, on aurait ainsi pu se contenter d'avoir  $b_1 = 3$ ,  $b_2 = 3$ ,  $b_3 = 2$  et  $b_4 = 1$ , voire même  $b_1 = 3$ ,  $b_2 = 2$ ,  $b_3 = 2$  et  $b_4 = 1$ .

L'inconvénient des indicateurs  $P$  et  $S$  est que leurs valeurs sont obtenues par le déroulement de jeux d'essais qui nécessitent eux-mêmes des hypothèses sur la structure de l'arbre de recherche et sur la pondération des coûts de véhicules dans une séquence prévisionnelle. On a, en fait,  $P = f(P, S)$  et  $S = g(P, S)$ . De plus,  $P$  et  $S$  dépendent évidemment des données spécifiques de chaque jeu d'essai et il est donc impossible de connaître a priori leurs valeurs optimales. Pour une utilisation industrielle, nous proposons de procéder par apprentissage pour établir de façon prédictive des paramètres de l'algorithme.

### 3.3.3.6 Résumé de la démarche

Les différentes étapes de la procédure utilisant la recherche par faisceau sont résumées ci-dessous :

1. Fixer la profondeur  $L$  de l'arbre de recherche ainsi que les largeurs  $b_j$  des différents niveaux en exploitant les vecteurs  $P$  et  $S$  obtenus précédemment sur des journées de production comparables.
2. Pour  $i = 1, \dots, N$ ,  $N$  étant le nombre total de véhicules à produire.
3.  $c_0 = 1$ .
4. Pour  $j = 1, \dots, L$ 
  5. Déterminer les  $b_j$  meilleurs successeurs de chacun des  $c_{j-1}$  nœuds gardés au niveau précédent grâce à la métrique générative,
  6.  $c_j = c_{j-1} \times b_j$ .
7. Le premier véhicule de la séquence prévisionnelle qui a le plus petit coût cumulé est envoyé en montage.
8. Prendre en compte les modifications de la composition du buffer de re-séquencement.
9. Retour à l'étape 2
10. Évaluer la qualité du re-séquencement obtenu grâce à la métrique évaluative.

### 3.3.3.7 Conclusion

La méthode utilisant la recherche par faisceau consiste en fait à effectuer une recherche quasi-exhaustive sur l'arbre de recherche maximal de taille  $n/n-1/n-2/.../1$  dans lequel on s'est limité :

- en largeur, parce que les choix à partir d'un certain  $b$  sont trop mauvais,
- en profondeur, parce que la probabilité de réaliser effectivement une séquence prévisionnelle d'une longueur plus grande qu'un certain  $L$  devient trop faible.

Ces coupures de l'arbre de recherche peuvent être justifiées grâce à des indicateurs pertinents. Si on suppose que ces indicateurs sont fiables bien qu'ils soient basés sur des statistiques d'observations précédentes, l'algorithme peut être considéré comme optimal, car exhaustif dans la partie intéressante de l'arbre. La réalisation de bonnes séquences dépend alors uniquement de l'ajustement judicieux des paramètres de la métrique générative et du choix de l'espace cible.

La méthode est, de plus, bien adaptée à l'aspect dynamique du problème car elle prend en compte des phénomènes tels que le roulement de stock et offre une bonne réactivité aux aléas.

L'algorithme est utilisable pour les deux types de buffer de re-séquencement. Si le buffer est une architecture à tiroirs, une heuristique doit être développée pour l'affectation en entrée des tiroirs<sup>1</sup>. Dans ce cas, la méthode présentée devrait mener à des séquences prévisionnelles plus longues parce qu'une nouvelle arrivée de peinture peut ne pas être insérée avant un certain rang.

## 3.3.4 Mise en œuvre du recuit simulé

### 3.3.4.1 Introduction

La méthode du recuit simulé a été présentée dans le paragraphe 3.2.1.3 de cette thèse. Cette méthode a déjà été appliquée avec succès au problème de séquencement statique d'une ligne de production automobile [CHE 91]. Son application au problème de re-séquencement en entrée montage n'en est pas pour autant immédiate. En effet, le principe du recuit simulé est de faire subir à une solution initiale quelconque, des modifications élémentaires de faible coût. Dans notre problème de re-séquencement, il est nécessaire de bâtir une séquence contenant l'intégralité

---

<sup>1</sup> Cf. chapitre 2.4.3.2

des véhicules présents dans le buffer et de l'améliorer grâce à des permutations et des insertions. Le lancement d'une procédure de recuit simulé sur l'intégralité des véhicules du stock présente deux inconvénients majeurs :

- le temps de calcul nécessaire à l'obtention d'une bonne solution globale,
- la solution extraite de la méthode respecte à tout instant les ratios des critères que possèdent les véhicules présents dans le stock. Si ces ratios sont à un instant donné très perturbés, la solution résultante sera très mauvaise.

Ce second point peut être mis en évidence sur les deux cas extrêmes suivants :

- Si un critère est beaucoup trop présent dans le buffer, les véhicules correspondants seront enlignés sans être au minimum séparés par l'espacement acceptable.
- A l'inverse, si un critère est ponctuellement peu présent dans le stock, une méthode globale espacera au maximum ces critères sans respecter l'espacement cible.

De plus, étant donné le caractère dynamique du problème, nous avons vu qu'il n'était pas nécessaire, ni même intéressant, de bâtir des séquences prévisionnelles plus longues qu'une certaine valeur  $L$  car celles-ci étaient remises en cause à chaque arrivée d'un nouveau véhicule dans le stock ou à chaque apparition d'un aléa de production.

Deux solutions permettant d'adapter la méthode de recuit simulé à notre problème de re-séquencement sont envisageables :

- a) extraire de l'ensemble des véhicules présents dans le buffer de re-séquencement, un ensemble réduit de véhicules représentatifs de la qualité générale du stock.
- b) s'intéresser davantage au début de la séquence comprenant l'intégralité des véhicules du stock.

La première solution est difficilement applicable dans le cas de l'autostockeur car il est difficile de trouver un critère de sélection pertinent. Dans le cas d'une architecture à tiroirs, il est par contre possible de ne considérer qu'une partie du stock<sup>1</sup> sans dégrader sérieusement la qualité des séquences. Mais le risque, dans le cas de l'autostockeur, est de bâtir de mauvaises séquences alors que tous les éléments étaient réunis pour en bâtir de bonnes. C'est la seconde solution qui a donc été mise en œuvre [DEL 95]. Cette solution sera décrite dans la partie traitant de la métrique générative.

La mise en œuvre du recuit simulé nécessite la définition :

- de la fonction de voisinage, c'est-à-dire des modifications élémentaires utilisées,
- de la fonction de coût, c'est-à-dire de la métrique générative,

---

<sup>1</sup> C'est ce que nous avons appelé l'enveloppe ré-ordonnançable dans le paragraphe 2.4.3.2.

- de la configuration initiale,
- des plans de recuit utilisés.

Ces quatre points sont exposés dans les prochains paragraphes.

### 3.3.4.2 Les différents types de modifications élémentaires utilisés

Dans la méthode du recuit simulé, l'affinement de la solution courante se fait par génération d'un voisin obtenu par une modification élémentaire. Les modifications élémentaires sont dans notre cas très naturelles et faciles à concevoir. Il s'agit de l'insertion d'un véhicule ou de la permutation de deux véhicules. Deux types de modification élémentaire ont été utilisés car la pratique a montré que les performances de l'algorithme de recuit simulé augmentaient quand plusieurs types de modifications étaient utilisés simultanément. Un autre type de modification, l'inversion, était envisageable mais son application modifie trop fortement la séquence pour pouvoir être utilisée. Cette modification consiste en effet à choisir deux véhicules et à inverser l'ordre des véhicules situés entre ces deux positions. Si les deux véhicules choisis sont éloignés l'un de l'autre, la modification ne peut plus être qualifiée de locale. La notion de voisinage, importante pour les performances de l'algorithme, est alors mal respectée. De plus le calcul de la modification de coût entre les deux séquences devient gourmand en temps de calcul et empêche que de nombreuses modifications soient essayées.

- *la permutation*

Cette modification consiste à choisir au hasard deux véhicules dans la solution courante et à les permuter (cf. Figure 3.17).

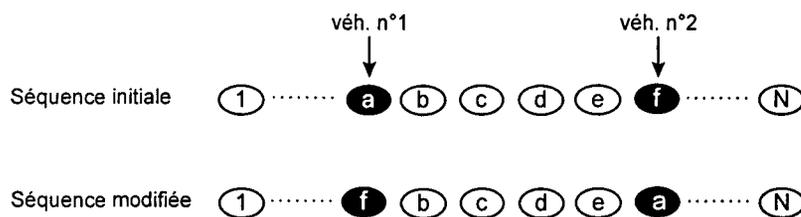


Figure 3.17 - Exemple de permutation

Dans le cas d'un autostockeur, l'échange est toujours possible. Dans le cas d'une architecture à tiroirs, il faut vérifier la faisabilité de la permutation. En effet, l'architecture à tiroirs est une architecture contrainte car la permutation de deux véhicules présents dans un même tiroir est impossible. Il faut donc s'assurer que la

modification envisagée est compatible avec les relations d'ordre induites par chacun des tiroirs. Si les deux véhicules à permuter sont choisis au hasard, l'échange est rarement réalisable.

- *l'insertion*

Cette modification élémentaire consiste à choisir au hasard un véhicule dans la solution courante et un point d'insertion (cf. Figure 3.18).

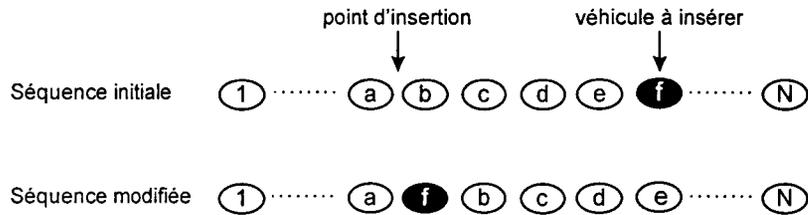


Figure 3.18 - Exemple d'insertion

Il est à noter que la permutation de deux véhicules est un cas particulier de deux insertions où chaque point d'insertion correspond à la position initiale de l'autre véhicule.

Dans le cas d'une architecture à tiroirs, l'insertion est beaucoup plus facile à mettre en œuvre que la permutation. En effet, pour un véhicule (a) choisi aléatoirement, le domaine d'insertion possible est limité par le véhicule précédent et par le véhicule suivant du tiroir originel de (a) (cf. Figure 3.19), où  $(a) = (t, r, s)$ ,  $t$  étant le numéro d'un tiroir originel de (a),  $r$  le rang de (a) dans ce tiroir, et  $s$  le rang de (a) dans la solution courante.

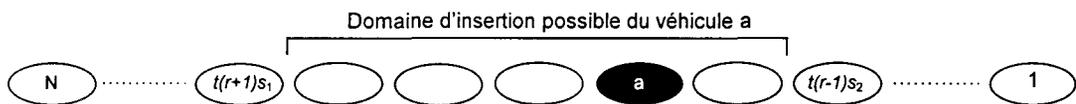


Figure 3.19 - Insertion d'un véhicule dans une architecture à tiroirs

Les deux types de modifications sont très faciles à mettre en œuvre dans le cas de l'autostockeur, un peu plus délicates dans le cas d'une architecture à tiroirs. Dans les deux cas, elles permettent d'engendrer tout l'espace des configurations, ce qui est une condition de réussite d'une procédure de recuit simulé.

### 3.3.4.3 Métrique générative

Pour qu'une procédure de recuit simulé soit efficace, il faut que le calcul de la différence de coût entre deux solutions voisines soit rapide et indépendant de la taille du problème. Il n'est pas raisonnable de recalculer le coût

total de la séquence à chaque modification élémentaire. Le calcul de la nouvelle valeur de la fonction de coût doit s'appuyer sur un calcul local effectué dans les parties concernées par cette modification. Cette nouvelle valeur est obtenue grâce à l'opération suivante :

ancienne valeur de la fonction de coût

- ancienne valeur de la fonction de coût sur la partie de la séquence concernée par la modification élémentaire

+ nouvelle valeur de la fonction de coût sur la partie de la séquence concernée par la modification élémentaire

---

= nouvelle valeur de la fonction de coût

Deux métriques sont donc nécessaires à la mise en œuvre de la méthode par recuit simulé :

- \* une métrique globale permettant de calculer la valeur de la fonction de coût de la séquence initiale,
- \* une métrique locale permettant de calculer localement la fonction de coût.

Afin de pouvoir calculer localement les coûts des modifications élémentaires et d'augmenter la rapidité de calcul, les pénalités reçues par les véhicules violant les espacements acceptables ou cibles sont simplifiées. La simplification principale est que les espacements supérieurs à l'espacement cible ne sont plus pénalisés. Etant donné que la séquence évaluée contient l'ensemble des véhicules du buffer, cette simplification n'est pas gênante. En effet, comme l'espacement cible tient compte de l'état du stock, si certains espacements sont supérieurs à l'espacement cible, il est probable que d'autres espacements lui sont inférieurs. Par conséquent, minimiser les espacements inférieurs à l'espacement cible revient à minimiser également les espacements supérieurs à celui-ci.

- *métrique globale*

La métrique globale doit permettre de calculer la valeur de la fonction de coût de la séquence initiale comprenant l'intégralité des véhicules du stock. Cette métrique est proche de la métrique évaluative puisqu'elle aussi mesure la qualité d'une séquence, mais contrairement à la métrique évaluative, la métrique générative globale pénalise les violations de l'espacement cible et non plus de l'espacement optimal. De plus la séquence est évaluée en tenant compte des  $n_c - 1$  véhicules déjà envoyés en montage. On prend ainsi en compte les conditions initiales. Si  $V$  est le nombre de véhicules présents dans le buffer de re-séquencement, la valeur de la fonction de la séquence initiale  $S$  est :

$$P_s = \sum_{s=p}^{p+V-1} P_s = \sum_{s=p}^{p+V-1} \sum_{c=1}^C \theta^c P_s^c$$

La pénalité reçue par un véhicule pour le critère  $c$  est donnée par :

- a)  $P_s^c = f(s) \times P_{(1)}^c$ , si  $E^c < E_{acc}^c$  et si le véhicule présente le critère  $c$ ,
- b)  $P_s^c = f(s) \times P_{(2)}^c$ , si  $E^c \geq E_{acc}^c$ ,  $E^c < E_{cib}^c$  et si le véhicule présente le critère  $c$ .

avec, comme dans la métrique générative de la méthode par recherche par faisceau,

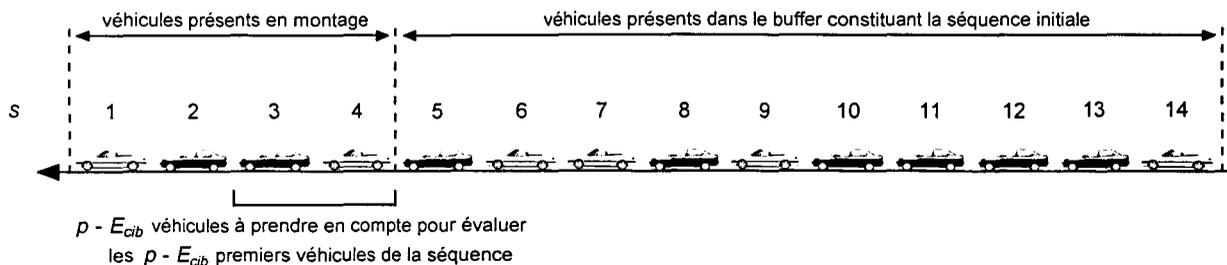
$$P_{(1)}^c = \beta \frac{[E_{acc}^c - E^c]^x}{E_{acc}^c} \quad \text{et} \quad P_{(2)}^c = \frac{[E_{cib}^c - E^c]^y}{E_{cib}^c}$$

Les cas a) et b) correspondent respectivement à la violation de l'espace acceptable et à la violation de l'espace cible. Les pénalités  $P_{(1)}^c$  et  $P_{(2)}^c$  sont ici pondérées par la fonction  $f$  dépendant de la valeur de  $s$ . Cette pondération permet de donner un poids plus important aux premiers véhicules de la séquence qu'aux autres afin d'empêcher d'envoyer en montage un mauvais véhicule parce que le reste de la séquence possède un faible coût. La fonction  $f$  peut être du style :

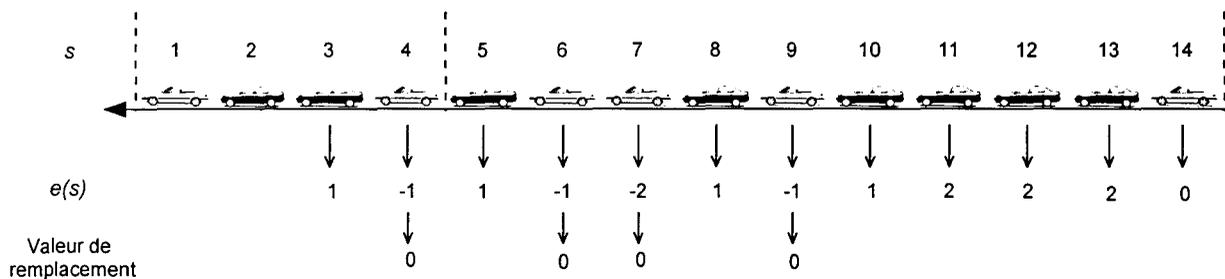
$$f(s) = (p+V-s), \quad \text{si } p \leq s \leq p+L-1$$

$$f(s) = 1, \quad \text{si } s > p+L-1$$

La procédure de pénalisation doit être initialisée en tenant compte des  $n_c - 1$  véhicules déjà présents dans l'atelier de montage. La métrique globale utilise la variable  $e(s)$  qui est incrémentée de 1 si le véhicule  $p$  ne porte pas le critère  $c$  et qui est décrétementée de la valeur de l'espace cible si le véhicule porte le critère. Quand la valeur de  $e(s)$  devient négative, c'est que l'espace entre le dernier véhicule portant le critère et le véhicule  $s$  est inférieur soit à l'espace cible, soit à l'espace acceptable. Comme on ne pénalise pas les espaces supérieurs à l'espace cible, la valeur de  $e(s)$  est bornée par la valeur de l'espace cible. Le calcul de la valeur de la variable  $e(s)$  doit donc être effectué pour les valeurs de  $s$  variant de  $p - E_{cib}^c$  à  $p+V-1$ . Considérons l'exemple suivant :



Les véhicules clairs portent le critère  $c$ , l'espacement cible est égal à 2 et l'espacement acceptable est égal à 1. Dans cet exemple,  $p = 5$  et  $V = 10$ . La procédure de pénalisation commence par le calcul des différentes valeurs de la variable  $e(s)$  pour  $s$  variant de  $p - E_{cib}^c$  à  $p + V - 1$ . Pour l'exemple considéré on a :



Comme on ne pénalise pas les espacements supérieurs à l'espacement cible,  $e(s)$  est bornée par  $E_{cib}^c = 2$ .

La procédure de pénalisation pour  $s$  variant de  $p - E_{cib}^c$  à  $p + V - 1$  est la suivante :

Si le véhicule  $s$  porte le critère  $c$  alors

$$e(s) = e(s-1) - E_{cib}^c,$$

Si  $e(s) \geq 0$ , alors - le véhicule  $s$  ne viole aucun espacement,  
-  $e(s) = 0$ .

Si  $e(s) < 0$ , alors -  $E^c = E_{cib}^c + e(s)$

Si  $E^s < E_{acc}^c$ , alors - le véhicule  $s$  viole l'espacement acceptable,

- Si  $s \geq p$ , la pénalité  $P_s^c$  reçue est égale à  $f(s) \times P_{(1)}^c$ ,  
-  $e(s) = 0$ .

Sinon, - le véhicule  $s$  viole l'espacement cible,

- Si  $s \geq p$ , la pénalité  $P_s^c$  reçue est égale à  $f(s) \times P_{(2)}^c$ ,  
-  $e(s) = 0$ .

Si l'on suppose que  $x = 2, y = 1,6, \beta = 100$  et  $L = 3$ , alors

• le véhicule 6 reçoit une pénalité  $P_6 = (5 + 10 - 6) \times \frac{(2-1)^2}{2} = 4,5$

• le véhicule 7 reçoit une pénalité  $P_7 = (5 + 10 - 7) \times 100 \times \frac{(1-0)^2}{1} = 800$

• le véhicule 9 reçoit une pénalité  $P_9 = \frac{(2-1)^2}{2} = 0,50$

La pénalité totale reçue par la séquence  $S$  est donc :

$$P_S = \sum_{s=p}^{p+V} P_s = P_6 + P_7 + P_9 = 805$$

• *métrique locale*

La métrique locale doit permettre de calculer la différence de coût entre deux solutions voisines. La procédure de pénalisation est différente selon qu'il s'agit d'une permutation ou d'une insertion. Considérons tout d'abord le cas d'une permutation.

\* permutation

Soit  $S$ , la séquence de départ et  $S'$ , la séquence obtenue par la permutation des deux véhicules occupant les positions  $v_1$  et  $v_2$  dans la séquence initiale. La métrique locale doit d'abord mesurer le coût local de la solution initiale ( $P_{I1}$ ) autour des deux véhicules qui seront permutés. Les coûts des véhicules  $v_1$  et  $v_2$  dépendent des  $n_c - 1$  véhicules qui les précèdent et  $v_1$  et  $v_2$  influencent le coût des  $n_c - 1$  véhicules qui les suivent. Le coût local de la solution initiale est donc :

$$P_{I1} = P_{S(v_1)} + P_{S(v_2)}$$

$$\text{avec, } P_{S(v_1)} = \sum_{s=v_1}^{v_1+n_c-1} P_s = \sum_{s=v_1}^{v_1+n_c-1} \sum_{c=1}^C \theta^c P_s^c \quad \text{et} \quad P_{S(v_2)} = \sum_{s=v_2}^{v_2+n_c-1} P_s = \sum_{s=v_2}^{v_2+n_c-1} \sum_{c=1}^C \theta^c P_s^c$$

De même, le coût local de la solution générée par la permutation est donné par :

$$P_{I2} = P_{S'(v_1)} + P_{S'(v_2)}$$

Le processus de pénalisation employé est identique à celui de la métrique globale et il tient compte des  $n_c - 1$  véhicules précédant  $v_1$  et  $v_2$ . Le coût de la nouvelle séquence ( $S'$ ) est donc :

$$P_{S'} = P_S - P_{I1} + P_{I2}$$

\* insertion

Dans le cas de l'insertion du véhicule occupant la position  $s_1$  à la position  $s_2$ , le procédé est un peu différent car le coût du voisinage du point d'insertion ne prend en compte que  $n_c - 1$  véhicules. On a :

$$P_{I1} = P_{S(s_1)} + P_{S(s_2)}$$

$$\text{avec, } P_{S(s_1)} = \sum_{s=s_1}^{s_1+n_c-1} P_s = \sum_{s=s_1}^{s_1+n_c-1} \sum_{c=1}^C \theta^c P_s^c \quad \text{et} \quad P_{S(s_2)} = \sum_{s=s_2}^{s_2+n_c-2} P_s = \sum_{s=s_2}^{s_2+n_c-2} \sum_{c=1}^C \theta^c P_s^c$$

Le coût local de la solution générée par l'insertion est donc donné par :

$$P_{I2} = P_{S'(s_1)} + P_{S'(s_2)}$$

$$\text{avec, } P_{S'(s_1)} = \sum_{s=s_1+1}^{s_1+n_c-1} P_s = \sum_{s=s_1+1}^{s_1+n_c-1} \sum_{c=1}^C \theta^c P_s^c \quad \text{et} \quad P_{S'(s_2)} = \sum_{s=s_2}^{s_2+n_c-1} P_s = \sum_{s=s_2}^{s_2+n_c-1} \sum_{c=1}^C \theta^c P_s^c$$

Le coût de la nouvelle séquence ( $S'$ ) est :

$$P_{S'} = P_S - P_{I1} + P_{I2}$$

La métrique générative présentée ici permet de mettre en œuvre la procédure de recuit simulé. Le calcul des différences de coût engendrées par les modifications élémentaires ne dépend pas du nombre de véhicules de la séquence mais uniquement de la partie de séquence modifiée. L'effet de la pondération par la fonction  $f$  permet de privilégier le début de la séquence afin de limiter le nombre de violations dans cette partie plus sensible. Il est également envisageable d'intensifier les modifications dans cette partie de la séquence. Il est en effet inutile de passer trop de temps à améliorer la fin de la séquence puisque les véhicules ont peu de chance d'être effectivement enlignés dans cet ordre.

Il est intéressant de noter que la mise en œuvre du recuit simulé n'aurait pas été possible si la modélisation retenue avait été la modélisation de la charge effective des postes de travail. En effet, une modification élémentaire aurait nécessité le calcul complet des charges de tous les postes. Le fait que les espacements entre critères ne soient pas mesurés par rapport à une origine fixe était présenté comme une limite de la modélisation par espacement. Cela s'avère être une condition indispensable à la mise en œuvre de la procédure de recuit simulé.

#### 3.3.4.4 Configuration initiale

La qualité de la configuration initiale n'a pas d'influence directe sur la qualité de la solution finale. Cependant, si l'on dispose d'une bonne configuration initiale, le temps de calcul peut être réduit car l'algorithme peut commencer avec une valeur de température plus faible. Le risque d'une telle opération est qu'en partant avec une température trop basse, on ne puisse s'extraire d'un minimum local profond. Mais, étant donné que le temps de cycle nous impose de trouver rapidement une bonne solution, il n'est pas envisageable de « chauffer » la solution à des températures élevées à chaque lancement de la procédure de recuit simulé. La méthode que nous avons employée dans le cas de l'autostockeur est la suivante : au début de la journée de production et à partir d'une solution initiale quelconque, on lance une recherche d'une très bonne solution sur un temps supérieur au temps de cycle. Ce premier recuit est appelé le recuit initial. Le premier véhicule de la séquence ainsi trouvée est envoyé en montage et un véhicule arrivant de l'atelier de peinture est admis dans l'autostockeur. Ce véhicule est ensuite placé en dernière position de la séquence précédemment calculée. Cette nouvelle séquence constitue la configuration initiale de la prochaine procédure de recuit. Cette configuration peut être qualifiée de bonne et le recuit peut être lancé en partant d'une température plus basse afin de respecter le temps de cycle. Cette seconde procédure de recuit est appelée recuit dynamique et elle sera utilisée jusqu'à la fin de la journée de production.

Si le buffer de re-séquencement est une architecture à tiroirs, chaque véhicule arrivant de l'atelier de peinture doit être affecté dans un des tiroirs et un algorithme d'entrée doit donc être lancé entre deux recuits dynamiques.

### 3.3.4.5 Plans de recuit utilisés

On appelle plan de recuit, le réglage des différents paramètres de l'algorithme : température initiale, critère d'arrêt de l'algorithme, longueur des chaînes de Markov et loi de décroissance de la température [BON 91]. Les valeurs choisies pour ces paramètres dans notre procédure sont présentées dans ce paragraphe. Aucune valeur numérique n'est donnée car ces valeurs dépendent de la taille et de la nature du problème traité.

- *température initiale*

Un choix de température initiale,  $T_0$ , trop grande entraîne beaucoup de remontées, donc une convergence lente. A l'inverse une température trop basse, risque de « geler » l'algorithme dans un minimum local. Classiquement la température initiale est obtenue grâce à l'expression [AAR 87] :

$$T_0 = \frac{\overline{\Delta T}^{(+)}}{\ln(\chi_0^{-1})}$$

où  $\overline{\Delta T}^{(+)}$  est l'approximation de la moyenne des variations de coût positives pour une valeur nulle de la température et où  $\chi_0$ , est la probabilité d'acceptation initiale d'une modification élémentaire. Nous acceptons plus de dégradations de la solution dans le recuit initial que dans les recuits dynamiques, donc la valeur de  $\chi_0$  est plus grande dans ce cas.

- *critère d'arrêt*

La convergence théorique de l'algorithme de recuit simulé est assurée quand  $k \rightarrow +\infty$ ,  $k$  étant le nombre de paliers de température. Il faut cependant bien fixer une durée maximale. Plusieurs critères sont envisageables :

- \* un nombre maximal de modifications élémentaires est atteint,
- \* une température finale est atteinte,
- \* le pourcentage d'acceptations devient inférieur à une valeur donnée,
- \* il n'y a plus d'améliorations depuis un certain nombre d'itérations, ...

Comme le temps de calcul est borné par le temps de cycle dans le recuit dynamique et que nous sommes désireux de « maîtriser » la durée de la procédure, seuls les deux premiers critères sont utilisables. Nous avons utilisé le critère de température suivant :

$$T_k \leq T$$

où  $T$  est la température finale donnée. Cette température doit être suffisamment basse pour que le nombre d'améliorations soit très faible, c'est-à-dire qu'un minimum, même local, soit atteint.

- *longueur des chaînes de Markov*

La longueur  $L_k$  des chaînes de Markov correspond au nombre maximal de modifications élémentaires réalisées à température constante. Ce nombre est également appelé la longueur des paliers. Plus ce nombre est petit, plus les chances d'atteindre l'optimum global sont faibles car le nombre de détériorations de la solution acceptée est réduit. Par contre, plus ce nombre est élevé, plus la procédure est lente. Différents choix sont possibles :

- \* longueur constante,  $L_k = \text{cte}$ ,
- \* longueur arithmétique  $L_k = L_{k-1} + \text{cte}$ ,
- \* longueur géométrique  $L_k = L_{k-1}/a_k$ ,
- \* longueur logarithmique  $L_k = C_R/\ln(C_k)$ , ...

Toujours par volonté de maîtrise du temps de calcul, nous utilisons une longueur de paliers constante pour les deux types de recuit, initial et dynamique.

- *loi de décroissance de la température*

La loi de croissance fixe, pour chaque valeur de la température, la probabilité d'acceptation de modifications élémentaires dégradantes. Si cette probabilité est grande, la convergence risque d'être lente. Si elle est faible, seule une partie de l'espace des configurations sera visitée. Là encore, plusieurs choix peuvent être proposés :

- \* température constante  $T_k = \text{cte}$ ,
- \* décroissance arithmétique  $T_k = T_{k-1} + \text{cte}$ ,
- \* décroissance géométrique  $T_k = a_k \cdot T_{k-1}$ ,
- \* décroissance logarithmique  $T_k = C_R/\ln(1+k)$ , ...

La règle la plus fréquemment utilisée est la décroissance géométrique avec un paramètre  $a_k$  constant et compris entre 0,5 et 0,99. C'est la loi de décroissance que nous avons mise en œuvre. Le paramètre  $a_k$  est plus proche de 1 dans le recuit initial afin d'assurer une décroissance plus lente. Sa valeur est plus faible dans le recuit dynamique afin de respecter le temps de cycle et d'atteindre une température suffisamment basse en fin de calcul.

Les plans de recuit choisis ne garantissent pas la convergence théorique de l'algorithme mais ils constituent un bon compromis qualité - temps de calcul - facilité de mise en œuvre.

### 3.3.4.6 Conclusion

La procédure de recuit simulé telle qu'elle a été mise en œuvre et exposée dans cette partie présente a priori trois inconvénients :

- la totalité des véhicules présents dans le buffer doit être prise en compte<sup>1</sup>, ce qui constitue une perte de temps,
- les paramètres sont nombreux et l'on sait qu'ils sont parfois difficiles à fixer,
- la génération de solutions voisines est mal adaptée au cas contraint<sup>2</sup> car la faisabilité des différentes modifications élémentaires doit être contrôlée.

## 3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons dans un premier temps analysé quelles étaient les méthodes qui pouvaient être mises en œuvre dans le cadre de notre procédure de re-séquencement : neuf méthodes ont été ainsi considérées. Ces méthodes, généralement utilisées dans le domaine de l'optimisation combinatoire, appartiennent à trois classes : les méthodes par voisinage, les méthodes liées à l'intelligence artificielle et les méthodes arborescentes. De cette analyse, deux méthodes ont émergé : une méthode arborescente, la recherche par faisceau et une méthode d'amélioration itérative, le recuit simulé. Ces deux méthodes nous ont semblé les plus adaptées pour fournir de bonnes solutions au problème d'optimisation de grande taille qui nous préoccupe.

La mise en œuvre de ces deux algorithmes a nécessité le développement de deux types de métriques sanctionnant les non-respects des règles d'espacement : une métrique évaluative, chargée de l'évaluation a posteriori du re-

---

<sup>1</sup> Notamment dans le cas de l'autostockeur.

<sup>2</sup> Quand le buffer de re-séquencement est une architecture à tiroirs.

séquencement réalisé et des métriques génératives, adaptées aux méthodes employées, utilisées pour bâtir les séquences prévisionnelles. Ces métriques sanctionnent fortement les violations de l'espace acceptable et pénalisent les violations de l'espace optimal dans le cas de la métrique évaluative, celles de l'espace cible dans le cas des métriques génératives. Ce dernier espace correspond à l'espace que la méthode de re-séquencement s'efforcera de respecter. C'est un espace dynamique qui peut changer de valeur en fonction des conditions de production.

Des deux procédures exposées dans cette partie, la procédure de recherche par faisceau est a priori la mieux adaptée à notre problème de re-séquencement dynamique. Elle est simple à mettre en œuvre, ne nécessite pas de mises au point fréquentes et fastidieuses. Le réglage des paramètres de la recherche est facilité par l'introduction de deux indicateurs : la matrice de préférence et le vecteur de stabilité. De plus, cette méthode intègre plus naturellement les phénomènes de roulement de stock ou d'interdits.

Le recuit simulé est a priori plus adapté à l'élaboration d'un ordonnancement statique purement combinatoire qu'à, par exemple, un re-séquencement dynamique d'un buffer de type architecture à tiroirs. La contrainte de respect du temps de cycle peut s'avérer inconciliable avec une bonne convergence de l'algorithme du recuit simulé. De plus, le réglage fin des paramètres peut poser quelques problèmes dans le cadre d'une utilisation industrielle.

Il est toutefois intéressant d'évaluer ces deux approches sur des jeux d'essais identiques et de comparer les séquences générées grâce à la métrique évaluative qui a été développée. C'est l'objet du prochain chapitre qui aborde l'application de nos méthodes de résolution et qui présente les différents résultats obtenus dans le cas où le buffer de re-séquencement est un autostockeur.

## CHAPITRE 4

---

## RÉSULTATS



# Chapitre 4

## Résultats

---

### 4.1 Introduction

Les deux méthodes, la recherche par faisceau et le recuit simulé, que nous avons développées ont été testées et comparées sur un ensemble de jeux d'essais. Ces tests concernent uniquement le re-séquencement de véhicules présents dans un buffer de type autostockeur. Les résultats obtenus sur l'ensemble des jeux d'essais générés sont présentés dans cette partie.

Cet ensemble de jeux d'essais prend en compte quatre paramètres principaux. Les paramètres considérés sont :

- la taille de l'enveloppe journalière, c'est-à-dire le nombre de véhicules à produire,
- la taille de l'autostockeur,
- le nombre de critères considérés,
- la nature du flux, c'est-à-dire la marge entre l'espacement acceptable et l'espacement optimal.

Ce dernier facteur détermine si le flux de production est fortement contraint ou non. En effet, si les espacements moyens des différents critères sont nettement supérieurs aux espacements acceptables, les violations de ces espacements minimum seront faciles à éviter. Par contre si l'espacement moyen d'un critère est proche, voire égal, à son espacement acceptable, il est possible qu'à un moment le contenu de l'autostockeur soit tel qu'une violation soit inévitable, notamment si le flux des véhicules arrivant de peinture est irrégulier.

Les différents jeux d'essais construits ont permis de tester les performances des méthodes développées. La mesure de la qualité des solutions obtenues constitue un point important. La qualité d'une solution heuristique est généralement mesurée par sa proximité avec la solution optimale. La notion d'optimalité est difficile à définir dans le cadre de notre problème de re-séquencement. Il est en effet possible qu'à la fin de la journée de production, on s'aperçoive, en analysant la séquence générée, que celle-ci aurait pu être meilleure, c'est-à-dire plus respectueuse des différentes contraintes d'espacement. Il ne faut cependant pas perdre de vue que la séquence a été générée dynamiquement à partir de données changeantes et non prévisibles. Il n'est donc pas certain que la meilleure

séquence aurait pu être générée sans prendre un risque important à l'instant de la décision<sup>1</sup>. La séquence effectivement générée peut s'avérer moins bonne au final mais provenir d'une décision optimale à l'instant où le choix a été effectué. Une solution sous-optimale au regard des critères d'évaluation de la solution finale peut donc être le produit de décisions optimales au regard des critères d'évaluation temps réel. Il apparaît finalement difficile de comparer la solution obtenue avec une solution dite « optimale ».

L'obtention de bornes inférieures fines est également problématique. Une borne inférieure envisageable est celle obtenue en cherchant la séquence optimale pour chaque critère pris indépendamment, et en additionnant les valeurs des pénalités correspondantes. Cette borne est cependant trop grossière et pas suffisamment significative pour pouvoir être utilisée.

La qualité des solutions obtenues sera donc mesurée grâce à la métrique évaluative présentée dans le chapitre précédent et grâce à divers indicateurs relatifs aux différents critères.

Cette partie est organisée comme suit : les jeux d'essais utilisés et le processus expérimental suivi sont présentés dans un premier temps; des résultats représentatifs de l'ensemble des résultats obtenus sur les divers jeux d'essais sont ensuite exposés en détail. Enfin, l'influence de la taille de l'autostockeur sur la qualité du re-séquencement est étudiée.

## 4.2 Jeux d'essais utilisés et processus expérimental

### 4.2.1 Jeux d'essais utilisés

Ainsi qu'il est décrit dans l'introduction, quatre facteurs ont été considérés lors de la construction des différents jeux d'essais. Chacun de ces facteurs peut prendre quatre valeurs différentes. La taille de l'enveloppe journalière a été fixée à 50, 100, 500 et 1000. La taille de l'autostockeur peut prendre les valeurs suivantes : 25, 50, 100 et 200. Le nombre de critères pris en compte a été fixé à 5, 10, 15 et 20. Concernant le dernier facteur, le flux est qualifié de peu contraint quand les marges entre les espacements optimaux et les espacements acceptables sont en moyenne supérieures à 5, de moyennement contraint quand les marges sont comprises entre 3 et 5, de contraint quand les marges sont comprises entre 1 et 3 et de très contraint quand les espacements acceptables sont égaux aux

---

<sup>1</sup> Une dégradation importante de la qualité du buffer de re-séquencement par exemple.

espacements optimaux. Les différentes valeurs que peuvent prendre les quatre paramètres sont résumées dans le Tableau 4-1.

Facteurs	Niveau			
	1	2	3	4
Nombre de véhicules	50	100	500	1000
Taille de l'autostockeur	25	50	100	200
Nombre de critères	5	10	15	20
Nature du flux	Peu contraint	Moyennement contraint	Contraint	Très contraint

Tableau 4-1 - Valeurs des différents facteurs

Les différentes valeurs des facteurs permettent de générer 256 problèmes de tailles différentes. 20 jeux d'essais de chaque taille ont été générés afin de tester les algorithmes sur différentes configurations de stock initial. Ces jeux d'essais ont été générés aléatoirement mais ils sont tout à fait représentatifs de la réalité industrielle<sup>1</sup> car ils sont inspirés de données réelles fournies par P.S.A. Peugeot Citroën [CAS 95].

## 4.2.2 Processus expérimental

Chacun des jeux d'essais contient la description des 20 véhicules dernièrement enlignés, la description des véhicules présents dans l'autostockeur et la description des véhicules qui arriveront de l'atelier de peinture. Pour chacun des tests, les entrées de peinture et les sorties de stock sont gérées en synchrone. Après chaque intervalle de temps  $\gamma$ ,  $\gamma$  étant le temps de cycle, un nouveau véhicule est inséré dans le stock et un véhicule est enligné. On travaille donc à niveau de stock constant.

Dans le cas de la méthode par recuit simulé, un premier recuit permet d'ordonner l'ensemble des véhicules initialement en stock. Le re-séquencement est ensuite réalisé. La procédure est alors identique quel que soit l'algorithme utilisé : à chaque pas de calcul, correspondant au temps de cycle de la ligne d'assemblage, le premier véhicule de la liste courante dans le cas de l'algorithme du recuit simulé ou de la meilleure séquence prévisionnelle dans le cas de l'algorithme de recherche par faisceau, est enligné en montage et un nouveau véhicule est inséré en

<sup>1</sup> Notamment ceux de grande taille.

provenance de peinture.

La séquence contenant les véhicules enlignés est analysée a posteriori. Les violations des critères d'espacements acceptables et optimaux sont comptabilisées et certains indicateurs caractéristiques de la qualité de la solution obtenue sont mesurés. La qualité du buffer de re-séquencement obtenue en fin de calcul est également évaluée en comparant l'espacement moyen des critères présents avec leurs espacements optimaux. La note du stock est obtenue de la façon suivante :

$$\text{note du stock} = \sum_{c=1}^C |E_{opt}^c - E_{moyen}^c|$$

Cette note obtenue en fin de journée permet de savoir si le re-séquencement a laissé, pour la journée suivante, une composition de stock représentative du flux de production ou si la qualité de celle-ci s'est dégradée.

Quel que soit le jeu d'essai, le temps de calcul a été limité à 10 secondes par véhicule afin d'avoir des temps de simulation raisonnables. La maquette réalisée a été développée en C++ pour Windows et les expériences ont été menées sur un PC Pentium 90 Mhz.

## **4.3 Comparaison des résultats obtenus par les deux méthodes de re-séquencement sur deux jeux d'essais représentatifs**

### **4.3.1 Introduction**

Cette partie présente les résultats obtenus par application des deux méthodes développées, sur deux ensembles de jeux d'essais représentatifs des résultats globaux. Le premier paragraphe présente la mise en œuvre des méthodes et détaille les résultats obtenus sur un jeu d'essai de taille industrielle tandis que le second paragraphe compare les résultats obtenus par les deux méthodes de résolution sur un ensemble de jeux d'essais de petite taille.

## 4.3.2 Résultats sur le jeu d'essai de taille industrielle

### 4.3.2.1 Jeu d'essai utilisé

Le jeu d'essai est de taille industrielle. La taille de l'enveloppe journalière, le nombre de critères et la taille de l'autostockeur considérés correspondent à ce qu'on rencontre classiquement sur une ligne de production automobile.

Les paramètres de ce jeu d'essai sont présentés dans le Tableau 4-2.

Nombre de véhicules à produire	500
Taille de l'autostockeur	200
Nombre de critères considérés	10
Nature du flux	Contraint

Tableau 4-2 - Paramètres du jeu d'essai

La valeur des différents espacements acceptables et optimaux est donnée dans le Tableau 4-3.

Critère n°	Espacements	
	Acceptable	Optimal
1	1	2
2	1	3
3	3	4
4	2	6
5	2	6
6	3	7
7	4	7
8	2	8
9	6	8
10	7	9

Tableau 4-3 - Valeurs des espacements acceptables et optimaux des différents critères

Les paramètres utilisés par la métrique évaluative et par les métriques génératives de la recherche par faisceau et du recuit simulé sont les suivants :  $x = 2$ ,  $y = 1,6$  et  $\beta = 100$ . Ces paramètres ont été ajustés grâce à des expérimentations sur plusieurs jeux d'essais.

### 4.3.2.2 Résultats obtenus par la recherche par faisceau

La méthode a été appliquée au jeu d'essai présenté dans le paragraphe précédent. La taille du buffer de re-séquencement et l'absence d'interdit dans ce jeu d'essai permettent de fixer un espacement cible égal à l'espacement optimal tout au long de la journée de production. Il est intéressant d'analyser la qualité de la solution obtenue en fonction de la longueur de l'horizon de calcul, c'est-à-dire en fonction de la profondeur de l'arbre de recherche. Comme signalé dans le chapitre 3.3.3.5, la matrice de préférence  $P$  a une structure triangulaire, on peut donc limiter la largeur de recherche pour chaque niveau de l'arborescence. Ainsi, pour une profondeur de recherche de 4, la largeur du niveau 1 est de 4, celle du niveau 2 est de 3, puis respectivement 2 et 1 pour les niveaux 3 et 4. La structure de l'arbre pour une recherche de profondeur 4 est donc la suivante : 4-3-2-1. Le Tableau 4-4 présente l'évolution des résultats obtenus lorsque l'on fait varier l'horizon de prévision.

<i>Horizon de prévision</i>	<i>Structure de l'arbre</i>	<i>Note</i>	<i>Note du stock</i>
1	1	<b>121</b>	2,01
2	2-1	<b>78</b>	1,78
3	3-2-1	<b>47</b>	0,83
4	4-3-2-1	<b>52</b>	0,74
5	5-4-3-2-1	<b>49</b>	0,63

Tableau 4-4 - Évolution des résultats en fonction de la structure de l'arbre de recherche

En augmentant l'horizon de prévision, on constate d'abord une amélioration nette de la qualité de la séquence et ensuite pour une profondeur supérieure à 3, une stabilisation, autour d'une note moyenne de 50. Expérimentalement, l'horizon optimal de recherche est ici égal à 3. Pour une profondeur supérieure à 3, les résultats sont légèrement moins bons et on n'améliore pas la solution car l'horizon considéré est parfois trop long si l'on considère le roulement continu du stock. On accepte parfois d'enligner un « mauvais véhicule » parce que le reste de la séquence possède un faible coût mais ce choix peut s'avérer non rentable quand des véhicules « intéressants » arrivent dans le buffer de re-séquencement peu après. La composition du buffer de re-séquencement laissée en fin de journée est d'autant meilleure que la profondeur de recherche est grande.

Le Tableau 4-5 résume les caractéristiques de la solution trouvée pour un horizon de 3. Pour chaque critère, les espacements acceptables et optimaux sont rappelés. Le nombre de violations de ces deux espacements est ensuite indiqué ainsi que la participation de chaque critère à la note globale. L'espacement moyen des critères pour les

véhicules produits ainsi que l'écart type, l'espacement maximal et minimal sont calculés. L'espacement moyen entre les différents critères pour les véhicules restés dans le buffer de re-séquencement permet enfin d'évaluer la qualité de la composition du stock en fin de journée. L'ensemble de ces informations permet d'analyser plus en détail la régularité de l'ordonnancement sur la journée de production.

Critère n°	$E_{acc}$	$E_{opt}$	Nb viols $E_{acc}$	Nb viols $E_{opt}$	Participation à la note	$E_{moyen}$	Ecart- type	Espacement. Maximum	Espacement. minimal	$E_{moyen}$ du stock
1	1	2	0	7	3.50	1.99	0.20	3	1	2.03
2	1	3	0	21	7.00	3.04	0.41	4	2	2.85
3	3	4	0	20	5.00	4.04	0.45	3	5	3.77
4	2	6	0	22	3.67	6.11	0.55	7	5	5.25
5	2	6	0	26	4.67	6.10	0.64	7	4	5.67
6	3	7	0	21	4.66	7.02	0.79	9	4	7.33
7	4	7	0	21	3.00	7.15	0.57	8	6	6.69
8	2	8	0	24	3.00	8.15	0.66	9	7	7.33
9	6	8	0	23	3.73	8.17	0.72	11	7	6.69
10	7	9	0	29	8.67	9.40	1.12	14	8	7.33
				<b>214</b>	<b>46.90</b>					

Tableau 4-5 - Résultats obtenus par utilisation d'une recherche par faisceau de profondeur 3

Le résultat le plus important concerne l'absence de violation de l'espacement acceptable. L'espacement minimal de chaque critère est toujours supérieur ou égal à l'espacement acceptable. Les violations concernent uniquement les espacements optimaux. La participation à la note est bien répartie entre les différents critères. Les espacements moyens sont tous très proches des espacements optimaux et les écarts-types sont faibles, preuve que l'objectif de lissage des critères tout au long de la journée est atteint. La composition du buffer de re-séquencement laissée pour la journée suivante est bonne.

La matrice de préférence ( $P$ ) obtenue à la fin de la simulation est la suivante :

$$P = \begin{matrix} 434 & 47 & 19 \\ 478 & 22 & 0 \\ 500 & 0 & 0 \end{matrix}$$

Sur les 500 décisions d'enlèvement qui ont été prises, on s'aperçoit qu'un véhicule de deuxième ou de troisième choix a été enligné respectivement 47 et 19 fois. Les composantes du vecteur de stabilité de séquence ( $S'$ ) valent 0.90 et 0.81. Les séquences prévisionnelles sont donc relativement peu stables puisque une séquence de longueur 3 n'a que 7 chances sur 10 d'être effectivement enlignée dans cet ordre.

L'évolution temporelle de l'espacement d'un critère particulier peut être représentée sous forme d'un histogramme. A titre d'exemple, les histogrammes de la Figure 4.1 et de la Figure 4.2 décrivent respectivement le profil d'entrée des véhicules dans le buffer de re-séquencement et le profil de sortie obtenue pour le critère n°8 au cours de la journée de production. On peut ainsi facilement visualiser l'efficacité de la procédure de re-séquencement et le lissage obtenu pour ce critère.

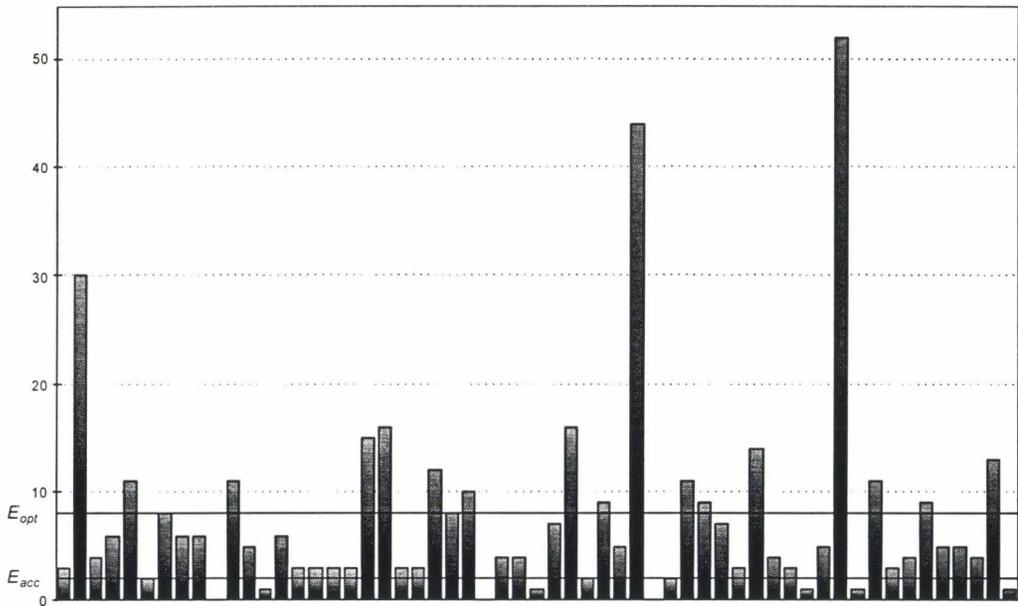


Figure 4.1 - Profil d'entrée des véhicules portant le critère n°8 dans le buffer de re-séquencement

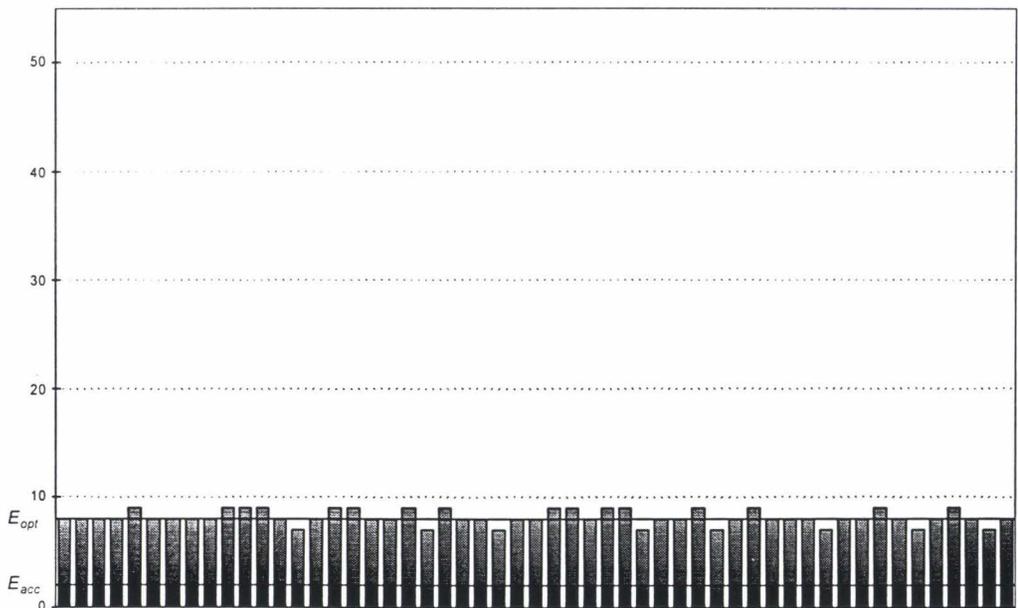


Figure 4.2 - Profil de sortie de la journée de production pour le critère n°8 (Rech. par faisceau de profondeur 3)

Ces deux diagrammes doivent être interprétés de la façon suivante : une barre représente un véhicule possédant le critère n°8. La hauteur de cette barre représente l'espacement entre le véhicule considéré et le précédent véhicule possédant le critère. Ainsi, on peut voir sur la Figure 4.1, qu'il y a, par exemple, 30 véhicules ne présentant pas le critère n°8 entre le 2<sup>ème</sup> et le 3<sup>ème</sup> véhicule présentant ce critère. Cela correspond à la 2<sup>ème</sup> barre de l'histogramme. Les deux traits horizontaux indiquent les niveaux des espacements acceptables et optimaux. Une barre en deçà du niveau du trait le plus bas indique un espacement effectif inférieur à l'espacement acceptable et donc une violation de celui-ci.

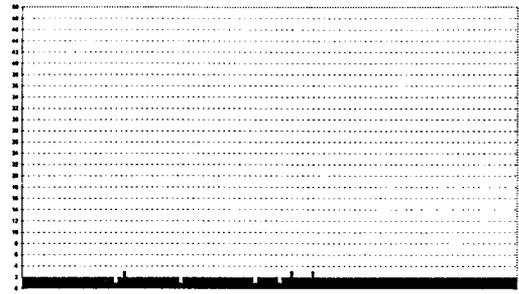
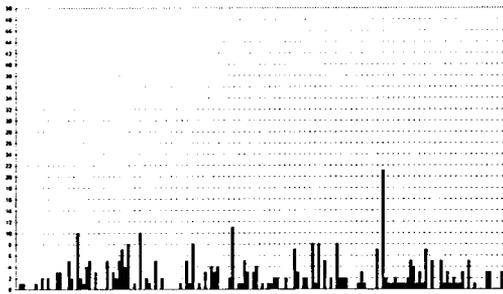
On s'aperçoit, sur la Figure 4.1, que le flux des véhicules en entrée du buffer de re-séquencement est extrêmement perturbé, puisque les véhicules se présentent dans un ordre aléatoire. Plusieurs espacements sont inférieurs à l'espacement acceptable, certains sont mêmes nuls, et l'espacement maximal est nettement supérieur à l'espacement optimal puisqu'il a une valeur de 52 contre 8 pour l'espacement optimal. Le flux de sortie représenté sur la Figure 4.2 montre une distribution régulière du critère n°8 tout au long de la journée. La méthode développée génère clairement des espacements très réguliers puisqu'aucun espacement n'est éloigné de plus d'une unité de l'espacement optimal et par conséquent aucun espacement n'est inférieur à l'espacement acceptable.

Le Tableau 4-6 présente, pour les différents critères, les profils d'entrée et de sortie des véhicules dans le buffer de re-séquencement au cours de la journée de production détaillée ci-dessus. Il est ainsi facile de comparer le respect des espacements acceptables et le lissage de la charge obtenu pour chacun des neuf autres critères.

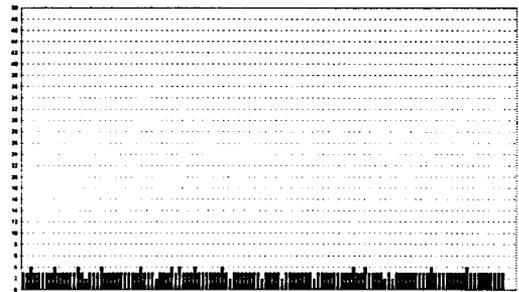
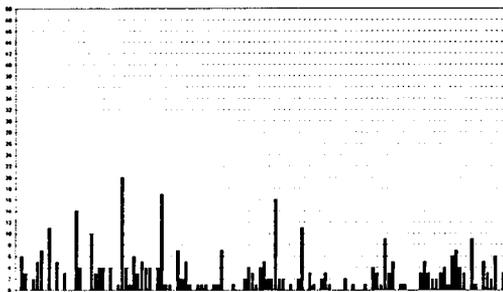
PROFIL D'ENTREE

PROFIL DE SORTIE

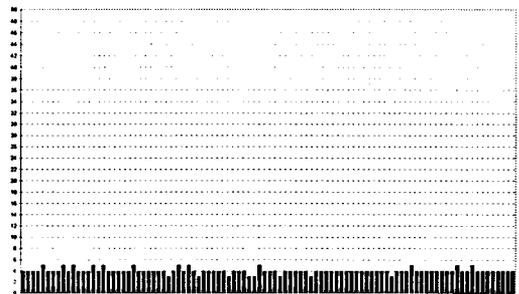
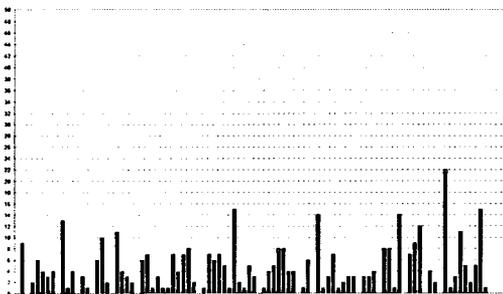
CRITERE 1



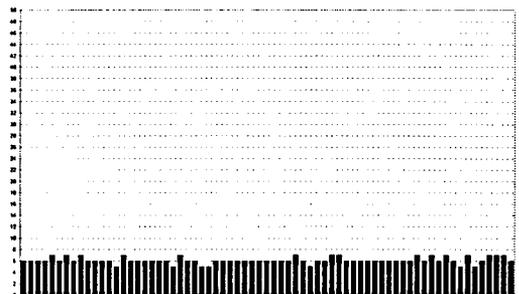
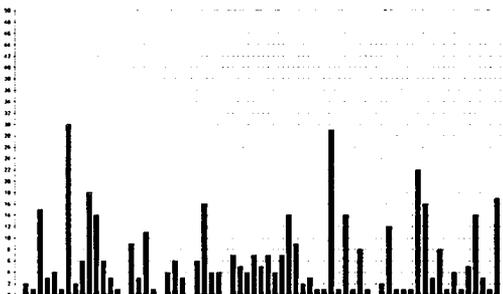
CRITERE 2



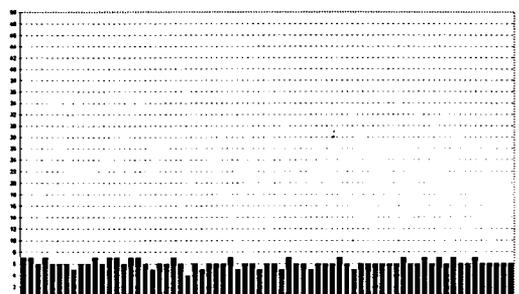
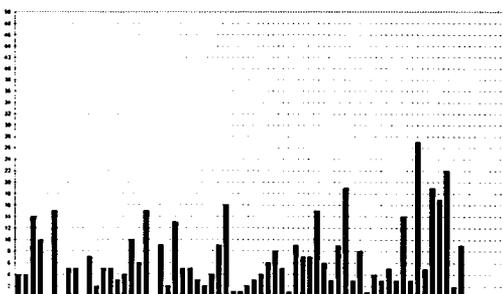
CRITERE 3



CRITERE 4



CRITERE 5



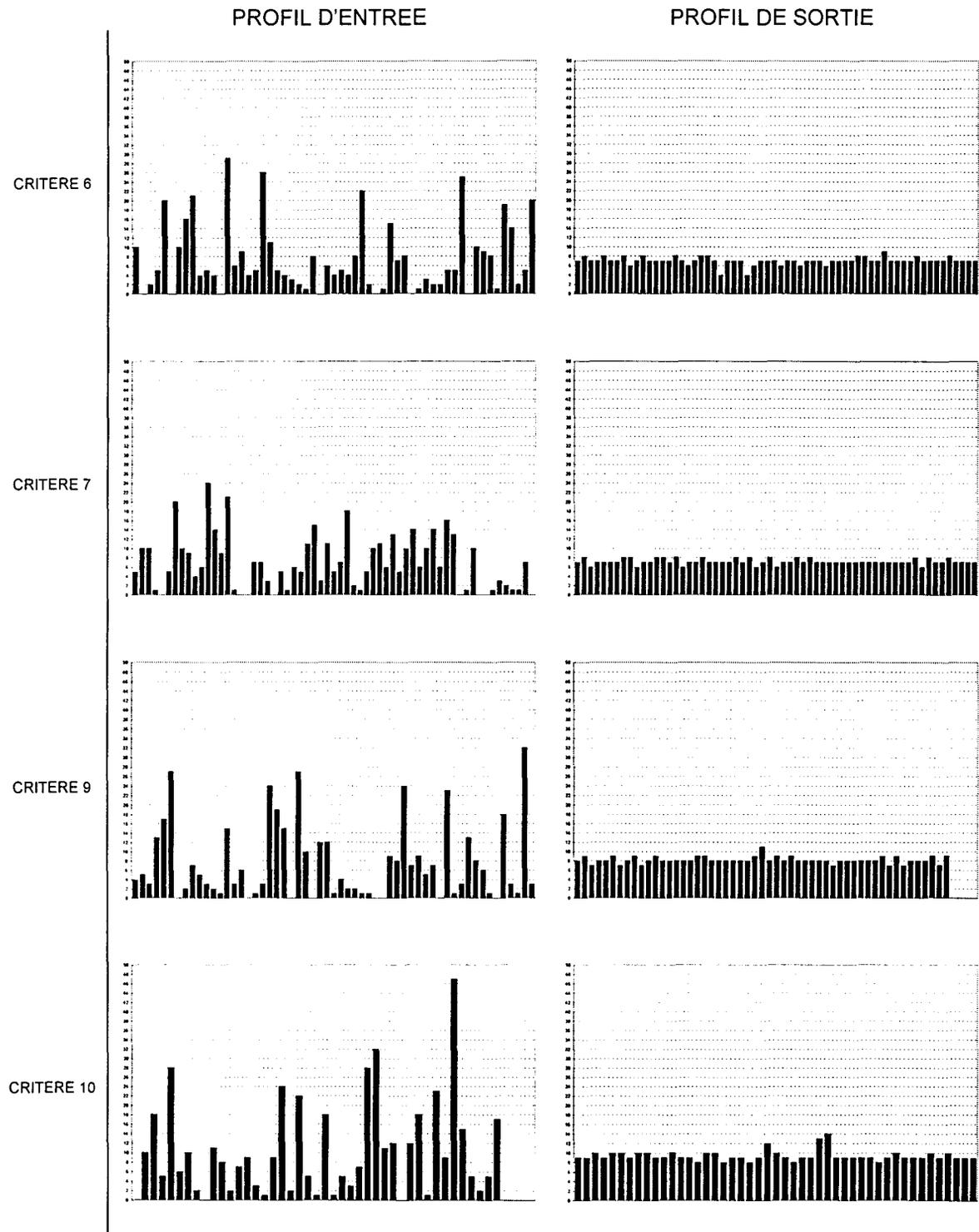


Tableau 4-6 - Comparaison des profils d'entrée et de sortie des véhicules dans le buffer de re-séquencement

La méthode à base de recherche par faisceau a permis de générer une séquence de bonne qualité. Les espacements acceptables ne sont jamais violés et le lissage obtenu est satisfaisant car pour chaque critère, les espacements effectifs sont proches de l'espacement optimal.

### 4.3.2.3 Résultats obtenus par recuit simulé

La méthode à base de recuit simulé a été également appliquée au jeu d'essai présenté dans le paragraphe 4.3.2.1. Le temps de calcul entre deux enlèvements consécutifs d'un véhicule a été limité à 10 s. Le plan de recuit utilisé est le suivant :

$$\begin{aligned} \text{température initiale} & T_0 = 10, \\ \text{loi de décroissance de la température} & T_k = 0.95 \times T_{k-1}, \\ \text{longueur des chaînes de Markov} & L_k = 200. \end{aligned}$$

Ces paramètres ont été réglés à partir de nombreux essais et en tenant compte du temps de calcul imparti.

La fonction  $f$  utilisée par la métrique générative est la suivante<sup>1</sup> :

$$\begin{aligned} f(s) &= (p + 200 - s), & \text{si } p \leq s \leq p + 2 \\ f(s) &= 1, & \text{si } s > p + 2 \end{aligned}$$

Les trois premiers véhicules de la séquence sont donc pondérés par un facteur multiplicateur.

La séquence finale obtenue a une note de 663 et la note obtenue par le stock est de 2.21. Ces résultats sont à comparer avec ceux obtenus par la recherche par faisceau : 46.9 et 0.83. Les résultats détaillés sont présentés dans le Tableau 4-7.

Critère n°	$E_{acc}$	$E_{opt}$	Nb viols $E_{acc}$	Nb viols $E_{opt}$	Participation à la note	$E_{moyen}$	Ecart- type	Espacement. Maximum	Espacement. minimal	$E_{moyen}$ du stock
1	1	2	0	162	189.27	2.03	1.42	8	1	1.86
2	1	3	0	133	116.79	3.52	1.59	9	2	1.57
3	3	4	0	112	81.35	4.29	1.68	11	3	3.00
4	2	6	0	76	30.38	6.33	1.53	11	4	4.55
5	2	6	0	74	31.52	6.06	1.52	12	4	6.14
6	3	7	0	87	53.35	8.04	2.05	15	6	4.26
7	4	7	0	73	32.73	7.55	1.77	13	5	5.25
8	2	8	0	78	46.46	8.80	2.18	17	6	5.25
9	6	8	0	71	35.67	8.24	2.08	16	6	6.70
10	7	9	0	70	45.46	9.14	2.47	19	7	9.00
			<b>936</b>	<b>663.00</b>						

Tableau 4-7 - Résultats obtenus par la méthode à base de recuit simulé

<sup>1</sup> cf. Paragraphe 3.3.4.3.

Là encore, aucun espacement acceptable n'est violé mais le nombre de violations de l'espacement optimal est 5 fois supérieur au nombre obtenu par la première méthode (936 contre 214). Tous les indicateurs montrent que le re-séquencement réalisé est de moins bonne qualité que le premier. Les écarts-types nettement supérieurs montrent une plus grande dispersion des espacements autour de la valeur de l'espacement optimal. On s'aperçoit également que pour certains critères, les espacements moyens sont bien supérieurs aux espacements optimaux. Cela signifie que les critères concernés ne sont pas suffisamment enlignés durant la journée de production. Il y a donc rétention de véhicules lourds dans le buffer de re-séquencement. Ceci est confirmé par la valeur des espacements moyens entre les critères des véhicules présents dans le stock en fin de journée. La qualité globale de la composition du buffer s'est dégradée par rapport au début de journée.

Le lissage des différents critères tout au long de la journée de production est effectivement moins bon. On peut s'en rendre compte, toujours pour le critère n°8, sur la Figure 4.3.

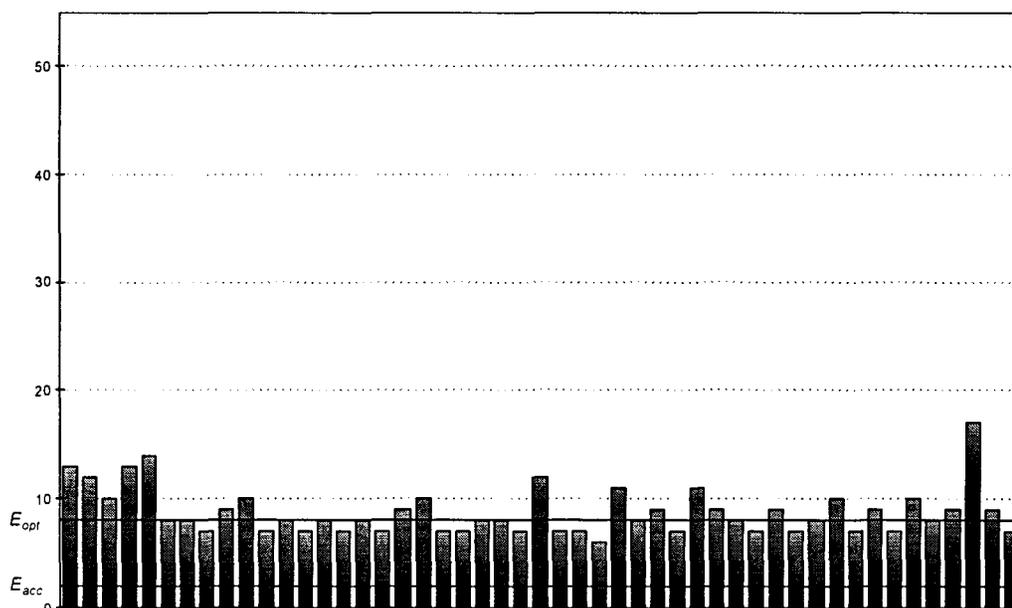


Figure 4.3 - Profil de sortie de la journée de production pour le critère n°8 (recuit simulé)

Bien qu'aucun espacement acceptable ne soit violé, les résultats obtenus par application de la méthode utilisant l'algorithme du recuit simulé sur ce jeu d'essai s'avèrent manifestement moins bons que ceux obtenus par la méthode par recherche par faisceau.

Les résultats obtenus sur ce jeu d'essai de taille industrielle sont représentatifs des résultats obtenus sur les autres jeux d'essais de cette dimension. Ils permettent de constater l'efficacité supérieure de la méthode utilisant la recherche par faisceau.

### 4.3.3 Résultats sur l'ensemble de jeux d'essais de petite taille

#### 4.3.3.1 Ensemble de jeux d'essais utilisé

L'ensemble des tests a été effectué sur 20 jeux d'essais de petite taille afin de comparer les résultats quand le séquençement est facile à réaliser. Les caractéristiques de ces jeux d'essais sont tous de niveau 1 et sont présentées dans le Tableau 4-8.

Nombre de véhicules à produire	50
Taille de l'autostockeur	25
Nombre de critères considérés	5
Nature du flux	Niveau 1

Tableau 4-8 - Paramètres du jeu d'essai

La valeur des 5 espacements acceptables et optimaux est donnée dans le Tableau 4-9.

<i>Critère n°</i>	<i>E spacements</i>	
	<i>Acceptable</i>	<i>Optimal</i>
1	1	5
2	1	6
3	2	7
4	2	8
5	3	9

Tableau 4-9 - Valeurs des espacements acceptables et optimaux des différents critères

Les paramètres utilisés par la métrique évaluative et par les métriques génératives de la recherche par faisceau et du recuit simulé sont les mêmes que dans le paragraphe précédent.

#### 4.3.3.2 Comparaison et analyse des résultats obtenus

La comparaison des résultats moyens obtenus sur les 10 jeux d'essais de taille identique est donnée dans le Tableau 4-10.

<i>Procédure de re-séquencement</i>	<i>Note moyenne</i>	<i>Ecart-type</i>	<i>Note minimale</i>	<i>Note maximale</i>	<i>Nb. viols</i>	
					<i>moyen de E<sub>acc</sub></i>	<i>moyen de E<sub>opt</sub></i>
Rech. par faisceau	0.84	0.20	0.17	2.22	0	4.70
Recuit simulé	3.23	1.26	0.23	9.89	0	10.30

Tableau 4-10 - Comparaison des notes obtenues par les deux procédures de re-séquencement

On s'aperçoit que même sur des problèmes de petite taille, la procédure de re-séquencement à base de recuit simulé est moins performante que celle à base de recherche par faisceau. Les espacements acceptables ne sont jamais violés mais le lissage réalisé est nettement moins bon.

### 4.3.4 Conclusion

Ces deux ensembles de jeu d'essais représentatifs montrent clairement que la procédure de re-séquencement utilisant la recherche par faisceau offre de meilleures performances que la procédure à base de recuit simulé. Bien que les deux méthodes permettent d'obtenir des séquences respectueuses des espacements acceptables, le lissage des critères est nettement mieux réalisé par la recherche par faisceau. Comme nous le laissons entendre dans la conclusion du chapitre 3, le recuit simulé présente l'inconvénient de prendre en compte la totalité des véhicules présents dans le stock. De plus, le réglage des différents paramètres de contrôle s'avère délicat en pratique car le compromis nécessaire entre la qualité de la solution et le respect du temps de cycle est difficile à réaliser pour chaque jeu d'essai. Le temps de calcul limité ajouté au fait que le recuit simulé s'appuie sur des modifications aléatoires de la solution courante ne permet pas de toujours garantir des décisions d'enlèvement optimales.

Il nous apparaît clair que l'algorithme du recuit simulé est plus adapté pour traiter le problème de séquencement statique que pour traiter le problème de re-séquencement dynamique. Le séquencement statique qui vise à produire un ordonnancement prévisionnel, nécessite, en effet, de prendre en compte l'intégralité de l'enveloppe journalière<sup>1</sup> ce qui rend inadaptées les méthodes arborescentes telles que la recherche par faisceau. Le recuit simulé, dans ce contexte où le temps de calcul n'est pas un paramètre critique, permet d'offrir de bonnes performances [CHE 91].

La méthode utilisant la recherche par faisceau offre de très bonnes performances. Le réglage des coefficients de la métrique et le choix de structure de l'arbre de recherche sont très simples à réaliser. Sur l'ensemble des tests réalisés, la recherche par faisceau a donné des résultats systématiquement meilleurs que ceux obtenus par recuit simulé.

<sup>1</sup> Voir hebdomadaire.

## 4.4 Analyse de l'influence de la taille de l'autostockeur

### 4.4.1.1 Introduction

Cette partie présente l'analyse des résultats obtenus par la procédure de re-séquencement utilisant la recherche par faisceau sur un ensemble de jeux d'essais de taille industrielle. Il est intéressant de connaître l'influence de la taille de l'autostockeur sur la qualité de re-séquencement réalisé. Nous avons donc étudié les résultats obtenus en faisant varier la taille de l'autostockeur pour des journées de production comportant 1000 véhicules à produire, 10 critères. Les jeux d'essais construits font varier la nature du flux de peu contraint à très contraint. Pour une taille d'autostockeur et pour une nature de flux données, 20 jeux d'essais ont été générés. 320 jeux d'essais ont donc été construits en tout.

### 4.4.1.2 Présentation et analyse des résultats obtenus

Les tableaux suivants (Tableau 4-11, Tableau 4-12, Tableau 4-13, Tableau 4-14) exposent les résultats obtenus par la méthode de re-séquencement utilisant la recherche par faisceau. Chacun des tableaux présente les notes moyennes obtenues par les séquences en fin de journée pour les différentes tailles d'autostockeur. Les écart-types et les notes minimales et maximales sont également données dans chacun des cas pour les 20 séquences finales. Le nombre de violations d'espacements acceptables ainsi que la structure de l'arbre utilisée par la procédure de re-séquencement sont indiqués.

	<i>Taille de l'autostockeur</i>			
	<i>25</i>	<i>50</i>	<i>100</i>	<i>200</i>
<i>Note moyenne</i>	1896.8	671.6	126.2	29.4
<i>Ecart-type</i>	604.0	497.0	96.9	14.9
<i>Minimum</i>	1183.7	265.8	36.5	11.6
<i>Maximum</i>	3068.1	1843.6	350.6	62.1
<i>Nb. moyen viols <math>E_{acc}</math></i>	8.3	2.7	0.8	0
<i>Structure de l'arbre</i>	1	1	3-2-1	4-3-2-1

Tableau 4-11 - Résultats obtenus pour un flux peu contraint (niveau 1)

	<i>Taille de l'autostockeur</i>			
	25	50	100	200
<i>Note moyenne</i>	1649.4	378.4	101.8	22.3
<i>Ecart-type</i>	709.5	160.1	47.8	7.9
<i>Minimum</i>	1069.2	174.0	58.1	12.5
<i>Maximum</i>	3379.5	646.8	202.6	40.0
<i>Nb. moyen viols <math>E_{acc}</math></i>	17.2	2.2	1.1	0
<i>Structure de l'arbre</i>	1	1	3-2-1	4-3-2-1

Tableau 4-12 - Résultats obtenus pour un flux moyennement contraint (niveau 2)

	<i>Taille de l'autostockeur</i>			
	25	50	100	200
<i>Note moyenne</i>	2782.4	628.4	97.3	38.8
<i>Ecart-type</i>	1000.0	419.1	36.7	19.6
<i>Minimum</i>	634.9	231.0	56.5	12.9
<i>Maximum</i>	3793.5	1447.8	146.5	71.3
<i>Nb. moyen viols <math>E_{acc}</math></i>	45.3	11.2	0.8	0
<i>Structure de l'arbre</i>	2-1	3-2-1	3-2-1	4-3-2-1

Tableau 4-13 - Résultats obtenus pour un flux contraint (niveau 3)

	<i>Taille de l'autostockeur</i>			
	25	50	100	200
<i>Note moyenne</i>	51821.1	25188.4	4157.0	70.8
<i>Ecart-type</i>	4205.9	6333.9	3476.2	93.6
<i>Minimum</i>	48560.2	16359.4	148.2	19.0
<i>Maximum</i>	62651.0	34683.9	10829.9	62.3
<i>Nb. moyen viols <math>E_{acc}</math></i>	724.2	415.7	77.2	0.8
<i>Structure de l'arbre</i>	2-1	2-1	3-2-1	4-3-2-1

Tableau 4-14 - Résultats obtenus pour un flux très contraint (niveau 4)

Les résultats obtenus suscitent plusieurs remarques :

- Quelle que soit la nature du flux, seul l'autostockeur de 200 places permet de garantir un re-séquençement de très bonne qualité. Il ne faut toutefois pas perdre de vue que l'ordre d'arrivée des véhicules dans le buffer de re-séquençement est ici totalement aléatoire. Dans la réalité, l'ordonnancement statique, ou prévisionnel,

réalisé en début de journée tient compte des contraintes de l'atelier de montage. Donc bien que les processus amont modifient fortement cet ordonnancement, le flux de véhicules arrivant dans le buffer est a priori plus régulier qu'il ne l'est dans les tests que nous avons réalisés. La tâche de re-séquencement s'en trouve en pratique facilitée.

- Plus le flux est contraint, plus le re-séquencement est délicat à réaliser. La marge entre les espacements optimaux et les espacements acceptables étant faible voire nulle, le nombre de violations de l'espacement acceptable croît. La profondeur de l'arbre de recherche doit être plus grande quand le flux est davantage contraint.
- Quand l'autostockeur est de petite taille, la profondeur de l'arbre de recherche doit être faible afin d'obtenir des résultats satisfaisants. En effet, le roulement de stock est tel qu'il n'est pas judicieux de bâtir de longues séquences prévisionnelles car celles-ci ont peu de chances de survivre à l'arrivée de nouveaux véhicules dans le buffer.
- Quand l'autostockeur est de grande taille, il est par contre intéressant d'approfondir la recherche car le buffer présente une telle inertie qu'un petit nombre d'arrivées ne modifie pas énormément les indicateurs. L'avenir étant moins incertain, il est logique d'anticiper davantage les prochaines décisions d'enlèvement et donc d'augmenter la profondeur de l'arbre de recherche.

Le Tableau 4-15 présente les vecteurs de stabilité de séquence ( $S$ ) moyens obtenus pour les différentes tailles de l'autostockeur dans le cas où le flux de production est de niveau 3. Ces résultats corroborent les deux dernières remarques. Plus la taille de l'autostockeur est importante, plus les composantes du vecteur de stabilité de séquence augmentent.

	<i>Taille de l'autostockeur</i>			
	<i>25</i>	<i>50</i>	<i>100</i>	<i>200</i>
<i>Structure de l'arbre</i>	2-1	2-1	3-2-1	4-3-2-1
<i>Vecteur de stabilité (S)</i>	[0.85]	[0.89] [0.80]	[0.91] [0.85]	[0.99] 0.96 [0.93]

Tableau 4-15 - Vecteurs de stabilité de séquence obtenus pour les différentes tailles d'autostockeur dans le cas d'un flux contraint

La Figure 4.4 illustre l'influence de la taille de l'autostockeur sur la qualité moyenne du re-séquencement réalisé dans le cas où le flux de production est contraint (niveau 3).

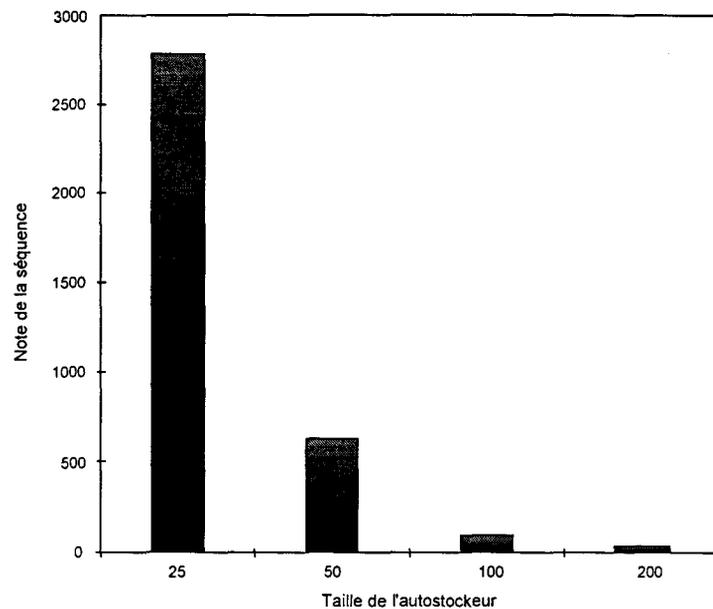


Figure 4.4 - Influence de la taille de l'autostockeur sur le re-séquencement dans le cas d'un flux contraint

Cette étude peut être utilisée lors de la phase de conception ou de restructuration d'une ligne d'assemblage à modèles mélangés. Le dimensionnement du buffer ne consiste pas uniquement à déterminer le nombre de véhicules nécessaires à un re-séquencement respectueux des contraintes de l'atelier de montage. Il faut prendre en compte plusieurs données économiques :

- le coût des moyens mis en œuvre pour la construction d'un buffer de re-séquencement,
- les coûts de stockage,
- les coûts engendrés par les violations des espacements acceptables et optimaux,

ainsi que les données concernant les occurrences des interdictions de montage et des aléas de production. Ces données sont nécessaires pour dimensionner efficacement les stocks de gestion intermédiaires.

## 4.5 Conclusion

A l'issue de ces tests, les avantages et les inconvénients des méthodes envisagées pour résoudre le problème de re-séquencement des véhicules en entrée de l'atelier de montage sont apparus clairement.

La méthode la plus adaptée à l'aspect dynamique du problème est incontestablement la recherche par faisceau qui prend judicieusement en compte le roulement de stock et qui, dans un contexte industriel, intégrera plus facilement les pannes et les interdits de montage. Grâce à sa réactivité, cette méthode est capable de tenir compte des changements du contexte de production dans un très court délai et de garantir ainsi la robustesse demandée. Sur l'ensemble des problèmes testés, la recherche par faisceau est toujours plus performante que le recuit simulé. Les résultats obtenus sont de très bonne qualité : pas de violations des espacements acceptables, sauf dans les cas très contraints avec des autostockeurs de petite taille et un lissage des critères très régulier tout au long de la journée de production. Les coupures réalisées dans l'arbre de recherche sont justifiables car seule la partie intéressante de l'arbre est explorée.

Cette méthode s'avère simple à implanter. L'obtention de bonnes séquences dépend uniquement du réglage des paramètres de la métrique générative et du choix des valeurs prises par l'espacement cible. Le réglage des paramètres étant très « naturel », il est simple de les ajuster afin de les faire correspondre aux objectifs particuliers fixés par les responsables de production. Le choix d'une loi d'évolution pour l'espacement cible dépend également des objectifs de production.

La méthode que nous avons développée peut donc être rapidement mise en œuvre soit pour constituer un outil d'aide au re-séquencement facilitant la tâche des opérateurs humains chargés de cette opération, soit pour automatiser la gestion du buffer de re-séquencement<sup>1</sup> en entrée de l'atelier de montage. Cette automatisation de la tâche de re-séquencement doit permettre de prendre en compte plus rapidement davantage de données et ainsi de mieux respecter les objectifs de production et de mieux réagir aux différents événements externes. Cette méthode peut être aisément modifiée pour traiter le problème voisin du re-séquencement des véhicules en entrée de l'atelier de peinture. Seule la métrique générative doit alors être modifiée pour prendre en compte, non plus des contraintes d'espacement entre critères, mais des contraintes de groupement de teinte.

Il est également envisageable d'utiliser cette étude pour développer un outil de simulation permettant de tester différentes politiques de séquencement. Cet outil permettra de connaître précisément l'impact d'un choix d'ordonnancement particulier et de mieux exploiter le potentiel dont dispose la ligne d'assemblage dans le but de minimiser les coûts de production, d'augmenter la qualité et de mieux répondre à la demande des clients en diversifiant les gammes. Enfin, dans le cadre de la conception ou de la restructuration d'une ligne de production, cet

---

<sup>1</sup> Autostockeur ou architecture à tiroirs.

outil permettra de connaître le volume de véhicules nécessaires à la réalisation d'un bon re-séquencement et de comparer différentes architectures de stock intermédiaire.



## **CONCLUSION**



# Conclusion

---

L'objet de cette thèse était d'étudier le problème industriel du re-séquencement des lignes de production automobile. Plus précisément, notre objectif a été de proposer une procédure permettant d'adapter le flux des véhicules provenant de l'atelier de peinture aux contraintes de l'atelier de montage. Les contraintes à prendre en compte étaient :

- lisser la charge de travail des différents postes de la ligne, afin de minimiser le nombre et l'amplitude des pertes d'efficacité,
- maintenir constant les taux de consommation des composants nécessaires au montage des différents véhicules.

Le premier objectif, relatif au lissage de la charge de travail, a nécessité la modélisation du flux des véhicules en montage. Deux modélisations possibles ont été développées et critiquées : la modélisation de la charge effective des postes de travail et la modélisation par espacement de critères. La première approche modélise de façon explicite la charge de travail des différents postes de la ligne de montage et fait appel aux tâches qui doivent être exécutées sur ces postes. Cette modélisation nécessite des données précises qui ne sont pas toutes connues ou accessibles et s'avère difficile à utiliser en pratique. La seconde approche de modélisation utilise des règles d'espacement entre critères et c'est cette approche qui a été utilisée. Nous avons introduit deux types d'espacement : l'espacement acceptable et l'espacement optimal. L'espacement acceptable est l'espacement minimal à partir duquel la production dans l'atelier de montage s'effectue dans de bonnes conditions, en garantissant aux opérateurs un temps suffisant pour terminer leurs travaux de montage. L'espacement optimal est la valeur moyenne de l'espacement calculée sur la journée de production.

L'objectif de notre procédure de re-séquencement est que le flux de véhicules au montage soit tel que les espacements entre chaque critère soient partout supérieurs aux espacements acceptables et se rapprochent le plus possible des espacements optimaux. Ainsi, il n'y a pas de perte d'efficacité de la part des opérateurs et le lissage de la charge est bien réalisé. De plus, le respect des espacements optimaux permet de garantir des taux de consommation en composants constants et de respecter la contrainte du juste-à-temps.

La procédure de re-séquencement doit permettre de déterminer de façon périodique quel sera le prochain véhicule à lancer en montage parmi tous les véhicules présents dans le moyen de stockage intermédiaire, autostockeur ou architecture à tiroirs en tenant compte :

- des véhicules récemment envoyés sur la ligne,
- de la composition du buffer de re-séquencement,
- de la composition de l'enveloppe journalière,
- de l'aspect dynamique du problème.

Afin de construire la procédure de re-séquencement, plusieurs méthodes de résolution empruntées aux techniques de l'optimisation combinatoire ont été envisagées. A l'issue de cette étude, les avantages et les inconvénients des méthodes susceptibles de traiter efficacement le problème de re-séquencement sont apparus clairement. Deux méthodes ont été retenues : le recuit simulé et la génération progressive. Leur mise en œuvre a nécessité le développement d'une métrique générative afin de déterminer le véhicule le plus respectueux des différents objectifs de production.

Ces deux méthodes ont été testées sur de nombreux jeux d'essais. La méthode la plus adaptée à l'aspect dynamique du problème est incontestablement la recherche par faisceau. Cette méthode arborescente est paramétrable en profondeur et en largeur afin de respecter le temps de calcul imparti. Les coupures de l'arbre de recherche sont justifiées grâce à l'introduction de deux indicateurs pertinents : la matrice de préférence et le vecteur de stabilité de séquence. Les séquences réalisées sont analysées en fin de journée grâce à une métrique évaluative mesurant la qualité du re-séquencement réalisé. Les résultats obtenus par la procédure utilisant la recherche par faisceau sont très satisfaisants : les espacements entre les différents critères sont très réguliers et les espacements acceptables sont bien respectés. Les pertes d'efficacité sont évitées et le lissage de la charge est effectif. La procédure utilisant l'algorithme du recuit simulé donne des résultats sensiblement inférieurs. Bien que les espacements minimaux soient rarement violés, la charge des postes de travail est plus irrégulière tout au long de la journée de production. L'approche par recuit simulé présente deux inconvénients importants : la totalité des véhicules présents dans le buffer de re-séquencement doit être prise en compte et le réglage parfois délicat des différents paramètres peut constituer un obstacle à une utilisation industrielle.

L'approche de résolution utilisant la recherche par faisceau réalise un très bon compromis entre la qualité du re-séquencement réalisé et le temps de calcul imparti. Cette approche permet d'obtenir une procédure de re-

séquencement performante, fortement réactive, simple à mettre en œuvre et intégrant parfaitement le contexte incertain.

Le travail présenté dans cette thèse ouvre plusieurs perspectives de recherche. Tout d'abord, l'intégration des temps de séjour dans le buffer de re-séquencement doit être réalisée. L'introduction d'un coût de stockage pénalisant les temps de stockage trop longs permettrait de mieux respecter les délais moyens de production. Cette prise en compte du temps de séjour dans le buffer nécessite toutefois de bien « proportionner » les coûts de stockage par rapport aux coûts reçus pour violation des contraintes de l'atelier de montage. La réalisation d'un bon compromis nécessite que certaines données économiques soient connues afin de savoir dans quelle mesure il faut favoriser l'enlèvement d'un véhicule présent depuis longtemps dans le buffer mais susceptible de causer des problèmes au montage.

Une autre perspective concerne l'étude plus approfondie des architectures à tiroirs et des architectures mixtes, combinant autostockeur et tiroirs. L'affectation des véhicules en entrée de buffer nécessite en particulier le développement de méthodes efficaces. Ce travail est en cours dans le cadre d'une thèse CIFRE au sein de PSA Peugeot Citroën à paraître en début d'année 1998. D'autres pistes de recherche telles que l'étude comparative entre les différents moyens de stockage ou l'aide au dimensionnement des buffers de re-séquencement sont également susceptibles d'être étudiés.



## **RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES**



# Références Bibliographiques

---

- [AAR 87] AARTS E.H.L., VAN LAARHOVEN P.J.M., « Simulated Annealing : Theory and Applications », D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland, 1987.
- [ALJ 90] ALJ A., FAURE R., « Guide de la Recherche Opérationnelle : Les applications », Editions Masson, Paris, 1990.
- [ARC 66] ARCUS A.L., « Comsoal : A Computer Method of Sequencing Operations for Assembly Lines », *The International Journal of Production Research*, Vol. 4, No. 4, 1966, p. 259-277.
- [BAR 92] BARD J.F., DAR-EL E., SHTUB A., « An Analytic Framework for Sequencing Mixed Model Assembly Lines », *International Journal of Production Research*, Vol. 30, No. 1, 1992, p. 35-48.
- [BAR 94] BARD J.F., SHTUB A., JOSHI S.B., « Sequencing Mixed-Model Assembly Lines to Level Parts Usage and Minimize Line Length », *International Journal of Production Research*, Vol. 32, No. 10, 1994, p. 2431-2454.
- [BAR 97] BARATOU P., CASTELAIN E., BONNEAU P., « Gestion Réactive de Stocks à Tiroirs dans le Domaine Automobile, Validation des Algorithmes par Simulation », MOSIM'97, AFCET/FRANCOSIM/SCS, Rouen, juin 1997, p. 333-340.
- [BAY 86] BAYBARS Y., « A Survey of Exact Algorithms for the Simple Assembly Line Balancing Problem », *Management Science*, Vol. 32, No. 8, 1986.
- [BEN 87] BENASSY J., « La Gestion de Production », Editions Hermès, Paris, 1987.
- [BHA 93] BHATTACHARYVA S.K., ROY R., LOW M.J., « A Computer Simulation System for the Evaluation of Man Assignments on Car Assembly Tracks », *Simulation*, Vol. 61, No. 2, 1993, p. 124-133.
- [BIR 86] BIRD C.G., « Sequencing Vehicles for Assembly under Precedence Constraints », ORSA/TIMS Conference, Los Angeles, 1986.
- [BOL 94] BOLAT A., SAVSAR M., AL-FAWZAN M.A., « Algorithms for Real-time Scheduling of Jobs on Mixed Model Assembly Lines », *Computer Ops Res.*, Vol. 21, No. 5, 1994, p. 487-498.

- [BON 73] BONNEY M.C., SCHOLFIELD N.A., « NULISP : A Computer-Aided Design System », *Work Study & Management Services*, 1973, p. 623-633.
- [BON 91] BONNEMOY C., HAMMA S.B., « La Méthode du Recuit Simulé : Optimisation Globale dans  $R^n$  », *APII*, Vol. 25, 1991, p. 477-496.
- [BOU 97] BOULET-GERCOURT, « Le Come-Back des Grands de l'Automobile », *Le Nouvel Observateur*, No. 1689, 1997, p. 68.
- [BUF 61] BUFFA E.S., « Pacing Effects in Production Lines », *Journal of Industrial Engineering*, Vol. 12, 1961, p. 383.
- [BUR 87] BURNS L.D., DAGANZO C.F., « Assembly Line Job Sequencing Principles », *International Journal of Production Research*, Vol. 25, No. 1, 1987, p. 71-99.
- [BUX 74] BUXLEY G., « The Effects of Operator Variability on the Performance of Fixed-Item Conveyor-Paced Assembly Lines », *Work Study Mgt. Serv.*, May 1974, p. 288-292.
- [BUZ 90] BUZACOTT J.A., « Abandoning the Moving Assembly Line : Models of Human Operators and Job Sequencing », *International Journal of Production Research*, Vol. 28, No. 5, 1990, p. 821-839.
- [CAK 93] CAKIR A., INMAN R.R., « Modified Goal Chasing for Products with Non-zero/One Bills of Material », *International Journal of Production Research*, Vol. 31, No. 1, 1993, p. 107-115.
- [CAS 95] CASTELAIN E., DELAVAL M., OHL H., GENTINA J-C., RIAT J-C., YVARS P-A., « Algorithmes de Cadencement Réactif des Véhicules en Entrée de Ligne de Montage Automobile », *Revue d'Automatique et de Productique Appliquées*, Vol. 8, No. 5, 1995, p. 663-682.
- [CAU 93] CAUX C., « Analyse et spécification de systèmes de production pour l'évaluation des performances et la recherche d'ordonnements », Thèse de Doctorat, Université de Clermont-Ferrand, février 1993.
- [CAU 94] CAUX C., PIERREVAL H., PORTMANN M.C., « Les Algorithmes Génétiques et leur Application aux Problèmes d'Ordonnement », Groupement de Recherche Automatique, Ordonnement et Entreprise, Toulouse, juin 1994, p. 5-45.
- [CHA 86] CHAKRAVARTY A.K., SHTUB A., « A Cost Minimization Procedure for Mixed Model Production Lines with Normally Distributed Task Times », *European Journal of Operational Research*, Vol. 23, 1986, p. 25-36.

- [CHA 96] CHARON I., GERMA A., HUDRY O., « Méthodes d'optimisation Combinatoire », Masson, Paris, 1996.
- [CHE 91] CHEW T-L., DAVID J-M, NGUYEN A., TOURBIER Y., « Solving Constraint Satisfaction Problems with Simulated Annealing : the Car Sequencing Problem Revisited », 1991, p. 405-416.
- [CHE 94] CHEVALIER MILHE N., « Ordonnancement d'un système de production : méthodes de voisinage », Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II, mars 1994.
- [COF 85] COFFMAN P.E. Jr., HOFFMAN S.E., WEINER S.A., « An O.R. View of Assembly Plant Modeling », TIMS/ORSA Conference, Boston, 1985.
- [COM 95] COMBY G., BIENNIER F., FAVREL J., « Sequencing Mixed-Model Assembly Lines : A Multi-Criteria and Flexible Approach », 3<sup>rd</sup> Workshop on Intelligent Manufacturing System (IMS'95), Bucharest (Romania), October 24-26 1995, p. 179-184.
- [COM 96a] COMBY G., DUPONT L., « Séquencement sur les Lignes d'Assemblages Multi-Modèles : Une Approche par Recuit Simulé », 5<sup>ème</sup> Congrès de Génie Industriel (GI'5), Grenoble, Vol. 2, 2-4 avril 1996, p. 97-106.
- [COM 96b] COMBY G., « Aide au Séquencement des Produits sur une Ligne de Fabrication Multi-Modèles », Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, décembre 1996, 250 p.
- [CON 55] CONRAD R., HILLE B., « Comparison of Paced and Unpaced Performance at a Packing Task », *Occupational Psychology*, Vol. 29, No. 1, 1955.
- [DAR 75] DAR-EL E.M., COTHER R.F., « Assembly Line Sequencing for Model Mix », *International Journal of Production Research*, Vol. 13, No. 5, 1975, p. 463-477.
- [DAR 77] DAR-EL E.M., CUCUY S., « Optimal Mixed-Model Sequencing for Balanced Assembly Lines », *OMEGA, The International Journal of Management Science*, Vol. 5, No. 3, 1977.
- [DAR 78] DAR-EL E.M., « Mixed-Model Assembly Line Sequencing Problems », *OMEGA, The International Journal of Management Science*, Vol. 6, No 4, 1978, p. 313-323.
- [DAV 66] DAVIS L.E., « Pacing Effects on Manned Assembly Lines », *International Journal of Production Research*, Vol. 4, No. 3, 1966, p. 171-184.

- [DEL 95] DELAVAL M., CASTELAIN E., GENTINA J.C., « Dynamic Resequencing of Cars on Assembly Lines using Simulated Annealing », 28<sup>th</sup> International Symposium on Automotive Technology and Automation, Dedicated Conference on Lean/Agile Manufacturing in the Automotive Industries, Stuttgart, Germany, 95LM039, September 18-22 1995, p. 169-175.
- [DEL 96a] DELAVAL M., LEFORT A., « Car Sequencing Problem, Two Approaches : Hypernets and Simulated Annealing », CIMAT 96, Grenoble, mai 1996.
- [DEL 96b] DELAVAL M., CASTELAIN E., « Mixed-Model Assembly Lines Sequencing with Two Algorithms : Progressive Generation and Simulated Annealing », IEEE-SMC CESA'96, Lille, juin 1996.
- [DIN 88] DINCBAS M., SIMONIS H., VAN HENTENRYCK P., « Solving the Car-Sequencing Problem in Constraint Logic Programming », *European Conference on AI*, Avignon, 1988, p. 290-295.
- [DUD 95] DUDOUET C., « Une Méthode de Gestion de Production en Flux Tirés à Flexibilités Paramétrables : Application au Cas de l'Automobile », Thèse de Doctorat, Génie Industriel, Ecole Centrale de Paris, octobre 1995.
- [ELL 92] ELLEGARD K., JONSSON D., ENGSTRÖM T., JOHANSSON M.I., MEDBO L., JOHANSSON B., « Reflective Production in the Final Assembly of Motor Vehicles - An Emerging Swedish Challenge », *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 12, Nos. 7/8, 1992, p. 117-133.
- [FON 93] FONG-YUEN D., LIPING C., « A Simple Sequencing Algorithm for Mixed-Model Assembly Lines in Just-in-Time Production Systems », *Operations Research Letters*, Vol. 13, 1993, p. 27-36.
- [FOX 83] FOX M.S., « Constraint-directed Search : A Case of Study of Job-shop Scheduling », Ph.D. thesis, Carnegie-Mellon University, USA, 1983.
- [GHO 89] GHOSH S., GAGNON R.J., « A Comprehensive Literature Review and Analysis of the Design, Balancing and Scheduling of Assembly Systems », *International of Production Research*, Vol. 27, No. 4, 1989, p. 637-670.
- [GLO 89] GLOVER F., « Tabu Search : Part I », *ORSA Journal on Computing*, Vol. 1, 1989, p. 190-206.
- [GLO 90] GLOVER F., « Tabu Search : Part II », *ORSA Journal on Computing*, Vol. 2, 1990, p. 4-32.
- [GOL 89] GOLDBERG D.E., « Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning », Addison-Wesley Publishing Company, 1989.

- [GOT 93] GOTHA, « Les Problèmes d'ordonnancement », *Recherche Opérationnelle*, Vol. 27, No. 1, 1993, p. 77-150.
- [GUE 95a] GUERRE-CHALEY F., FREIN Y., BOUFFARD-VERCELLI R., « An Efficient Procedure for Solving a Car Sequencing Problem », *ETFA 95*, Paris, Vol. 2, 1995, p. 385-394.
- [GUE 95b] GUERRE-CHALEY F., « Sur les Séquencements en Unité de Production Automobile », Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, décembre 1995, 130 p.
- [HAJ 88] HAJECK B., « Cooling Schedules for Optimal Annealing », *Mathematics of Operations Research*, Vol. 13, 1988, p. 311-329.
- [HER 94] HERT A, WIDMER M., « An Improved Tabu Search Approach for Solving the Job Shop Scheduling Problem with Tooling Constraints », Report ORWP 93/01, DMA - EPFL, Lausanne, Suisse, 1994.
- [IGN 65] IGNALL E.J., « A Review of Assembly Line-Balancing », *Journal of Industrial Engineering*, Vol. 16, 1965, p. 244-254.
- [INM 92] INMAN R.R., BULFIN R.L., « Quick and Dirty Sequencing for Mixed-Model Multi-Level JIT Systems Sequencing », *International Journal of Production Research*, Vol. 30, No. 9, 1992, p. 2011-2018.
- [JAF 86] JAFFAR J, LASSEZ J.L., « Constraint Logic Programming », Technical Report, Department of Computer Science, Monash University, June 1986.
- [JOH 90] JOHANSSON M.I., JOHANSSON B., « High Automated Kitting System for Small Parts - A Case of Study from the Volvo Uddevalla Plant », Proceedings of the 23<sup>rd</sup> International Symposium on Automotive Technology and Automation, Wien, 1990, p. 75-82.
- [KAU 68] KAUFMANN A., « Introduction à la Combinatoire en Vue des Applications », Ed. Dunod, Paris, 1968.
- [KIL 61] KILBRIDGE M., WESTER L., « A Heuristic Method of Assembly Line Balancing », *Journal of Industrial Engineering*, Vol. 12, No. 4, July-August 1961.
- [KIR 83] KIRKPATRICK S., GELATT C.D., VECCHI M.P., « Optimization by Simulated Annealing », *Science*, Vol. 220, No. 4598, 1983, p. 671-680.
- [KUB 94] KUBIAK W., SETHI S.P., « Optimal Just-in-Time Schedules for Flexible Transfer Lines », *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems.*, Vol. 6, 1994, p. 137-154.

- [LEF 93] LEFORT A., « Réseaux de Petri à Contraintes », Rapport de DEA, Ecole Centrale de Lille, juillet 1993.
- [LEH 69] LEHMAN M., « On Criteria for Assigning Models to Assembly Lines », *International Journal of Production Research*, Vol. 7, No. 4, 1969.
- [LOW 76] LOWERRE B.T., « The HARPY Speech Recognition System », Ph.D. thesis, Carnegie-Mellon University, USA, April 1976.
- [MAC 73] MACASKILL J.L.C., « Computer Simulation for Mixed-Model Production Lines », *Management Science*, Vol. 20, No. 3, 1973, p. 341-348.
- [MIC 92] MICHALEWICZ Z., « Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs », Springer-Verlag, 1992.
- [MIL 89a] MILTENBURG J., « Level Schedules for Mixed-Model Assembly Lines in Just-in-time Production Systems », *Management Science*, Vol. 35, No. 2, 1989, p. 192-207.
- [MIL 89b] MILTENBURG J., SINNAMON G., « Scheduling Mixed-Model Multi-Level Just-in-Time Production Systems », *International of Production Research*, Vol. 27, No. 9, 1989, p. 1487-1509.
- [MIL 90] MILTENBURG J., STEINER G., YEOMANS S., « A Dynamic Programming Algorithm for Scheduling Mixed-Model, Just-in-Time Production Systems », *Mathl Comput. Modelling*, Vol. 13, No. 3, 1990, p. 57-66.
- [MIL 91] MILTENBURG G.J., GOLDSTEIN T., « Developing Production Schedules with Balance Part Usage and Smooth Production Loads for Just-in-Time Production Systems », *Naval Research Logistics*, Vol. 38, 1991, p. 893-910.
- [MOL 89] MOLET H., « La Nouvelle Gestion de Production », Editions Hermès, Paris, 1989.
- [MON 83] MONDEN Y., « Toyota Production Systems », Industrial Engineering and Management Press, Institute of Industrial Engineers, Atlanta, 1983.
- [MUR 62] MURRELL K.F.H., « Operator Variability and its Industrial Consequences », *International Journal of Production Research*, Vol. 1, No. 39, 1962.
- [NGW 94] NG W.C., MAK K.L., « A Branch and Bound Algorithm for Scheduling Just-in-time Mixed-model Assembly Lines », *International Journal of Production Economics*, Vol. 33, 1994, p. 169-183.
- [NIL 88] NILSSON N.J., « Principes d'intelligence artificielle », Cepadues Editions, Toulouse, 1988.

- [OKA 79] OKAMURA K., YAMASHINA H., « Heuristic Algorithm for the Assembly Line Model-Mix Sequencing Problem to Minimize the Risk of Stopping the Conveyor », *International Journal of Production Research*, Vol. 17, No. 3, 1979, p. 233-247.
- [OW 88] OW P.S, MORTON T.E., « Filtered Beam Search in Scheduling », *International Journal of Production Research*, Vol. 26, No. 1, 1988, p. 35-62.
- [PAR 86] PARRELLO B.D., KABAT W.C., WOS L., « Job-Shop Scheduling Using Automated Reasoning : A Case Study of the Car-Sequencing Problem », *Journal of Automated Reasoning*, Vol. 2, 1986, p. 1-42.
- [PAR 88] PARRELLO B.D, « Car Wars : The (Almost) Birth of an Expert System », *AI Expert*, January 1988, p. 60-64.
- [RIF 96] RIFKIN J., « La Fin du Travail », Editions la Découverte, Paris, 1996.
- [ROB 70] ROBERTS S., VILLA C., « A Multiproduct Assembly Line Balancing Problem », *AIIE Transactions*, Vol. 5, No. 3, 1970.
- [ROG 92] ROGER P., « Gestion de production », Editions Dalloz-Sirey, Paris, 1992.
- [SAK 84] SAKAROVITCH M., « Programmation discrète, Optimisation combinatoire, Méthodes mathématiques et algorithmiques », Hermann, Paris, 1984.
- [SIA 89] SIARRY P., DREYFUS G., « La Méthode du Recuit Simulé : Théorie et Applications », ESPCI-IDSET, Paris, 1989.
- [SUM 92] SUMICHRAS R.T., RUSSELL R.S., TAYLOR B.W., « A Comparative Analysis of Sequencing Procedures for Mixed-Model Assembly Lines in a Just-In-Time Production System », *International Journal of Production Research*, Vol. 30, No. 1, 1992, p. 199-214.
- [THO 67] THOMOPOULOS N.T., « Line Balancing-Sequencing for Mixed Model Assembly », *Management Science*, Vol. 14, 1967, p. 59-75.
- [THO 70] THOMOPOULOS N.T., « Mixed Model Line Balancing with Smoothed Station Assignments », *Management Science*, Vol. 16, No. 9, 1970.
- [VAR 96] VARNIER C., « Extensions du 'Hoist Scheduling Problem' Cyclique », Thèse de Doctorat, Université de Franche Compté, janvier 1996.
- [WEI 85] WEINER S., « Perspectives on Automotive Manufacturing », *The Management of Productivity and Technology in Manufacturing*, Editions P.R. Kleindorfer, Plenum Press, New-York, 1985, p. 57-71.

- [WES 64] WESTER L., KILBRIDGE M., « The Assembly Line Mixed Model Sequencing Problem », *Proceedings of the Third International Conference on Operations Research 1963*, Paris, 1964, p. 247-260.
- [WOM 90] WOMACK J., JONES D., ROOS D., « The Machine That Changed the World », Macmillan, New-York, 1990.
- [YAN 89] YANO C.A., BOLAT A., « Survey, Development and Application of Algorithms for Sequencing Paced Assembly Lines », *Journal of Manufacturing and Operations Management*, Vol. 2, No. 3, 1989, p. 172-198.
- [YAN 91] YANO C.A., RACHAMADUGU R., « Sequencing to Minimize Work Overload in Assembly Lines with Product Options », *Management Science*, Vol. 37, No. 5, 1991, p. 572-586.

## **LISTE DES FIGURES**



# Liste des figures

---

Figure 1.1 - Relation entre le niveau de stock et les problèmes de production.....	24
Figure 1.2 - Flux global d'une usine de production automobile.....	29
Figure 1.3 - Evolution du coût annuel des changements de teinte en fonction de la longueur moyenne des rafales ....	30
Figure 1.4 - Les différentes pertes d'efficacité.....	35
Figure 1.5 - Les niveaux de production d'un système de production juste-à-temps.....	36
Figure 1.6 - Contraintes de précédence des tâches.....	40
Figure 1.7 - Classification des problèmes d'équilibrage.....	41
Figure 1.8 - Techniques de groupement et d'espacement de [BUR 87].....	46
Figure 1.9 - Flux global d'une usine de production automobile avec stocks de re-séquencement.....	48
Figure 1.10 - Les différents stocks de gestion intermédiaires.....	48
Figure 1.11 - Classification des lignes d'assemblage à modèles mélangés [DAR 78].....	53
<hr/>	
Figure 2.1 - Illustration de l'aspect dynamique du problème de re-séquencement.....	81
Figure 2.2 - Modélisation d'un poste de travail.....	85
Figure 2.3 - Evolution du travail de l'opérateur dans un poste de travail fermé.....	86
Figure 2.4 - Exemple de contrainte de ratio.....	90
Figure 2.5 - Exemple de contrainte d'espacement.....	91
Figure 2.6 - Comparaison entre les violations des règles d'espacements et les pertes d'efficacité.....	92
Figure 2.7 - Exemple de bonne séquence respectant les contraintes diagonales et croisées.....	96
Figure 2.8 - Relation entre les $x_{ip}$ et $p.n_i/N$ .....	101
Figure 2.9 - Architecture à tiroirs.....	106
Figure 2.10 - Exemple de construction de séquences prévisionnelles.....	107
Figure 2.11 - Affectation d'un véhicule en entrée des tiroirs.....	109
Figure 2.12 - Conséquences du placement d'un véhicule dans la séquence prévisionnelle sur l'affectation.....	109
Figure 2.13 - Exemple d'enveloppe ré-ordonnançable.....	110

---

Figure 2.14 - Influence de l'architecture sur la faisabilité de la séquence prévisionnelle.....	111
<hr/>	
Figure 3.1 - Organigramme de la descente stochastique.....	120
Figure 3.2 - Recherche de la solution par descente stochastique.....	121
Figure 3.3 - Recherche de la solution par recuit simulé.....	123
Figure 3.4 - Organigramme de l'algorithme du recuit simulé.....	124
Figure 3.5 - Organigramme de la méthode Tabou.....	127
Figure 3.6 - Organigramme d'un algorithme génétique.....	133
Figure 3.7 - Exemple de croisement.....	134
Figure 3.8 - Exemple de mutation.....	134
Figure 3.9 - Recherche en profondeur d'abord.....	137
Figure 3.10 - Recherche en largeur d'abord.....	138
Figure 3.11 - Les différentes étapes d'une recherche par faisceau.....	140
Figure 3.12 - Les différentes étapes d'une recherche par faisceau modifiée.....	141
Figure 3.13 - Exemple de pénalités $P_{(1)}$ et $P_{(2)}$ reçues pour les violations d'espacement.....	147
Figure 3.14 - Exemple d'arbre illustrant la méthode par faisceau.....	155
Figure 3.15 - Fenêtre utile pour la sélection du $p^{\text{ième}}$ véhicule.....	158
Figure 3.16 - Arbre de recherche.....	162
Figure 3.17 - Exemple de permutation.....	167
Figure 3.18 - Exemple d'insertion.....	168
Figure 3.19 - Insertion d'un véhicule dans une architecture à tiroirs.....	168
<hr/>	
Figure 4.1 - Insertion d'un véhicule dans une architecture à tiroirs.....	188
Figure 4.2 - Profil de sortie de la journée de production pour le critère n°8 (rech. par fais. de profondeur 3).....	188
Figure 4.3 - Profil de sortie de la journée de production pour le critère n°8 (recuit simulé).....	193
Figure 4.4 - Influence de la taille de l'autostockeur sur le re-séquencement dans le cas d'un flux contraint.....	199

