

**Titre:** Cadencement reséquençable et différenciation retardée : analyse par simulation pour une chaîne de production multi-produits

**Auteur:** Xavier Alexis Fournier

**Date:** 2006

**Type:** Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

**Référence:** Fournier, X. A. (2006). Cadencement reséquençable et différenciation retardée : analyse par simulation pour une chaîne de production multi-produits [Master's thesis, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.  
Citation: <https://publications.polymtl.ca/7710/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**  
Open Access document in PolyPublie

**URL de PolyPublie:** <https://publications.polymtl.ca/7710/>  
PolyPublie URL:

**Directeurs de recherche:** Bruno Agard  
Advisors:

**Programme:** Unspecified  
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

CADENCEMENT RESÉQUENÇABLE ET DIFFÉRENCIATION RETARDÉE:  
ANALYSE PAR SIMULATION POUR UNE CHAÎNE DE PRODUCTION  
MULTI-PRODUITS

XAVIER ALEXIS FOURNIER  
DÉPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES ET DE GÉNIE INDUSTRIEL  
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION  
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES  
(GÉNIE INDUSTRIEL)  
AVRIL 2006



Library and  
Archives Canada

Bibliothèque et  
Archives Canada

Published Heritage  
Branch

Direction du  
Patrimoine de l'édition

395 Wellington Street  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada

395, rue Wellington  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada

*Your file* *Votre référence*  
*ISBN: 978-0-494-17941-3*  
*Our file* *Notre référence*  
*ISBN: 978-0-494-17941-3*

#### NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

#### AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

---

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

  
**Canada**

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

CADENCEMENT RESÉQUENÇABLE ET DIFFÉRENCIATION RETARDÉE:  
ANALYSE PAR SIMULATION POUR UNE CHAÎNE DE PRODUCTION  
MULTI-PRODUITS

présenté par : FOURNIER Xavier Alexis

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de:

M. BAPTISTE Pierre, Doctorat, président

M. AGARD Bruno, Doctorat, membre et directeur de recherche

M. TRÉPANIÉ Martin, ing., Ph.D., membre

à Vincent.

## REMERCIEMENTS

En premier lieu, je voudrais remercier tout particulièrement Bruno Agard pour m'avoir permis d'effectuer cette maîtrise sous sa direction et d'avoir toujours été à mon écoute. Nul autre suivi n'aurait été meilleur pour l'aboutissement de ce travail. J'espère également avoir été à la hauteur de ses attentes. Je tiens également à le remercier pour les conditions financières dont j'ai eu la chance de bénéficier. Je remercie également l'École Polytechnique et l'École Polytechnique de Montréal pour toute la formation que j'ai reçue au cours de ces 5 dernières années. Je remercie également les concepteurs et utilisateurs de cet outil magnifique qu'est Matlab pour en avoir fait un logiciel à la fois performant et d'apprentissage simple.

Je n'oublie pas mes parents et mon frère pour leur soutien, mes différents colocataires (Bast, Pierrot, Sophie et le Koalou) et les personnes que j'ai connues et côtoyées pendant ces deux ans (Alex, Alicia, Amélia, Andrée-Anne, Anne, Axelle, Benjamin, Caro, Cédric, Dave, Fifi, France, Gaëlle, Ghislain, Irina, J.-P., Jasmine, Juju, Julien, Kamal, Killian, Kro, Lolei, Marianne, Martin, Max, Midj, Oscar, Othman, Pat, Roro, Seb, Steph, Sylvain, Valérie, Vince, Vivi et Zemfira) pour tous les bons moments que j'ai passés avec eux.

Je remercie finalement les Québécois pour leur accueil chaleureux et leur nature généreuse.

## RÉSUMÉ

Ce mémoire présente un modèle de simulation sous Matlab permettant de traiter le problème de reséquencement de véhicules d'une chaîne multi-produits. Le problème est modélisé en trois ateliers, ferrage, peinture et montage, chacun précédé d'un stock tampon. La liste initiale de production est supposée déjà séquencée en fonction des contraintes de l'atelier de montage. Les deux premiers stocks permettent de cadencer la séquence en fonction des contraintes de l'atelier aval. Le dernier tente de retrouver la liste initiale ordonnée pour répondre aux contraintes de production synchrone. Des perturbations réalistes sont aussi introduites dans les ateliers de ferrage et de peinture.

Des métriques et des règles de tri pour chacun des stocks sont ensuite présentées. Une étude détaillée fondée sur des critères de performance bien choisis permet alors de privilégier une métrique globale et une règle de tri par type de stock. Outre les différentes politiques de gestion de ces stocks, l'influence de différents modèles et différentes tailles de stock est étudiée.

L'objectif est ensuite d'estimer les améliorations des critères de performance engendrées par l'introduction de la différenciation retardée en deux points de la chaîne de production. Les améliorations relatives de l'introduction de chacun de ces deux points. La différenciation retardée dans ce contexte n'a encore jamais été présenté dans la littérature.

Ce travail se termine par l'établissement d'un plan d'expériences permettant d'évaluer ces introductions en faisant varier tous les paramètres du modèle. Les améliorations pour les indicateurs choisis se situent entre 19.22 et 89.57%.

## ABSTRACT

This report presents a simulation model in Matlab that deals with the car resequencing problem for mixed-model assembly lines. A body shop, a paint shop and an assembly shop are considered. A buffer stock comes before each of them. The initial production sequence is given and assumed to satisfy the constraints of the assembly shop. Stocks before the body and the paint shop enable a pre-sequencing depending on the next shop constraints whereas the stock before the assembly shop tries to rebuild the initial list to better respond to synchronous production constraints. Realistic disturbances in the sequence are introduced in the body shop and the paint shop.

Metrics and rules of selection for each stock are presented afterwards. A detailed study based on accurately chosen performance criterions enables to favor a global metric and a rule depending on the type of stock. As well as these different stock management policies, the influence of the different types and sizes of stocks are studied.

The objective is then to estimate the performance criterion's improvement generated by the introduction of postponement in two different places of the production chain. The relative benefits of each introduction are estimated. Postponement in this context has not yet been studied in literature.

This work ends with design of experiments. It enables to evaluate these introductions with the variation of every parameter in the model. The improvements on the chosen criterions are between 19.22 and 89.57%.

## TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE . . . . .	iv
REMERCIEMENTS . . . . .	v
RÉSUMÉ . . . . .	vi
ABSTRACT . . . . .	vii
TABLE DES MATIÈRES . . . . .	viii
LISTE DES TABLEAUX . . . . .	xii
LISTE DES FIGURES . . . . .	xiv
LISTE DES NOTATIONS ET DES SYMBOLES . . . . .	xx
LISTE DES ANNEXES . . . . .	xxi
INTRODUCTION . . . . .	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE . . . . .	4
1.1 Le problème PRV . . . . .	5
1.2 Le problème ORV . . . . .	6
1.3 Autres objectifs de séquençement employés . . . . .	7
1.4 Le problème de séquençement automobile . . . . .	9
1.4.1 Séquençement d'une ligne d'assemblage . . . . .	9
1.4.2 Séquençement à plus grande échelle . . . . .	11
1.5 Le cadencement . . . . .	13
1.6 Le reséquencement . . . . .	16
1.6.1 Étude des stocks tampons . . . . .	16

1.6.2	Indices de priorité . . . . .	18
1.7	Différenciation retardée au niveau de l'entreprise . . . . .	20
1.7.1	À l'échelle globale . . . . .	20
1.7.2	À l'échelle locale . . . . .	21
1.7.3	Évaluation de la différenciation retardée . . . . .	23
1.8	Différenciation retardée au niveau de la chaîne de distribution . . . . .	24
1.9	Alternatives et perspectives . . . . .	26
1.10	Conclusion . . . . .	28
CHAPITRE 2 MODÉLISATION DU PROBLÈME . . . . .		29
2.1	Construction d'une LUO . . . . .	30
2.2	Indicateurs de performance . . . . .	32
2.2.1	Retard et avance maximaux à $x\%$ . . . . .	33
2.2.2	Respect de la LUO à $\pm n$ places . . . . .	33
2.2.3	Retards et avances cumulés à $x\%$ . . . . .	33
2.3	Perturbation d'une liste . . . . .	34
2.4	Détermination de la taille de la liste . . . . .	36
2.5	Cadencement pour le ferrage . . . . .	37
2.5.1	Stock à accès direct . . . . .	38
2.5.2	Stock à tiroirs . . . . .	41
2.6	Cadencement pour la peinture . . . . .	43
2.7	Reséquencement en entrée de montage . . . . .	43
2.7.1	Stock à accès direct . . . . .	44
2.7.2	Stock à tiroirs - Intervention d'un critère de choix . . . . .	45
2.7.2.1	Comparaison entre un critère de choix individuel et collectif . . . . .	45
2.7.2.2	Influence du type de métrique . . . . .	46
2.8	Observations sur le modèle établi . . . . .	49

2.8.1	Reséquançabilité parfaite . . . . .	49
2.8.2	Évolution des retards le long de la ligne . . . . .	50
2.8.2.1	Évolution globale . . . . .	50
2.8.2.2	Indicateurs de performance . . . . .	51
2.9	Conclusion . . . . .	56
CHAPITRE 3 INTRODUCTION DE LA DIFFÉRENCIATION RETAR-		
DÉE DANS LE MODÈLE . . . . .		57
3.1	Deux types d'échanges . . . . .	58
3.1.1	Un échange global . . . . .	59
3.1.2	Un échange limité au stock tampon . . . . .	60
3.2	Comparaison des deux types d'échange . . . . .	60
3.3	Introduction de la différenciation avant le cadencement de la peinture . . . . .	62
3.3.1	Stock à accès direct pour le cadencement du ferrage . . . . .	63
3.3.2	Stock à tiroirs pour le cadencement du ferrage . . . . .	64
3.4	Introduction de la différenciation avant le reséquançement . . . . .	65
3.4.1	Stock à accès direct pour le cadencement de la peinture . . . . .	66
3.4.2	Stock à tiroirs pour le cadencement de la peinture . . . . .	67
3.5	Répartition des retards en entrée de montage . . . . .	68
3.5.1	Stocks à accès direct . . . . .	69
3.5.2	Stocks à 5 tiroirs . . . . .	70
3.6	Conclusion . . . . .	71
CHAPITRE 4 PLAN D'EXPÉRIENCES . . . . .		72
4.1	Détermination des différents paramètres . . . . .	73
4.1.1	Détermination des variables . . . . .	73
4.1.2	Détermination des indicateurs de performance . . . . .	75
4.2	Analyse des résultats . . . . .	76

	xi
4.2.1 Taille de stocks . . . . .	76
4.2.2 Type de stocks . . . . .	77
4.2.3 Introduction de la différenciation retardée . . . . .	79
4.3 Conclusion . . . . .	79
CONCLUSION . . . . .	80
RÉFÉRENCES . . . . .	83
ANNEXES . . . . .	91

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1	Comparaison des règles de cadencement pour le ferrage pour un stock 1 à accès direct de 150 places. Moyennes sur 20 expériences, en nombre de places. . . . .	40
Tableau 2.2	Comparaison des règles de cadencement pour le ferrage pour un stock 1 de 5 rails de 10 places. Moyennes sur 20 expériences, en nombre de places. . . . .	42
Tableau 2.3	Comparaison des deux critères de choix pour un stock de reséquencement de 5 rails de taille 10. Moyennes sur 20 simulations. . . . .	46
Tableau 2.4	Comparaison des trois métriques avec un stock de reséquencement de 5 rails de taille 10. Moyenne sur 20 expériences, en nombre de places. . . . .	47
Tableau 2.5	Valeur de $n$ telle que le pourcentage $x$ des items aient plus de $n$ places de retard ou d'avance en fonction de la taille du stock de reséquencement. . . . .	49
Tableau I.1	Comparaison des différentes règles de cadencement pour le ferrage pour un stock 1 à accès direct de 100 places. Moyennes sur 20 expériences, en nombre de places. Lorsque non précisé, les valeurs sont à 95%. . . . .	92
Tableau I.2	Comparaison des différentes règles de cadencement pour le ferrage pour un stock 1 de 10 rails de 5 places. Moyennes sur 20 simulations, en nombre de places. Lorsque non précisé, les valeurs sont à 95%. . . . .	92
Tableau I.3	Comparaison des deux critères de choix pour un stock 3 de reséquencement de 10 rails de taille 5. Moyennes sur 20 simulations. . . . .	93

Tableau I.4	Comparaison des trois métriques avec un stock 3 de reséquence- ment de 10 rails de taille 5. Moyennes sur 20 expériences, en nombre de places. . . . .	93
Tableau III.1	Les 81 combinaisons de valeurs des 6 premières variables pour le plan d'expériences (voir la section 4.1.1). Les tailles de stocks prennent 9 valeurs notées de 1 à 9 (pour les valeurs respectives 20,30,40,50,70,90,110,130 et 150) et les types de stocks sont notés de 1 à 3 (pour respectivement à accès direct, à 5 rails et à 10 rails). . . . .	106

## LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Modélisation d'une chaîne automobile par Guerre-Chaley et al. (1995). . . . .	14
Figure 1.2	Modélisation d'une chaîne d'assemblage par Bernier (2000) et Baratou (1998). . . . .	16
Figure 1.3	Agencement d'ateliers en fonction de différentes structures de chaînes d'assemblage. . . . .	24
Figure 2.1	Modélisation d'une chaîne d'assemblage. . . . .	29
Figure 2.2	Comparaison entre la répartition des retards issus des perturbations observées par Bernier (à gauche) et la modélisation obtenue ici (à droite) pour l'atelier de ferrage (en haut) et de peinture (en bas). . . . .	35
Figure 2.3	Incertitude relative des retards (avec étoiles) et avances cumulées (avec points) maximale (pour différentes valeurs de $x$ ) introduite par la perturbation de l'atelier de ferrage. . . . .	36
Figure 2.4	Différents types de gestion du stock. Stock à accès direct (à gauche) et à tiroirs (à droite). . . . .	38
Figure 2.5	Modélisation d'une chaîne d'assemblage. . . . .	44
Figure 2.6	Métrique employée par Bernier, $N_3$ , en fonction du nombre de places d'avance. . . . .	47
Figure 2.7	Respect de la LUO à $\pm n$ places ( $0 \leq n \leq 200$ ) pour des listes reséquenceées à l'aide des métriques $N_1$ (diamants), $N_2$ (étoiles) et $N_3$ (triangles) pour un stock de 10 rails de taille 5 (à gauche) et 5 rails de taille 5 (à droite). . . . .	48
Figure 2.8	Répartition (en %) des retards (en nombre de places) le long de la ligne. . . . .	51

Figure 2.9	Retards et avances maximaux à 90, 95, 96, 97, 98, 99 et 100% (de l'axe des abscisses vers l'extérieur) tout au long de la chaîne d'assemblage obtenus par modélisation (à gauche) ou observés chez un constructeur (à droite). . . . .	52
Figure 2.10	Retards et avances maximaux à 90, 95 et 99% (de l'axe des abscisses vers l'extérieur) tout au long de la chaîne d'assemblage obtenus par modélisation (à gauche) ou observés chez un constructeur (à droite). . . . .	53
Figure 2.11	Respect de la LUO à $\pm n$ places, $0 \leq n \leq 500$ obtenus par modélisation (en haut) ou observés chez un constructeur (en bas). . . . .	54
Figure 3.1	Modélisation de la chaîne avec les deux points de différenciation. . . . .	57
Figure 3.2	Fonctionnement de l'échange global d'ordres de commande.	59
Figure 3.3	Fonctionnement de l'échange limité au stock. . . . .	60
Figure 3.4	Amélioration relative des retards (points) et avances (triangles) cumulés (à gauche) et maximaux (à droite) à 95% apportée par l'échange limité au stock (en bas) ou par l'échange global (en haut) en fonction de la taille des 5 rails du stock 2.	61
Figure 3.5	Améliorations relatives des retards (points) et avances (triangles) cumulés (à gauche) et maximaux (à droite) à 95% apportées par des échanges d'ordres de commande avant le stock 2 en fonction de la taille du stock 1 à accès direct. . .	63
Figure 3.6	Améliorations relatives des retards (points) et avances (triangles) cumulés (à gauche) et maximaux (à droite) à 95% apportées par des échanges d'ordres de commande avant le stock 2 en fonction de la taille des 5 rails du stock 1. . . . .	64

Figure 3.7	Améliorations relatives des avances (en bas) et retards (en haut) cumulés (à gauche) et maximaux (à droite) à 95% avec un échange après l'atelier de peinture (points) ou avec deux échanges (triangles) par rapport à la situation sans échange en fonction de la taille du stock 2 à accès direct. . . . .	66
Figure 3.8	Amélioration relative des retards (en haut) et avances (en bas) cumulés (à gauche) et maximaux (à droite) à 95% avec un échange après l'atelier de peinture (points) ou avec deux échanges (triangles) par rapport à la situation sans échange en fonction de la taille des 5 rails du stock 2. . . . .	68
Figure 3.9	Répartition des retards en entrée du montage en fonction de l'intervention ou non d'échanges de propriétaires au niveau des deux points de différenciation. Stocks à accès direct. . .	69
Figure 3.10	Répartition des retards en entrée du montage en fonction de l'intervention ou non d'échanges de propriétaires au niveau des deux points de différenciation. Stocks à 5 rails. . . . .	71
Figure 4.1	Modélisation de la chaîne avec les deux points de différenciation. . . . .	74
Figure 4.2	Évolution des indicateurs de performance choisis au chapitre 4 en fonction de l'emploi ou non de la différenciation retardée aux deux points de différenciation. . . . .	78
Figure I.1	Évolution de la moyenne des retards (à gauche) et avances (à droite) cumulés (en haut) et maximaux (en bas) à 95% en fonction du nombre d'expériences réalisées. . . . .	91

Figure II.1	Retards (en positifs) et avances (en négatifs) cumulés (à gauche) et maximaux (à droite) à 95% en sortie du stock 2 sans échange (diamants), avec échange au niveau du stock (points) et avec échange global (triangles) en fonction de la taille des rails. Stock 2 à 5 rails. . . . .	94
Figure II.2	Retards (en positifs) et avances (en négatifs) cumulés (à gauche) et maximaux (à droite) à 95% en sortie du stock 2 sans échange (diamants), avec échange au niveau du stock (points) et avec échange global (triangles) en fonction de la taille des rails. Stock 2 à 10 rails. . . . .	94
Figure II.3	Retards (en positifs) et avances (en négatifs) cumulés (à gauche) et maximaux (à droite) à 95% en entrée du stock 2 sans échange d'ordre de commande (points) et avec échange (triangles) en fonction de la taille du stock 1 à accès direct.	95
Figure II.4	Améliorations relatives des retards (points) et avances (triangles) cumulés (à gauche) et maximaux (à droite) à 95% avec un échange d'ordres de commande avant le stock 2 en fonction de la taille des rails. Stock 1 à 10 rails. . . . .	95
Figure II.5	Améliorations relatives des retards (points) et avances (triangles) cumulés (à gauche) et maximaux (à droite) à 95% avec un échange d'ordres de commande avant le stock 2 en fonction de la taille des rails. Stock 1 à 15 rails. . . . .	96
Figure II.6	Retards (en positifs) et avances (en négatifs) cumulés (à gauche) et maximaux (à droite) à 95% avec un échange d'ordres de commande après l'atelier de peinture (points), avec deux échanges (triangles) ou sans aucun échange (diamants) en fonction de la taille du stock 2 à accès direct. . . . .	96

Figure II.7	Améliorations relatives des retards (points) et avances (triangles) cumulés à 95% avec un échange après l'atelier de peinture (en haut) ou avec deux échanges (en bas) par rapport à la situation sans échange en fonction de la taille des rails. Stock 2 à 10 rails. . . . .	97
Figure II.8	Améliorations relatives des retards (à gauche) et avances (à droite) maximaux à 95% avec un échange après l'atelier de peinture (points) ou avec deux échanges (triangles) par rapport à la situation sans échange en fonction de la taille des rails. Stock 2 à 10 rails. . . . .	97
Figure II.9	Retards (en positifs) et avances (en négatifs) cumulés à 95% avec un échange d'ordres de commande après l'atelier de peinture seulement (points), avec deux échanges (triangles) ou sans aucun échange (diamants) en fonction de la taille des rails. Stock 2 à 5 rails (à gauche) et 10 rails (à droite). . . . .	98
Figure II.10	Retards (en positifs) et avances (en négatifs) maximaux à 95% avec échange d'ordres de commande de véhicules après l'atelier de peinture seulement (points), avec deux échanges (triangles) ou sans aucun échange (diamants) en fonction de la taille des rails. Stock 2 à 5 rails (à gauche) et 10 rails (à droite). . . . .	98
Figure III.1	Avances cumulées moyennes en entrée de montage en fonction de la taille du stock 2 pour un stock 1 de 90 places (triangles) ou 110 places (points). . . . .	99
Figure III.2	Évolution des indicateurs de performance choisis au chapitre 4 en fonction des modalités de la taille du stock 1. . . . .	100
Figure III.3	Évolution des indicateurs de performance choisis au chapitre 4 en fonction des modalités de la taille du stock 2. . . . .	101

Figure III.4	Évolution des indicateurs de performance choisis au chapitre 4 en fonction des modalités de la taille du stock 3. . . . .	102
Figure III.5	Évolution des indicateurs de performance choisis au chapitre 4 en fonction des modalités du type du stock 1. . . . .	103
Figure III.6	Évolution des indicateurs de performance choisis au chapitre 4 en fonction des modalités du type du stock 2. . . . .	104
Figure III.7	Évolution des indicateurs de performance choisis au chapitre 4 en fonction des modalités du type du stock 3. . . . .	105

**LISTE DES NOTATIONS ET DES SYMBOLES**

- $t_c(n)$ : taux instantané de production de la carrosserie  $c$  après le lancement en production de  $n$  véhicules,  $1 \leq c \leq 10$  et  $1 \leq n \leq 20000$
- $T_c$ : taux théorique de production de la carrosserie  $c$ ,  $1 \leq c \leq 10$
- $s_i$ : taille du stock  $i$ ,  $1 \leq i \leq 3$
- $r_i$ : nombre de rails du stock  $i$ ,  $1 \leq i \leq 3$
- $d_j$ : emploi de la différenciation retardée au point de différenciation  $j$ ,  $1 \leq j \leq 2$

**LISTE DES ANNEXES**

ANNEXE I	MODÉLISATION . . . . .	91
ANNEXE II	INTRODUCTION DE LA DIFFÉRENCIATION RETAR- DÉE . . . . .	94
ANNEXE III	PLAN D'EXPÉRIENCES . . . . .	99
ANNEXE IV	EXEMPLES DE FONCTIONS MATLAB . . . . .	109

## INTRODUCTION

En quelques décennies, les marchés industriels ont fondamentalement changé: ils sont de plus en plus segmentés et turbulents, des incertitudes naissent sur les volumes, la date et l'endroit des commandes. Ils sont devenus globaux, l'unification européenne en est un très bon exemple, avec la libéralisation, l'élimination de barrières dans le domaine des transports, des frontières fiscales. Le développement de l'informatique a également accéléré cette globalisation en permettant un degré de contrôle important sur des chaînes internationales. Cela réduit notamment les coûts de transaction associés aux flux internationaux de produits et accélère la réponse donnée au consommateur. Dans ce contexte, la concurrence étant devenue très rude, la diversité des produits se fait de plus en plus accrue. Le tissu industriel voit donc apparaître le besoin de produire en grande quantité des produits très différents à moindre coût et avec des délais réduits: il s'agit de la personnalisation de masse ou "customisation" de masse.

Dans un contexte de juste-à-temps, les lignes d'assemblage multi-produits (ou à modèles mélangés ou à produits hétérogènes) permettent alors de mieux répondre à la demande diversifiée des clients (en production à la commande) sans avoir de gros inventaires de pièces. Il est important de bien définir le terme de ligne d'assemblage: c'est un ensemble de tâches ou de postes de travail, ayant chacun un temps de fabrication et un ensemble de relations de précédence, qui précise l'ordre permis des différentes tâches. Le coût des installations étant élevé, beaucoup d'entreprises utilisent les lignes multi-produits pour la production de petits lots très diversifiés. Pour éviter un arrêt de la chaîne qui pourrait également coûter très cher, il faut tenir compte des contraintes des ateliers et des différentes gammes (ensemble de processus par lesquels un produit devra obligatoirement être soumis,

contenant également l'ordre dans lequel ils seront effectués) car les procédés peuvent présenter des temps d'exécution différents. Il est donc important de trouver la façon de produire qui satisfait au mieux les capacités de production.

Deux méthodes sont employées: l'équilibrage de ligne et l'ordonnancement. La première rend possible la fabrication des volumes prévisionnels: allouer le travail à effectuer aux différents postes pour que chaque poste ait approximativement la même quantité de travail, prévenir les avaries au niveau de la chaîne et éviter le désamorçage (arrêt de la chaîne) en essayant de ne pas surcharger ni consommer trop d'une pièce particulière. La ligne sera supposée correctement équilibrée dans la suite.

Ce mémoire s'intéressera à la deuxième, l'ordonnancement, qui détermine la séquence des items à produire, en prenant un exemple souvent étudié pour sa complexité: l'usine automobile. Une séquence optimale permet de respecter les contraintes d'usine, de lisser la charge de travail et de synchroniser les flux de constituants. Elle peut s'obtenir de deux manières: par le séquençement, qui détermine globalement la séquence en entrée de la ligne d'assemblage à partir des contraintes de cette dernière, ou par le cadencement, qui permet de réordonner les flux de véhicules à l'aide de stocks entre les différents ateliers, souvent à partir de contraintes considérées localement. Des recherches ont été effectuées en modélisant une chaîne d'assemblage par un séquençement initial, puis des cadencements permettant de satisfaire aux contraintes de l'atelier suivant et d'absorber les perturbations de l'atelier précédent. À cause de l'intervention dans les usines actuelles de la production synchrone, il est intéressant de tenter de retrouver la liste séquencée initiale au niveau d'un dernier stock précédent l'assemblage final. C'est le reséquencement. Mais plutôt que de modifier la séquence d'items le long de la ligne d'assemblage, déterminer les options des items à produire le plus tard possible permet de mieux répondre aux contraintes d'ateliers. Il s'agit de la différenciation retardée. Cette

étude s'inscrit dans ce cadre en étudiant ces divers processus ainsi que leurs interactions. L'objectif est de construire un modèle de simulation d'une chaîne de type automobile puis d'évaluer les améliorations apportées par l'introduction de la différenciation retardée.

Après un état de l'art sur le séquençement et la différenciation retardée dans le chapitre 1, un modèle de simulation d'usine automobile sera présenté au chapitre 2. La construction de ce modèle comprendra la description de chaque atelier ainsi que l'analyse du fonctionnement des différents stocks. Des métriques, des règles de tri et des indicateurs de performance seront également choisis. Le chapitre 3 étudiera ensuite la manière d'introduire la différenciation retardée dans ce contexte et les améliorations qu'elle engendre sur les différents indicateurs. Ce mémoire se conclura dans le chapitre 4 par l'établissement d'un plan d'expériences permettant une analyse poussée de l'influence des variables décisionnelles du problème.

## CHAPITRE 1

### REVUE DE LITTÉRATURE

Dans la littérature relative au séquençement, de nombreuses pistes ont été prises. En considérant que l'ordre des produits reste le même tout au long de la ligne d'assemblage, les premiers articles étudient le séquençement en fonction de différents objectifs. Deux problèmes ont été plus largement étudiés: le premier correspond au nivellement de la charge de travail sur chaque station de la ligne. Il est présenté par Kubiak (1993) comme le problème PRV (Product Rate Variation problem). Cela permet de faire travailler les opérateurs à un rythme constant et ainsi éviter les surcharges, les déficiences dues au travail, l'oisiveté, donc également les délais dans la production et les risques d'arrêt de la ligne. Mais lorsque les taux de production sont différents pour chaque produit, la minimisation de la variation des taux d'utilisation de chaque pièce est souvent recherchée. Ce problème est présenté par Kubiak (1993) comme le problème ORV (Output Rate Variation problem). Il est très important en juste-à-temps. Ces deux problèmes seront traités respectivement en sections 1.1 et 1.2. La section 1.3 présente les autres objectifs qui ont pu être considérés dans le problème de séquençement et la section 1.4 développe un sous-problème particulier, le séquençement de véhicules.

D'autres articles considèrent que l'ordre des produits peut être modifié volontairement pour ordonner les véhicules à l'entrée d'un atelier (cadencement) ou involontairement à cause de perturbations dans un atelier. Ces derniers sont présentés en section 1.5. La section 1.6 parle ensuite de reséquencement. Cet état de l'art s'achèvera par des articles sur la différenciation retardée, aussi bien au niveau d'une chaîne de production en section 1.7 qu'au niveau de la chaîne d'approvisionnement au complet en section 1.8. Quelques alternatives seront présentées en section 1.9.

## 1.1 Le problème PRV

Un premier article écrit par Thomopoulos (1970) prend le cas d'un flow-shop, où des produits différents peuvent passer par des machines différentes. Il montre comment une modification des algorithmes d'équilibrage de ligne d'assemblage multi-produits peut être utilisée de façon à minimiser la perte d'efficacité des opérateurs, de façon à ce qu'ils travaillent à un rythme constant, i.e. en lissant la charge de travail. Il ne présente pas de procédure exacte mais une heuristique utilisant une technique d'agrégation. Il suppose que le nombre de pièces est approximativement constant pour tous les produits. Sans faire cette hypothèse, Kubiak (1993) présente le problème comme la minimisation de la variation des taux de sortie des produits en bout de ligne. C'est le problème PRV. Il en donne une formulation mathématique. Cela permet en fait de synchroniser la production de chaque modèle avec la demande pour ce modèle. Un algorithme très simple pour ce problème est présenté par Ding et al. (1993b).

Pour cette classe de problèmes (NP-difficiles), trois heuristiques sont populaires: les algorithmes génétiques, le recuit simulé (simulated annealing), et la recherche tabou. Bautista et al. (2000) trouvent une équivalence de ce problème PRV avec la recherche d'un chemin minimum dans un graphe. Une solution optimale peut donc être trouvée, mais sur des problèmes de petite taille. De plus, si les nombres de commandes de chaque modèles sont tous divisibles par un même entier  $k > 1$ , ils réduisent le problème en un problème de taille  $k$  fois plus petite. La solution optimale est alors une séquence cyclique présentant  $k$  fois la séquence optimale du sous-problème. Karabati et al. (2003) reprennent cette approche cyclique en étudiant l'objectif de minimiser le temps de sous-cycle maximum et fournissent une heuristique correspondante. Leurs solutions sont bonnes mais nécessitent un coût CPU plus élevé que les heuristiques précédentes. Beaty (1992) présente un emploi

efficace des algorithmes génétiques dans le domaine.

## 1.2 Le problème ORV

Monden (1983) a introduit un deuxième problème primordial dans un environnement de juste-à-temps. L'objectif est de garder un taux d'utilisation de chaque pièce constant. C'est le problème de Monden. Il introduit une heuristique goal-chasing, de construction progressive à partir de ses observations chez Toyota. Miltenburg (1989) donne deux heuristiques pour la résolution du problème en supposant que les produits ont approximativement le même nombre de pièces. Mais cette résolution est lente pour des problèmes de grande taille. C'est le premier qui introduit le problème de programmation entière non linéaire avec l'objectif de minimiser la déviation totale des taux de production actuels par rapport aux taux théoriques. Ce problème est également reformulé par Kubiak (1993) en problème ORV.

Inman et al. (1992) reprennent ce travail en l'élargissant au cas de plusieurs niveaux de nomenclature et fournissent une heuristique "quick and dirty", avec une formulation de date d'exigibilité au plus tôt, qui s'avère meilleure et bien plus rapide que celles de Miltenburg (1989). L'objectif de garder un taux d'utilisation de chaque pièce constant est redéfini en: maintenir un intervalle constant entre l'utilisation des différentes pièces. Ils introduisent également l'idée de réduire la taille du problème en décomposant en plusieurs cycles de taille identique. Cet article ouvre la voie vers l'étude de l'ordonnancement à l'aide de pénalités pour à la fois les produits en retard et ceux en avance (pour plus de détails, Ghosh et al. (1989) donnent une revue de littérature sur l'équilibrage de chaîne en 1989 avec un point de vue à la fois qualitatif et quantitatif, pour les chaînes à produit unique ou

multi-produit, au niveau stratégique et tactique et avec des modèles déterministes ou stochastiques).

Ding et al. (1993a) présentent une procédure heuristique plus simple que Miltenburg (1989). Puis Korkmaz et al. (2001) fournissent une autre heuristique, issue de celle de Ding et al., encore plus simple et plus performante. Ces derniers étudient également deux objectifs simultanément en introduisant des pondérations: niveler la charge sur chaque station de travail et garder un taux d'utilisation de chaque pièce constant. Une solution optimale est fournie pour des problèmes de petite taille. Après simulation avec cette nouvelle heuristique et ce nouvel objectif, ils se rendent compte que dans le cas où la chaîne est de petite longueur et la variabilité des temps de processus est élevée, l'objectif de nivellement de la charge de travail vaut aussi la peine d'être considéré.

Pour leur part, Bautista et al. (1996) montrent que la méthode de goal-chasing utilisée dans le problème de Monden (1983) est myope car chaque itération ne prend en compte que les résultats de l'itération précédente. Ils fournissent une heuristique améliorée basée sur la programmation dynamique. Le problème est associé à un graphe dont le chemin minimum est recherché. Les simplifications apportées à l'heuristique sont par exemple l'utilisation de la symétrie du graphe et l'élargissement de l'horizon pour que les conséquences soient prises en compte à plus long terme.

### **1.3 Autres objectifs de séquençement employés**

En plus de niveler la charge de travail et de garder un taux d'utilisation des pièces constant, Hyun et al. (1998) introduisent un troisième objectif: minimiser le temps

de mise en course (“setup time”) dû aux changements de types d’unités produites. Les trois objectifs sont considérés simultanément. Ils fournissent un algorithme génétique qui mène à un ensemble d’optima de Pareto. Cela est satisfaisant étant donné que les objectifs peuvent entrer en conflit. Pour le même problème, Kim et al. (2003) présentent une heuristique de recuit simulé donnant de bonnes solutions.

D’autres objectifs ont également déjà été traités. Duplaga et al. (1996) décrivent une approche de séquençement d’une usine multi-produits utilisée par Hyundai Motor Company: étant données les commandes à produire pour une journée, déterminer la séquence de lancement de façon à niveler la demande de composants et minimiser les délais. L’heuristique employée est une version simplifiée du goal-chasing employé chez Toyota (cf Monden (1983)). Il est intéressant de noter que la séquence n’est jamais exécutée dans l’ordre requis pour bon nombre de raisons comme par exemple le manque de capacité dans l’aire de stockage disponible pour mettre en place une telle séquence. La séquence doit aussi souvent être modifiée (voir 2.7). À cause de toutes ces conditions, Hyundai peut avoir à faire face à 15% de modifications dans la séquence. Cet article montre également qu’il est impossible de trouver une solution optimale au problème cité.

Kotani et al. (2004) traitent aussi un problème précis de séquençement: une ligne d’assemblage multi-modèles de Toyota Motor Corporation. Ce problème présente deux buts: garder un taux constant d’utilisation des pièces dans chaque station de travail et minimiser le temps total d’arrêt de la chaîne. Chaque opérateur ayant une zone limitée de travail, lorsqu’un opérateur pense ne pas avoir le temps d’effectuer les opérations qui lui sont affectées, il appelle un opérateur auxiliaire pour l’assister. S’ils n’arrivent pas à finir le processus à deux, la ligne s’arrête. Ils introduisent une modélisation mathématique poussée de tous les processus et opérateurs ainsi qu’une méthode de recuit simulé correspondante à ce problème.

## 1.4 Le problème de séquençement automobile

L'usine automobile présente des procédés d'une grande complexité. Elle fait apparaître un sous-problème particulier appelé le problème de séquençement automobile ("Car Sequencing Problem"). Cette section s'intéresse aux articles consacrés à ce problème. Ils traitent de chaînes de montage multi-modèles où les temps des process sont déterministes. Ils prennent en compte les contraintes des ateliers de montage comme précédemment, mais en plus des contraintes d'ateliers comme la peinture ou le ferrage, antagonistes à celles du montage. Ce problème a été introduit par Parrelo et al. (1986) (ils ont également formulé les contraintes d'espacement de montage en termes de ratios). Les deux objectifs cités précédemment (parties 1.1 et 1.2) ainsi que le regroupement des véhicules en rafales pour la peinture et le ferrage sont alors traités simultanément. Kis (2004) donne une preuve que ce problème est de classe non polynômiale.

### 1.4.1 Séquençement d'une ligne d'assemblage

Bolat (1994) s'attaque au séquençement journalier. Il modélise une chaîne d'assemblage automobile, sans stock tampon entre les différents postes de travail, sous la forme de trois ateliers: le ferrage, la peinture et le montage. Chaque modèle ne subit pas les mêmes procédés de fabrication (il peut y avoir beaucoup de nomenclatures différentes), mais ils sont tous de même durée: il suppose que la durée des processus dans l'atelier de carrosserie est indépendante du type de carrosserie. Le temps qu'un véhicule passe dans les ateliers de peinture est également supposé indépendant de la couleur de cette dernière. Il y a par contre des coûts de changement de carrosserie ou de couleur de peinture dûs aux changements d'outils et aux purges des tuyaux dans le cas de la peinture. Si un opérateur n'a pas le temps de

finir son travail dans le temps imparti, un autre opérateur est également appelé pour le finir. Dans ce cadre, l'auteur propose deux heuristiques prenant en compte l'atelier de peinture, son but étant de minimiser le coût total (coûts de mise en place et coûts de production). Giard et al. (2004a) traitent également ce problème et donnent une très bonne revue de littérature du problème de séquençement. Ils modélisent l'appel d'un opérateur supplémentaire lorsque le travail ne peut être effectué. Ils font notamment la distinction entre des postes capacitaires (dont les contraintes peuvent être violées avec un certain coût) et non capacitaires. Le modèle linéaire obtenu permet une description rigoureuse, explicite et très générale du problème de séquençement de véhicules.

Bergen et al. (2001) étudient un problème rencontré dans une usine automobile d'Amérique du Nord dont le séquençement est décidé une fois par mois. Ils considèrent aussi des contraintes soit violables avec un certain coût soit inviolables. Elles sont quasiment exhaustives et prennent en compte des considérations de distribution, de date d'exigibilité, d'approvisionnement et de production au niveau journalier et mensuel. Le problème de séquençement se réduit à des lots de taille inférieure à 60. Trois algorithmes d'approximation sont présentés: un de recherche locale, un autre de recherche par retour arrière (recherche qui consiste, lorsqu'un choix fait à un certain nœud conduit à un résultat inacceptable, à revenir au nœud d'origine pour faire un autre choix) avec relaxation des contraintes, et un dernier de graphes binaires ("branch and bound"). Ces derniers sont testés sur six problèmes réels avec pour indice de performance une pénalité totale due à des violations de contraintes douces. Le dernier s'avère le meilleur.

D'un point de vue plus global, certains articles développent le séquençement avec une répartition des ordres de commande dans plusieurs journées ou plusieurs usines. Ils sont développés dans la section suivante.

### 1.4.2 Séquencement à plus grande échelle

Nguyen (2004) présente la problématique associée à la planification et à l'ordonnancement de la production dans les usines de carrosserie-montage de Renault. Il prend en compte les contraintes de respect de la capacité des fournisseurs, de limitation des modifications de l'ordre des véhicules lancés en production d'un jour à l'autre et d'optimisation des coûts des différents ateliers, en respectant une longueur maximale de rafale pour les ateliers où intervient l'objectif de regroupement et le besoin d'écartement pour le montage (éviter que telle option ne soit présente plus de  $n$  fois dans toute sous-séquence de  $m$  véhicules ( $n < m$ )). Les véhicules sont tout d'abord placés dans une journée de fabrication par programmation linéaire continue sous CPLEX 7.5. Chaque journée est ensuite ordonnancée grâce à un algorithme de recuit simulé. Ce travail a été poussé par Hindi et al. (1994). Ils cherchent comment choisir, parmi les commandes, un ensemble de véhicules à produire dans une période de planification, pour ensuite séquencer les véhicules de cette période. Dans le même ordre d'idée, Hennet et al. (1996) donnent un cadre de travail à la répartition de la production entre différentes usines pour aider les concessionnaires à donner des réponses fermes aux consommateurs (dans la plupart des cas, plusieurs usines peuvent produire des véhicules identiques: 5 usines différentes produisent la Clio chez Renault par exemple). Ils s'attachent à trouver des règles de décision en temps réel pour le séquencement: un concessionnaire pouvant commander un véhicule à chaque instant, trouver le séquencement optimal est impossible, cet article essaye alors de trouver une solution satisfaisante à l'aide d'un algorithme de recherche simple. Les contraintes entrant en jeu sont à la fois des contraintes liées aux fournisseurs, ces derniers jouant un rôle important (2/3 du coût d'une voiture est dû à des éléments externalisés, produits par les fournisseurs), et des contraintes d'assemblage, comme les règles d'espacement de certaines options. Les auteurs invitent également à concevoir le système productif

comme un réseau coopératif multi-agent dont l'architecture serait centrée sur une base de données à laquelle tous les acteurs pourraient avoir accès.

Des petites variations sur la durée des processus sont ensuite introduites par So (1990). Elles peuvent créer des problèmes à l'assemblage. Il développe une étude d'absorption de ces variations dans la chaîne: il regarde l'effet de différentes stratégies de gestion des stocks tampons (séparant deux ateliers) sur la performance des lignes d'assemblage. Les critères de performance employés sont le taux de production et l'inventaire total dans le système. Le modèle considère  $N$  stations de travail par lesquelles les unités produites passent dans le même ordre. Les temps de service sont indépendants et identiquement distribués. Trois modes de gestion du stock d'en-cours sont alors étudiés. Premièrement, la ligne inflexible: le stock tampon devant chaque machine a une capacité limitée. Lorsque cette dernière est atteinte, une unité qui aurait fini son processus sur la machine précédente doit alors rester sur la machine jusqu'à ce qu'une place se libère dans le stock. Deuxièmement, la ligne localement flexible: le stock au niveau de chaque machine est décomposé entre une partie de stock à l'entrée et l'autre partie à la sortie, la taille totale étant limitée. Dernièrement, la ligne globalement flexible limite le nombre total d'éléments dans le système mais ne pose pas de limite au niveau de chaque poste de travail. Il est prouvé analytiquement que cette dernière méthode présente un taux de sortie des unités produites plus élevé. Une simulation montre par contre que la deuxième méthode de gestion des en-cours est la meilleure au regard des deux critères de performance choisis ici.

Un autre moyen de limiter les effets de variation de la chaîne peut être d'introduire une ligne de dérivation. Tamura et al. (1999) s'intéressent à un problème de séquençement dans de telles conditions (produits multiples avec un objectif semblable à celui de Korkmazel (2001)). Deux heuristiques, une de type goal-chasing

et l'autre de type recherche tabou sont présentées.

### 1.5 Le cadencement

Cette section introduit une dimension supplémentaire: l'ordre de production des différents items n'est pas constant tout au long de la chaîne. Il y a deux possibilités. Soit il s'agit d'une modification volontaire entre deux ateliers pour satisfaire les contraintes de l'atelier aval. Soit il s'agit d'une perturbation au niveau d'un atelier. Ces perturbations peuvent avoir différentes origines:

- un défaut de qualité (une pièce défectueuse ou des travaux mal effectués),
- un manque de temps,
- un composant non disponible (à cause d'un fournisseur, si une livraison n'a pas eu lieu, si le besoin a mal été évalué, ou si le produit est en avance à cause de la prise de retard d'autres produits le précédant ou à cause de vitesses différentes entre deux ateliers),
- une panne de process.

Elles peuvent créer de nombreux problèmes sur la ligne, notamment un arrêt de la production. Pour réapprovisionner un constituant manquant, la décision peut alors être prise de retoucher le véhicule en bout de ligne ou même affréter un hélicoptère pour le réapprovisionnement, ce qui coûte cher. Il faut s'attaquer au problème à la racine en améliorant les processus (méthode  $6\sigma$  par exemple), éliminer les défauts rencontrés. Mais l'élimination de ces perturbations est difficile. Pour les limiter, il est possible de choisir de modifier l'ordre initial: modifier la séquence de production devant certains ateliers. Il s'agit du cadencement (ou pré-séquencement). Par

exemple Guerre-Chaley et al. (1995) modélisent la production de véhicules d'une usine Citroën, figure 1.1.

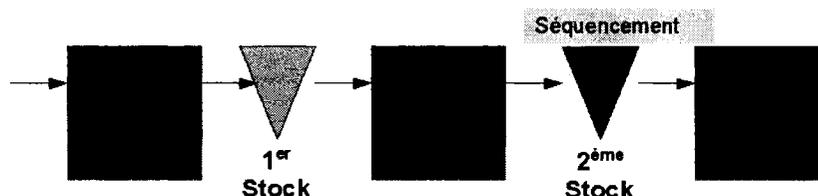


Figure 1.1: Modélisation d'une chaîne automobile par Guerre-Chaley et al. (1995).

Les véhicules sont pré-séquencés avant la soudure, puis il y a entre les ateliers des stocks tampons permettant de changer l'ordre des véhicules d'un atelier à l'autre. Celui entre la soudure et la peinture permet d'atténuer les différences de vitesses entre les deux ateliers; celui entre la peinture et le montage permet d'ordonner les véhicules pour minimiser la violation de contraintes de montage et maximiser le nombre de véhicules arrivant le jour prévu de production. Ceci est formalisé mathématiquement en une minimisation de coûts de la séquence de production. Le coût est décomposé en une partie liée à la date d'exigibilité et l'autre à la violation de contraintes. Un algorithme de séquencement est étudié par simulation à partir de données réelles. Le véhicule qui a le coût minimum est envoyé à l'atelier de montage. Ce dernier s'avère meilleur que les règles de séquencement actuellement employées en usine.

L'article de Danjou et al. (1999a) présente une méthodologie générale d'analyse de la robustesse de ce type de lignes de production avec des données de Renault, i.e. une étude de sensibilité aux caractéristiques du module de réordonnement d'un stock de tri: ils construisent notamment un outil d'analyse qui aide à la définition du problème et permet d'obtenir un réordonnement conforme aux règles employées chez Renault, et ceci grâce à la simulation. Les approches stochastiques et déterministes de l'ordonnement sont également présentées brièvement. Danjou

et al. (1999b) calculent aussi la distribution de probabilité du nombre de places perdues pour un véhicule quelconque en fonction de la probabilité qu'un véhicule prenne un retard donné, en prenant en compte la possibilité de retouches multiples.

Joly et al. (2004) s'intéressent aussi à la gestion des aléas en usine automobile. Ils étudient les conséquences d'un blocage de certains véhicules et proposent des méthodes pour calculer le dimensionnement des stocks et les besoins de flexibilité. Comme précédemment, deux éléments peuvent modifier la liste initiale: les réordonnancements (cadencements) effectués pour mieux répondre aux contraintes d'un atelier en aval dans la ligne ou pour rattraper les perturbations d'un atelier en amont. Dans ce modèle, les ordres de fabrication sont bloqués de façon temporaire. S'accumulent alors des ordres de fabrication d'attributs communs (ces attributs peuvent être un ensemble de plusieurs composants). Le problème intervient avec les contraintes de cadencement lorsqu'il s'agit de relancer ces ordres en production. Un déblocage est effectué en augmentant temporairement le potentiel de fabrication et en appliquant un filtre qui permet de reséquencez les véhicules encore à produire. L'objectif est alors d'analyser les conséquences en terme d'avance et de retard de façon analytique puis simulateur. Les deux cas où la répartition des attributs est homogène ou aléatoire sont étudiés. Les conséquences observées permettent une meilleure gestion de la flexibilité par une augmentation mesurée de potentiel.

Pour leur part, Lahmar et al. (2003) considèrent un problème de reséquencez rencontré dans une usine de camions Ford. Ils étudient l'influence d'un stock tampon de taille 1 (pull-off table), puis de  $N$  stocks identiques de taille 1 de façon itérative (avec CPLEX 6.5). Ils fournissent un algorithme qui s'avère optimal dans le cas d'une seule table. Lahmar et al. (2004) généralisent ensuite en considérant le problème de reséquencez avec une flexibilité limitée et des coûts de change-

ments dépendants de la séquence. Ils décrivent également une famille d’heuristiques de décomposition (décomposant en plusieurs problèmes plus petits) qui donne une borne supérieure à la solution optimale.

## 1.6 Le reséquencement

Avec l’idée du cadencement naît un autre concept, le reséquencement. Il permet en fin de ligne d’assemblage de minimiser les modifications de séquences qui ont eu lieu tout au long de la ligne. Cette section présente quelques travaux sur le sujet.

### 1.6.1 Étude des stocks tampons

Les thèses de Baratou (1998) et Bernier (2000) développent une étude poussée des stocks tampons précédant des ateliers. Ils modélisent une chaîne d’assemblage automobile d’un constructeur comme sur la figure 1.2. Trois ateliers sont encore considérés: dans l’ordre le ferrage, la peinture et le montage.

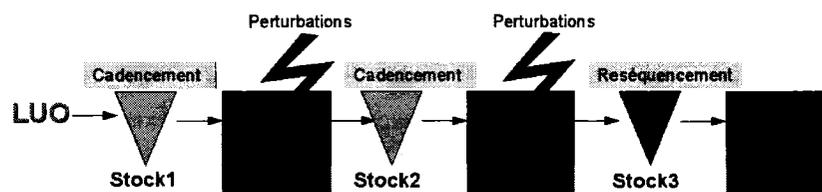


Figure 1.2: Modélisation d’une chaîne d’assemblage par Bernier (2000) et Baratou (1998).

Les stocks tampons avant le ferrage et la peinture permettent de cadencer la séquence de production en fonction des contraintes de l’atelier directement en aval, alors que le stock précédant l’atelier de montage tente de reséquenceur celle-ci, c’est-à-dire la réordonner pour retrouver la liste initiale, la liste unique ordonnancée (LUO). Baratou propose une méthode combinée de recuit simulé et de recherche

par faisceaux adaptée au séquençement dans des environnements de recherche chaotiques. Cet algorithme a été employé chez un constructeur automobile et a permis de nombreuses améliorations dans la gestion des stocks.

Baratou présente également une étude de l'organisation des stocks tampons à accès direct et à tiroirs (la différence entre les deux types de stocks est présentée en 2.5) pour l'implantation dans une usine particulière. Il détaille un parcours d'arbre en profondeur pour le cadencement et introduit la notion de métrique de séquence permettant de choisir le véhicule à lancer de façon prioritaire. Ces méthodes d'optimisation ont finalement été appliquées industriellement.

Bernier développe la question de la reséquançabilité: quelles libertés est-il possible de prendre pour optimiser localement la séquence tout en permettant de retrouver en bout de ligne l'objectif fixé? Sa simulation d'une usine sans contraintes montre qu'il n'est pas possible de retrouver la liste initiale, il faut alors redéfinir l'objectif de reséquançabilité d'une manière plus permissive avec une avance maximale à ne pas dépasser et un retard maximal pouvant être dépassé jusqu'à un pourcentage donné de véhicules. Il faut aussi calculer les fenêtres concernant la taille des stocks de cadencement à respecter, en fonction des autres stocks et des perturbations. Il faut trouver un équilibre entre le respect des contraintes d'atelier et la remise en ordre de la liste initiale.

Il propose deux indicateurs de mesure des perturbations: le premier donne les retards (respectivement les avances) à  $x\%$ , qui correspondent au retard (resp. avance) maximal(e) des  $x\%$  de véhicules les moins en retard (resp. avance) en différents points de la ligne (entrée et sortie de chaque atelier). Le deuxième donne le respect de la liste unique ordonnancée initiale (LUO) à  $\pm n$  places (en pourcentage) en un point donné. Le détails de ces deux indicateurs est donné dans les sections 2.2.1 et 2.2.2.

Après l'étude de cas théoriques, il étudie la mise en œuvre dans une usine termi-

nale en simulant cette dernière avec contraintes. La méthode proposée permet bien, dans ce cas précis, de trouver les conditions qui permettent le respect de l'objectif de reséquenceabilité défini précédemment.

Maloney (2002) présente un exemple de réussite de l'implantation d'un stock tampon, un système de stockage automatisé entre l'atelier de peinture et le montage permettant à Ford un reséquencement efficace des véhicules, qui a libéré beaucoup de place dans l'usine, accru la flexibilité des fournisseurs et stabilisé la chaîne dans son ensemble. Le système peut contenir plusieurs heures de production.

### **1.6.2 Indices de priorité**

Pour déterminer la priorité à donner à certains items dans un stock de cadencement, la présence de coûts de changements peut dans certains cas créer un phénomène d'hystérésis. L'utilisation de deux indices de priorité est donc obligatoire. Dusonchet et al. (2004) traitent un autre problème dans ce contexte: le problème des bandits manchots agités (ordonnancement d'une ligne de production flexible où les stocks et les commandes en attentes sont les seuls paramètres à varier dans le temps). Ils essayent de déterminer l'ordonnancement optimal de projets indépendants avec une dynamique et une structure de coûts instantanés (évolution permanente de l'état de stock et des demandes en attente). Tout au long de la chaîne l'ordre des produits est le même. Il s'agit de trouver cet ordre de façon à minimiser le coût total, ce dernier prenant en compte le coût de stockage, de retard de livraison et de changement de type de produit. Ils proposent une heuristique correspondant à leur modèle.

Danjou et al. (1999c) s'intéressent plus en détail au problème de la variabilité d'un indicateur de performance, l'indicateur de respect de la liste initiale dans le

cas d'un modèle de chaîne automobile avec des stocks tampons qui ne sont pas employés pour un quelconque reséquencement (ils permettent ici d'éviter un arrêt de la ligne d'assemblage (décyclage) en absorbant les variations des taux de sortie).

Dans tous les articles qui précèdent, les produits sont définis avant leur entrée au niveau du premier stock. Mais il est possible de les définir au fur et à mesure de la ligne. En utilisant des pièces communes à différentes gammes de fabrication, des produits peuvent être identiques en début de ligne. Leurs options sont ensuite définies en leur ajoutant des pièces différentes. Les endroits où sont déterminées les différentes options de chaque item sont appelés points de différenciation. Si ces points sont descendus le plus possible en aval dans la ligne d'assemblage, le terme employé est la différenciation retardée. Il y a trois types de différenciation retardée: le "time postponement" qui retarde le lancement de la fabrication des produits jusqu'à l'arrivée de l'ordre de commande, le "place postponement" qui est le stockage de produits finis au niveau de la distribution jusqu'à la réception de l'ordre de commande, et le "form postponement" qui retarde certaines étapes de la fabrication jusqu'à l'arrivée de l'ordre de commande ("form" faisant référence aux activités qui déterminent la forme et la fonction de chaque produit). Les deux premiers sont appelés le "logistics postponement" et les trois réunis le "postponed manufacturing".

Ces principes permettent d'accroître la flexibilité et de raccourcir le temps de commande. En réduisant la variété des composants et des procédés, les coûts sont diminués: innover et adapter chaque produit aux besoins spécifiques de chaque client sont possibles sans trop diversifier les processus de fabrication. Ce concept est en rupture avec le précédent dilemme "petit volume et grande diversité" ou "grand volume et petite diversité". Il a été introduit dans la littérature en 1950 par Alderson (1950) et s'inscrit pleinement dans la personnalisation de masse, mais

le début de son emploi remonte aux années 1920. Une brève revue de littérature est présentée dans les sections 1.7 et 1.8.

## **1.7 Différenciation retardée au niveau de l'entreprise**

### **1.7.1 À l'échelle globale**

Une première réflexion a été fournie par Bucklin (1965). Il regarde notamment les effets sur le réseau de distribution de la différenciation retardée. D'une façon générale également, Van Hoek et al. (1999a) explicitent les capacités stratégiques, i.e. à long terme, nécessaires à la réalisation de la personnalisation de masse. La différenciation retardée est présentée comme un outil de marketing, de fabrication et de logistique permettant de créer un environnement opérationnel et d'accroître les capacités d'une entreprise. Mais il s'avère toujours difficile d'établir au niveau d'un point de différenciation un équilibre entre les activités amont gérées en production de masse et les activités en aval différées. Une analyse de données empiriques fournit une étude descriptive de ces capacités; la différence entre les entreprises européennes et américaines est par exemple étudiée. Van Hoek et al. détaillent aussi dans (1999b) les processus de changement de management associés à une stratégie d'implémentation. Ils développent des outils qui permettent aux dirigeants de déterminer la faisabilité de la différenciation retardée dans leur entreprise. L'étude de 4 cas réels est fournie et mène à la conclusion que la différenciation retardée ne doit pas être un but en elle-même, mais doit permettre d'étendre la "customisation" des produits pour répondre à une demande du marché. Il s'agit de trouver le bon mélange de différenciation retardée et de production standardisée. L'importance relative de la différenciation retardée par rapport aux autres pratiques en management de chaînes d'approvisionnement est également développée par Li et al. dans

(2005). Mais la question de savoir si l'on doit implanter ou non la différenciation retardée n'est pas résolue. D'autres articles s'y sont attelés.

Bullock (2002) donne un canevas pour la compréhension et l'implémentation de la différenciation retardée. Il distingue notamment quatre stratégies: la spéculation totale, la différenciation retardée logistique, la différenciation retardée de fabrication, et la différenciation retardée totale. Il présente également les facteurs qui peuvent influencer la pertinence de la différenciation retardée, à savoir la stabilité de la demande, le prix de vente, les coûts de fabrication, de transport ou d'inventaire, les services offerts, le temps de vie, le design ou le temps de cycle des divers composants. En pratique, des changements opérationnels massifs seraient indispensables en vue d'une telle implantation. Pour cette raison, et parce que les économies d'échelles jouent encore un grand rôle dans le processus de fabrication de bon nombre de constructeurs automobiles, la spéculation est encore préférée à la différenciation retardée totale qui serait plus profitable. Aujourd'hui, Ford et GM développent des stratégies de "fabrication à la commande virtuelle", voir 1.9. C'est un moyen pour eux d'améliorer leur compétitivité, bien que l'idéal serait plutôt d'abandonner la production de masse pour implanter le lean manufacturing de façon complète (voir le livre de Womack et al. (1990)).

Des articles développent ensuite également les bénéfices apportés au sein d'une usine par l'implémentation de la différenciation retardée.

### **1.7.2 À l'échelle locale**

Un des bénéfices les plus importants est de minimiser le nombre total de constituants et donc les stocks de composants aux abords des ateliers. Il est intéressant de créer des familles de produits qui partagent des composants ou des procédés

communs.

Lee et al. (1997) introduisent une réflexion sur les coûts et les bénéfices de l'intégration du design dans un contexte de différenciation retardée. À partir de leur modèle, ils analysent quelques cas particuliers fondés sur des cas réels. Swaminathan et al. (1999) présentent ensuite un modèle permettant de quantifier les bénéfices opérationnels apportés par l'intégration du design et des opérations. Leur but est de concevoir une séquence d'assemblage d'un produit et de déterminer le type et le niveau d'inventaire de produits semi-finis permettant la différenciation retardée. Les résultats montrent qu'augmenter le nombre d'options différentes sur un nombre plus restreint de caractéristiques et les séquencer à partir de la variation de la demande peut être bénéfique au manufacturier en termes de coûts de design et coûts opérationnels.

Mis à part la diminution du nombre total de constituants aux abords de la ligne d'assemblage, la différenciation retardée permet également de minimiser les délais. Dans l'article (2002a), Agard et al. s'attachent à retarder le point de différenciation d'un produit à forte diversité. Trois facteurs peuvent être influents dans cette recherche: la standardisation, la conception modulaire (qui prône le développement et la fabrication des différents modules indépendamment et ensuite leur assemblage) et la restructuration des procédés de fabrication. Ils présentent l'exemple d'un faisceau électrique avec un algorithme permettant d'établir une décomposition en modules et d'obtenir une forte diminution de temps d'assemblage total (des développements subsidiaires sur la gestion de la diversité et sur le compromis nécessaire entre la standardisation et la différenciation sont disponibles dans la thèse de Agard (2002b) pour des faisceaux électriques).

Pour ce qui est de la standardisation plus précisément, Ma et al. (2002) introduisent un modèle d'optimisation d'assemblage de  $m$  produits en  $n$  étapes avec

une demande aléatoire. De façon générale, grâce à une quantification des bénéfices en termes de coûts, l'utilisation de composants standardisés est préférée le plus en amont de l'assemblage. Ramdas et al. (2004) invitent à regarder au delà des économies de coûts et d'inventaires, et de considérer la qualité du produit qui peut apporter d'autres bénéfices. Lorsqu'une pièce est fabriquée expressément pour un produit, la fiabilité est meilleure. Moins de retours de produits et une meilleure satisfaction des clients sont observés. Le partage de composants n'est donc pas forcément une stratégie effective.

La question d'évaluer les chaînes d'assemblage s'est posée depuis le début. Elle va être détaillée dans le contexte de la différenciation retardée.

### **1.7.3 Évaluation de la différenciation retardée**

Dans un modèle statistique avec des taux d'arrivées de commandes et des taux de traitement (temps entre deux lancements en production) de type markoviens tout d'abord puis suivant une loi générale, Su et al. (2005) montrent que le "time postponement" donne de meilleurs résultats que le "form postponement", qui est meilleur pour sa part si le nombre de produits est élevé. Les critères de performance choisis dans cette étude sont le temps d'attente du consommateur et le coût total comprenant les coûts fixes d'amortissement, les coûts de fabrication et les coûts de stockage des produits en-cours. Pour le nombre de produits différents par exemple, il existe un seuil au-dessus duquel le "time postponement" est meilleur eu égard aux deux critères de performance.

Ernst et al. (2000) introduisent un cadre conceptuel d'évaluation des chaînes d'assemblage dans le contexte de la conception modulaire et de la différenciation retardée. Ils associent la conception modulaire à la logistique de production et

la différenciation retardée à la logistique de distribution car elle permet de satisfaire la demande du marché. Ils quantifient l'impact économique de l'emploi des

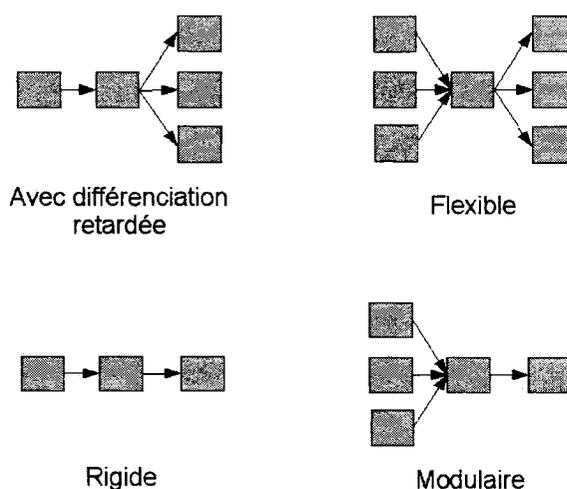


Figure 1.3: Agencement d'ateliers en fonction de différentes structures de chaînes d'assemblage.

différentes structures: le niveau de service est le meilleur dans la structure rigide, mais que la structure flexible entraîne un coût minimum. L'intégration verticale n'est par exemple pas toujours souhaitable mais la décision d'adopter une structure donnée dépend également de facteurs non inclus dans cette étude. Beamon (1999) développe également une étude des limites des différentes mesures de la performance d'une chaîne d'approvisionnement, puis un canevas pour leur sélection.

### 1.8 Différenciation retardée au niveau de la chaîne de distribution

Il n'est pas totalement efficace aujourd'hui d'optimiser une usine si les fournisseurs ou les distributeurs ont une politique de gestion totalement différente. Il est important de considérer la chaîne d'approvisionnement dans son ensemble, notamment pour l'emploi de la différenciation retardée. Si toutes les industries automobiles suivaient les principes du lean manufacturing, les relations avec les four-

nisseurs évolueraient vers une plus grande confiance mutuelle permettant un gain réciproque. Malheureusement beaucoup d'entreprises fonctionnent encore en production de masse à flux tiré. Ils tentent tout de même d'améliorer le fonctionnement de leur chaîne de distribution.

Garg et al. (1997) étudient l'impact de la différenciation retardée sur un système de distribution à 3 niveaux. Ils déterminent pour les modèles proposés quel point de différenciation retarder pour minimiser l'inventaire de produits finis, considéré comme le seul inventaire du système. Les résultats indiquent que la variance de la demande et les longueurs relatives des temps de cycles jouent un rôle important dans ce choix. Les modèles présentés ont des limitations. La demande est distribuée de façon normale avec des arrivées indépendantes et identiquement distribuées, le temps total de fabrication d'un produit est une constante et il faudrait incorporer d'autres coûts que l'inventaire (coûts de conception, de production, de transport et de distribution...).

Krajewski et al. (2004) présentent une étude de quelques cas traitant de la relation entre un fabricant d'ordinateurs portables et ses fournisseurs. Ils développent les stratégies de réponse des fournisseurs à une variation à court terme de la demande du fabricant: imposer de façon contractuelle une variation maximale de cette demande, développer leur capacité de flexibilité ou choisir leur niveau de différenciation retardée. Deux stratégies de réaction apparaissent: les fournisseurs avec un revenu annuel élevé et avec des composants complexes utilisent une politique de réduction de l'incertitude, d'où un degré élevé de restrictions et des révisions de plan de production peu fréquentes; les fournisseurs à faible revenu annuel produisant des composants de faible valeur font face aux variations des demandes et mettent l'accent sur des contrats flexibles avec des révisions d'ordres de commande fréquents. Malgré les analyses croisées des différents cas, le petit

nombre d'entreprises étudiées ne permet évidemment pas une analyse statistique complète.

Dans le même ordre d'idée, l'article de Giard et al. (2004b) traite de la synchronisation des processus productifs dans une chaîne logistique. Il s'agit de la coordination en temps réel du fonctionnement de plusieurs systèmes comme l'arrivée d'un véhicule en même temps que ses sous-éléments sur la chaîne de montage: il s'agit de l'approvisionnement synchrone. Pour améliorer l'efficacité de réponse à la forte variabilité de la demande, une production synchrone peut aussi être mise en œuvre. Cela permet également de réduire le temps entre la prise de commande et la livraison d'un produit. Le fournisseur reçoit quelques dizaines d'heures en avance les informations lui permettant de produire ce qui est demandé. Ceci est encore amélioré grâce à la modification du point de pénétration de commande en différenciation retardée. C'est ce qui se passe pour l'affectation d'un véhicule à une certaine commande. Cet article traite également de quelques implications du positionnement du point de pénétration de commande et de son déplacement dans une approche d'approvisionnement ou de production synchrones.

### **1.9 Alternatives et perspectives**

Bien qu'étudiée dans la littérature depuis plusieurs décennies, la différenciation retardée a encore du mal à s'imposer dans certaines industries. Peut-être parce que sa connaissance est incomplète ou que beaucoup d'entreprises fonctionnent encore en production de masse.

Van Hoek (2001) donne une classification très détaillée des travaux sur la différenciation retardée. Il tente d'établir la connaissance exacte dans ce domaine pour se

rendre compte de la perspicacité de chaque article. La classification permet alors d'identifier ce qui a déjà été effectué et les domaines qu'il reste à approfondir. Une méthode d'intégration des nouvelles découvertes est également présentée.

Yang (2001) propose pour sa part un canevas pour la recherche future sur la différenciation retardée comme élément d'une stratégie globale. Le marché actuel étant plus dynamique, plus global et dirigé par le consommateur, l'incertitude de la demande est un facteur important à considérer. L'enjeu est une gestion plus simple: prévoir facilement une demande globale et utiliser des informations plus précises à l'échelle locale dans le délai d'assemblage final, permettant une meilleure réponse aux demandes. Il est même possible que l'entreprise se concentre sur ses compétences fondamentales et sous-traite cet assemblage final pour une meilleure qualité de service.

Pour finir, Brabazon et al. (2004) introduisent la notion de fabrication à la commande virtuelle pour permettre de développer la flexibilité des processus sans considérer d'inventaire supplémentaire: dans une usine, un ensemble de véhicules est donc lancé en production. Le consommateur peut voir sur internet si le véhicule de son choix est disponible quelquepart dans la chaîne logistique, soit en cours de fabrication, soit chez un revendeur. Il est ensuite possible de reconfigurer un item donné en cours de production pour limiter les différences avec les besoins des consommateurs (on peut même revenir sur certaines opérations déjà terminées). Ceci peut être effectué tout au long de la chaîne avec des coûts croissants avec l'avancée du produit sur la chaîne. Ce principe est alors digne d'intérêt lorsque les produits sont nombreux et peuvent être stockés ou présentent un temps de fabrication court. Il a été supposé dans cette étude que les consommateurs ne tolèrent aucun compromis quant aux spécifications de leur commande.

Agrawal et al. (2001) reviennent sur le problème de l'implantation de la "customisation" de masse. Les compagnies automobiles de nos jours ont une attirance vers la fabrication à la commande mais son implantation reste faible: 19% des véhicules vendus en Europe et 7% aux USA. Des deux côtés de l'Atlantique, ils pensent qu'ils pourraient augmenter le prix de vente avec cette méthode (le consommateur ne faisant pas de compromis entre les options qu'il désire et les véhicules disponibles au plus vite, il est prêt à payer plus cher) et diminuer les coûts. Si plus de la moitié des véhicules correspondaient à une commande spéciale, cet article estime que 70% du capital perdu pourrait être récupéré, soit un total de plus de 65 milliards de dollars par an. La "customisation" de masse nécessiterait des investissements et des modifications conséquentes en management, en ressources humaines, en gestion de la chaîne logistique et opérationnellement. Mais les consommateurs se sentent de plus en plus enclins à acheter sur commande. Les auteurs proposent alors également l'alternative de la fabrication à la commande virtuelle que Ford et Général Motors tentent d'implémenter chez leurs revendeurs et sur Internet.

### **1.10 Conclusion**

Cet état de l'art a tenté de décrire de façon détaillée les théories sur le séquençement et la différenciation retardée. Cela permet d'avoir un point de vue global et de construire un modèle de simulation cohérent au chapitre 2.

## CHAPITRE 2

### MODÉLISATION DU PROBLÈME

Dans ce chapitre, une usine d'assemblage du type de l'industrie automobile est modélisée. L'usine est décomposée en ateliers de ferrage, peinture et montage. Une séquence de véhicules à produire est supposée déjà établie en fonction des contraintes du montage: c'est la liste unique ordonnancée (LUO).

Cette usine n'est pas comme certaines usines qui ont implanté le lean manufacturing: les opérateurs n'arrêtent pas la ligne dès qu'un défaut intervient pour le traiter immédiatement. Les retouches sont traitées en sortant les véhicules de la ligne d'assemblage: au sein des deux premiers ateliers, cette séquence peut subir les perturbations présentées en 1.5. Il y a aussi des stocks tampons avant chaque atelier.

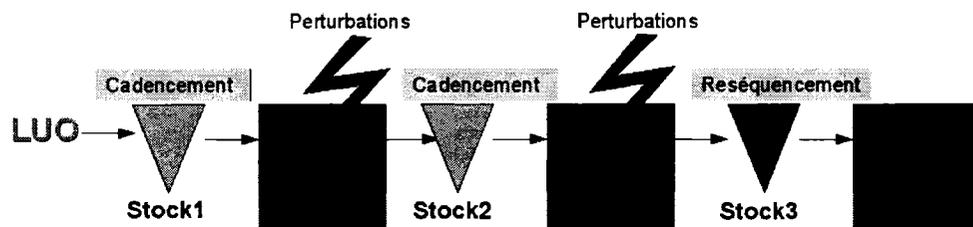


Figure 2.1: Modélisation d'une chaîne d'assemblage.

Les objectifs de cette étude sont multiples et ont pour but de limiter les coûts au niveau de la ligne d'assemblage:

- les véhicules de même carrosserie sont regroupés en entrée du ferrage et ceux de même couleur en entrée de la peinture grâce aux stocks tampons. Il faut minimiser le nombre de lots formés pour limiter les coûts dus à ces deux ateliers. Il s'agit de cadencement,

- il faut tenter de limiter la taille des stocks en essayant d'obtenir une meilleure gestion de ceux-ci,
- il s'agit également de retrouver la liste initiale en entrée de l'atelier de montage pour permettre un approvisionnement efficace (dans le cadre de l'approvisionnement ou de la production synchrones): un véhicule trop en avance risque de ne pas trouver au niveau de la chaîne de montage les composantes qui lui sont destinées, à l'endroit où ces dernières doivent être montées. Les informations données aux fournisseurs sur la séquence de production doivent être respectées pour un bon fonctionnement du système. Il s'agit de reséquencement.

Le problème est modélisé avec le logiciel Matlab de la façon présentée sur la figure 2.1. La question est donc de savoir si en entrée de montage il est possible de reséquencez la liste disponible pour qu'elle soit la plus proche possible de la LUO initiale.

Une première partie 2.1 présentera la génération de séquences de production qui pourront être utilisées dans la suite. Leur taille sera évaluée en 2.4. Après avoir défini des indicateurs de performance en 2.2, chaque élément de la ligne sera consciencieusement modélisé: les perturbations d'ateliers en 2.3, le cadencement en 2.5 pour le ferrage et en 2.6 pour la peinture et le reséquencement du stock 3 occupera la partie 2.7. Un aperçu de l'évolution de la séquence tout au long de la ligne sera présentée en 2.8.2 puis le modèle sera finalement validé en 2.8.

## **2.1 Construction d'une LUO**

Les véhicules possèdent diverses caractéristiques. Elles sont regroupées en trois catégories. La première est la carrosserie, la deuxième est la couleur de la pein-

ture et la troisième correspond aux caractéristiques intervenant au montage. Elles sont supposées indépendantes deux à deux. Le stock 3 ne cherche pas à créer le meilleur séquençement mais tente de retrouver la liste initiale en entrée de montage (reséquencement). L'ordre de fabrication est donc supposé donné à partir d'un séquençement prenant en compte les contraintes du montage avec par exemple une heuristique semblable à celle proposée par Korkmazel, (2001). Comme il y a indépendance, les contraintes du montage n'interviendront plus dans la suite. La liste initiale est alors générée aléatoirement et itérativement. La chaîne de montage est supposée produire 10 carrosseries différentes avec chacune 10 couleurs de peintures possibles. La séquence de fabrication est alors modélisée par un tableau à trois lignes comprenant ces deux caractéristiques et la position dans la LUO.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	6	3	7	1	5	8	9	2	10	4	3	8	1	5	7
	10	4	1	6	7	3	2	9	8	5	3	6	2	9	10

Les taux de production des différentes caractéristiques pour chaque atelier sont déterminés de façon aléatoire au début. La répartition de chaque caractéristique au sein de la séquence de production est ensuite déterminée itérativement: à chaque itération  $n$ , il faut décider quel véhicule produire.

Pour la carrosserie et la peinture, la caractéristique dont le taux instantané de production à cet instant est le plus éloigné du taux théorique décidé précédemment est alors choisie. Pour la caractéristique liée au ferrage par exemple, après l'itération  $n$ , le taux instantané de production de la carrosserie  $c$  est  $t_c(n)$ , et on note  $T_c$  le taux théorique souhaité. Alors le  $(n + 1)^{ème}$  véhicule aura pour carrosserie le premier  $c_{n+1} \in [1; 10]$  qui vérifie

$$t_{c_{n+1}}(n) - T_c = \min_{1 \leq c \leq 10} (t_c(n) - T_c)$$

À l'itération  $(n + 1)$  les taux instantanés de production des différentes carrosseries  $(t_c(n + 1))_{1 \leq c \leq 10}$  sont ensuite mis à jour. Il en est de même pour la peinture. Il reste encore à savoir quelle taille de liste utiliser pour les simulations à venir. Ce problème sera présenté dans la partie 2.3.

À l'aide de cette liste, il est alors facile de modéliser les perturbations, le cadencement et le réordonnement par des actions sur les colonnes. La position initiale va notamment permettre de calculer les retards des différentes commandes tout au long de la chaîne. Mais pour pouvoir analyser les résultats, il faut des indicateurs de performance. Ils sont présentés en 2.2.

## 2.2 Indicateurs de performance

Des indicateurs de performance sont implémentés pour analyser les résultats. Les deux premiers sont ceux décrits par Bernier (2000): les avances et les retards maximaux à  $x\%$ , qui donneront l'évolution des perturbations tout au long de la chaîne et indiquent par exemple si certains items restent bloqués longtemps, et le respect de la LUO à  $\pm n$  places, qui indique le chemin qu'il reste à parcourir pour reconstruire la liste initiale. Mais une troisième catégorie peut être rajoutée: les avances cumulées et retards cumulés à  $x\%$  qui permettront de comparer globalement l'ensemble des modifications intervenues dans la liste. La répartition des retards et des avances en un point donné de la ligne d'assemblage pourra également être représentée graphiquement pour avoir une vue d'ensemble et permettre de faire quelques remarques dans la suite.

### 2.2.1 Retard et avance maximaux à $x\%$

Le retard (qui est en fait une avance si la valeur est négative) de chaque élément est calculé. Les éléments ayant un retard positif sont isolés et les  $x\%$  les moins en retard ensuite. Le retard maximal de ce pourcentage spécifié  $x$  d'items est ensuite calculé: ce sera le retard maximal à  $x\%$ . De façon identique, l'avance maximale à  $x\%$  (retard négatif minimal) est donnée par le même pourcentage de véhicules cette fois-ci les moins en avance.

L'évolution des retards et des avances maximaux peut être représentée aux différents points de la ligne, de l'entrée dans le premier stock jusqu'à l'entrée au montage. En pratique, la valeur  $x = 95$  sera souvent utilisée pour éliminer des cas pathologiques qui pourront être traités en dehors de la chaîne (cf 2.8).

### 2.2.2 Respect de la LUO à $\pm n$ places

Cet indicateur donne le pourcentage d'éléments dont la position dans la liste de production, à un endroit donné de la chaîne, est à  $\pm n$  places de la position initiale donnée par la LUO. L'évolution de ce pourcentage en fonction de  $n$  peut être représentée graphiquement pour une plage de valeurs de  $n$  donnée (par exemple entre 0 et 200). Cet indicateur permet notamment d'évaluer la qualité de reconstruction d'une séquence de fabrication.

### 2.2.3 Retards et avances cumulés à $x\%$

De manière semblable à 2.2.1, cette troisième catégorie d'indicateurs donnera les retards ou avances cumulés des  $x\%$  d'items respectivement les plus en retard ou les

plus en avance.

### 2.3 Perturbation d'une liste

Les perturbations qui affectent la séquence de production au sein d'un atelier (la carrosserie ou la peinture) doivent être modélisées. Elles peuvent correspondre à des retouches ou à des problèmes techniques. Duplaga (1996) indique que 15% des véhicules subissent des retouches. Baratou ((1998)) relève un taux de retouches de 20%. De même Guerre-Chaley et al. (1995) donnent l'exemple de l'usine PSA d'Aulnay-sous-bois avec entre 14 et 21% de retouches dont deux tiers en retouches partielles et un tiers en retouches totales.

Après de nombreuses simulations, une modélisation semblable des perturbations ne semble malheureusement pas permettre de rendre compte de ce qu'il se passe en pratique: les résultats ne correspondent pas aux données que Bernier (2000) a collecté dans des cas réels dans une usine automobile. Grâce à sa modélisation des perturbations, il arrive pour sa part à les retrouver. Il faut alors chercher une autre modélisation qui permette d'en faire autant pour augmenter la validité du modèle présenté ici.

Finalement, chaque élément est déplacé d'un nombre de places dont la répartition est donnée par une combinaison de deux gaussiennes (lois normales). Pour le ferrage, les retards que prennent les éléments de la séquence de production auront la répartition suivante:

$$0.47 * Gauss(18, 30) + 0.53 * Gauss(-52, 23)$$

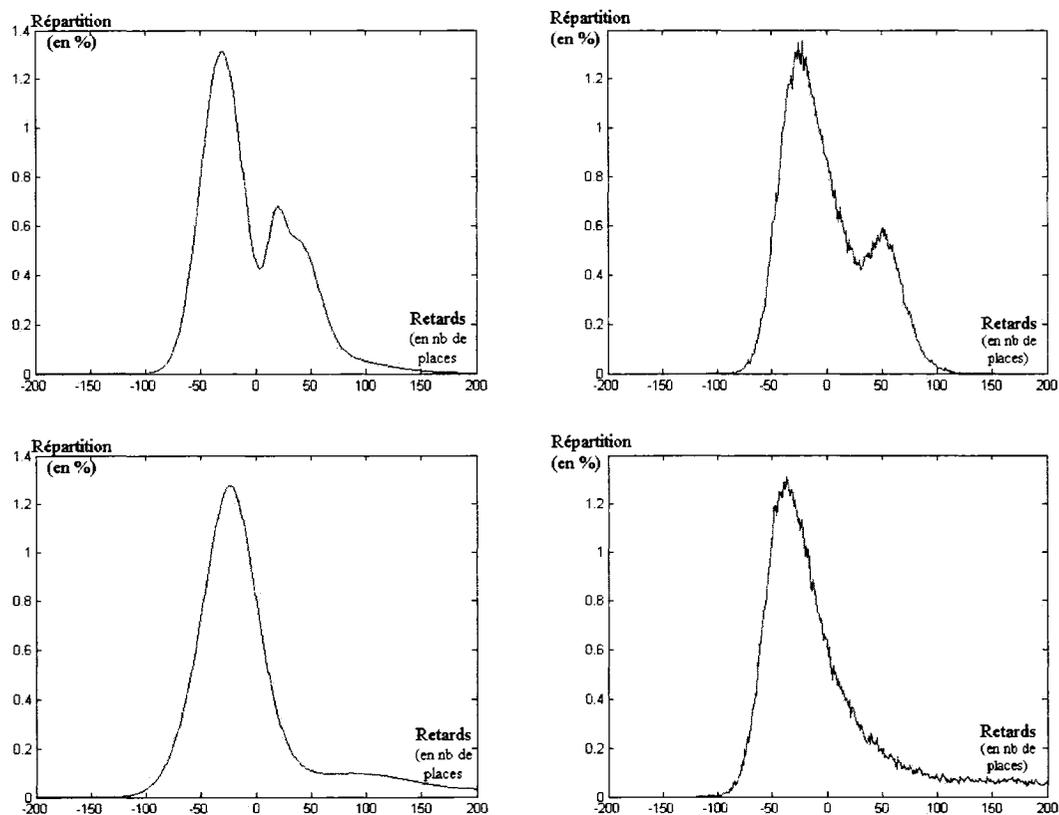


Figure 2.2: Comparaison entre la répartition des retards issus des perturbations observées par Bernier (à gauche) et la modélisation obtenue ici (à droite) pour l'atelier de ferrage (en haut) et de peinture (en bas).

et pour la peinture:

$$0.35 * Gauss(20, 40) + 0.65 * Gauss(-60, 20)$$

Ces valeurs ont été obtenues par essais et erreurs, jusqu'à ce que la répartition finale des retards s'approche suffisamment du résultat souhaité. Leur représentation est donnée dans les figures 2.2.

Ces perturbations sont de même ordre de grandeur que celles souhaitées, mais légèrement différentes. Les différences proviennent de l'étude d'une usine en parti-

culier. Les perturbations sont donc jugées pertinentes pour ce genre de problème. Elles seront utilisées dans la suite.

## 2.4 Détermination de la taille de la liste

Le but est de déterminer la longueur de liste qui permettra d'avoir des résultats pertinents. Une étude à partir des avances et des retards cumulés engendrés par la perturbation de l'atelier de ferrage est utilisée. Les simulations s'effectuent sur des listes dont la taille varie de 100 à 50 000. Pour chaque taille de liste, dix simulations sont effectuées et l'écart type relatif des retards cumulés ou des avances cumulées à  $x\%$  est calculé, pour toutes les valeurs de  $x$  dans  $\{0.5; 0.6; 0.7; 0.8; 0.9; 1\}$ . La figure 2.3 représente le maximum de ces écarts types relatifs.

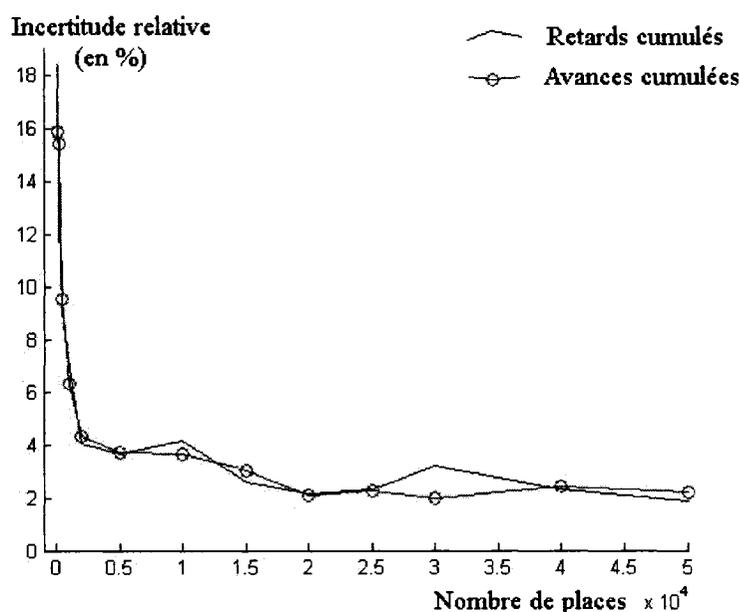


Figure 2.3: Incertitude relative des retards (avec étoiles) et avances cumulées (avec points) maximale (pour différentes valeurs de  $x$ ) introduite par la perturbation de l'atelier de ferrage.

L'incertitude relative des retards et avances cumulés diminue fortement jusqu'à

une taille de 5 000. Il y a ensuite de petites améliorations jusqu'à 20 000; aucune amélioration majeure n'est perçue pour une taille de liste plus grande. Par conséquent, une liste de 20 000 véhicules sera utilisée dans la suite. Avec environ 500 véhicules par jour ((2004) et (2001)), cela correspond à 40 jours de production. C'est un ordre de grandeur convenable, d'autant plus qu'il devient vite coûteux en temps de calcul de travailler sur des listes plus grandes.

En pratique, il est important de se fixer une durée minimum pour permettre de donner des informations claires aux fournisseurs et sous-traitants. Il est possible par exemple de commander une séquence glissante de 1 à 3 mois modifiée toutes les semaines. Cette séquence peut être composée de commandes réelles ou bien de prévisions. Dans le cas de rupture de stock, comme le lancement d'un véhicule à grand succès, les ordres de fabrications peuvent être connus pour une plus grande période: il peut y avoir des listes de commandes de plus de 4 mois.

## **2.5 Cadencement pour le ferrage**

La LUO sera cadencée en utilisant l'objectif principal de minimiser le nombre de changements d'outils sur les machines. Ceci revient à regrouper de plus possible les véhicules de même carrosserie.

Le stock tampon sera tout d'abord considéré à accès direct (de type auto-stockeur). N'importe quel véhicule du stock peut alors être envoyé en aval vers l'atelier de ferrage.

Les stocks à tiroirs, moins flexibles mais moins coûteux, seront considérés dans une deuxième partie. Il s'agit de plusieurs tiroirs, ou rails, dans lesquels les véhicules sont enlignés à la sortie d'un atelier. Chacun fonctionne en FIFO. Ce n'est donc

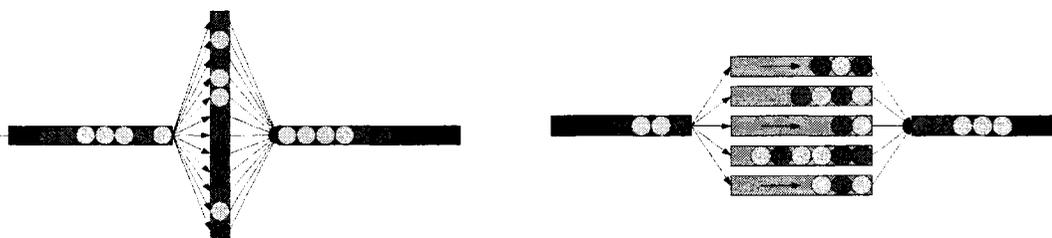


Figure 2.4: Différents types de gestion du stock. Stock à accès direct (à gauche) et à tiroirs (à droite).

que le premier de chaque tiroir qui peut être envoyé vers l'atelier de ferrage. Quand cela se produit, tous les éléments de ce tiroir vont avancer d'une place et cela libère une place en arrière de celui-ci.

Différentes règles de gestion de ces stocks sont étudiées en 2.5.1 et 2.5.2.

### 2.5.1 Stock à accès direct

Le stock tampon est modélisé par une liste. Il est initialement vide. Il se remplit des premiers éléments de la liste initiale (période de réchauffement). En régime permanent, pour chaque véhicule qui sort du stock tampon, un véhicule de la liste initiale entre à sa place. Par conséquent, l'enlignement dans le stock tampon est régulier. Le cadencement se fait toujours avec un stock plein sauf dans la période de terminaison où il est finalement vidé. La taille du stock étant toujours inférieure à 200, les périodes transitoires de réchauffement et de terminaison sont sans effet majeur sur ces expériences.

Les véhicules de même carrosserie sont regroupés par lots. Une pénalité est affectée à chaque lot à l'aide d'une règle de tri. Le lot de pénalité minimale est ensuite choisi. Les éléments de ce lots sont ensuite pris dans l'ordre décroissant des retards. Il faut alors déterminer quelles règles peuvent être utilisées.

Une première règle de tri  $R_1$  fait passer le lot le plus grand à chaque itération, jusqu'à ce que tous les véhicules de la liste initiale soient passés. Le retard maximal moyen observé (3021 places, tableau 2.1) est immense. D'autres règles de tri sont donc envisagées. La règle  $R_2$  est presque identique: s'il y a plusieurs lots de taille maximale, le lot avec le retard cumulé le plus grand sera choisi. La règle  $R_3$  est définie par le lot de retard moyen le plus grand,  $R_4$  par le lot de retards cumulés le plus grand. Ensuite viennent les règles  $R_5$ ,  $R_6$  et  $R_7$  qui sont semblables à  $R_2$ , mais une taille de lot maximale est imposée (respectivement 10, 15 ou 20 véhicules).

Il faut également déterminer combien d'expériences faire. 40 expériences sont alors réalisées en utilisant la règle de tri  $R_1$ , cf figure I.1. Il suffit de trouver un nombre d'expérience raisonnable (par rapport au temps de calcul) à partir duquel les moyennes des indicateurs d'avances et de retards maximaux et cumulés sont stables. Même si 10 expériences est un bon chiffre, il y a moins d'incertitude après 20 expériences. Prendre plus de 20 expériences augmenterait le temps de calcul sans améliorer de façon conséquente l'incertitude. 20 expériences vont donc être réalisées dans cette partie.

Le tableau 2.1 présente les moyennes sur 20 expériences (en nombre de places) des résultats pour un stock de 150 places et le tableau 2.1 pour 100 places. Lorsque non précisé, les retards et les avances sont à 95%.

Le but est de former le minimum de lots possibles tout en évitant les aberrations comme des retards maximaux trop importants par exemple. Le tableau 2.1 montre que les règles  $R_1$  et  $R_2$  présente un retard maximal qui dépasse les 3000 places. Leurs avances et retards cumulés sont également plus grands de respectivement plus de 42.1 et 3.6% par rapport à  $R_3$ . Les avances maximales sont meilleures de

Tableau 2.1: Comparaison des règles de cadencement pour le ferrage pour un stock 1 à accès direct de 150 places. Moyennes sur 20 expériences, en nombre de places.

<i>Règle</i>	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	$R_6$	$R_7$
Retards cum	543232	541580	522307	598989	440057	450911	475380
Avances cum	-734568	-732911	-515627	-593393	-611217	-614696	-639162
Retards max	394.6	393.3	110.2	130.6	367.6	370.3	376.5
à 98%	681.2	679.2	112.5	135.8	703.2	665.8	663.1
à 99%	1109	1119	114.8	139.1	1427	1288	1155
à 100%	3021	3050	179.45	232.1	2416	2612	2784
Avances max	-116.8	-116.9	-113.4	-140.3	-81.15	-89.7	-100.8
à 98%	-120.9	-121.1	-121.6	-147.2	-85.7	-96.6	-109.3
à 99%	-123.2	-123.2	-126.2	-149.0	-87.2	-99.1	-113.9
à 100%	-128.2	-128.1	-137.9	-149	-96.0	-115.7	-130.2
Nb lots	719	719	759	1599	2003	1337	1004

7.6% et le nombre de lots de 5.6%. Cette différence est minime. Cela ne compense pas l'écart sur les avaries précédentes.  $R_3$  sera donc préféré.

$R_4$  ne sera pas non plus choisi car il présente de moins bon résultats que  $R_3$  sur tous les indicateurs.

$R_5$  et  $R_6$  présentent un nombre de lots beaucoup trop important. Il en est de même pour  $R_7$  mais les écarts ne sont pas aussi gênants. Par contre,  $R_7$  donne un retard maximal de 2784 places qui est inacceptable et un retard maximal à 95% près de trois fois supérieur à  $R_3$ .

Des considérations semblables mènent au même résultat pour un stock de 100 places (tableau I.1). La règle sélectionnée sera alors  $R_3$  dans le cas de l'utilisation d'un stock à accès direct.

Remarque: dans la thèse de Baratou (1998), la gestion des stocks tampons est plus dynamique dans le sens où le temps qu'un véhicule arrive dans le stock, plusieurs véhicules peuvent en sortir. Par conséquent, le stock tampon n'est pas toujours

plein. Dans la modélisation utilisée ici, il est plein à chaque itération en régime permanent.

### 2.5.2 Stock à tiroirs

Dans ce cas, le mode de gestion du stock est plus complexe. L'ensemble des lots qui peuvent être formés est évalué. Un élément sera dans un lot à une certaine itération s'il est le premier d'un rail ou si tous les éléments le précédant dans son rail sont de caractéristique identique, à savoir la carrosserie ici. Le lot de pénalité minimale est ensuite sélectionné grâce à une règle de tri. L'ordre de l'ensemble de ces éléments au sein même du lot est ensuite choisi: l'élément accessible (donc le premier d'un rail) qui a le plus grand retard est envoyé en aval en premier. Cette opération est répétée jusqu'à ce que le lot soit entièrement passé.

Il faut déterminer la règle de tri à utiliser pour évaluer la pénalité de chaque lot. Les règles  $R_5$ ,  $R_6$  et  $R_7$  précédentes sont à exclure. Ce n'est pas la peine de limiter la taille des lots puisque les stocks à tiroirs ne permettent pas une grande flexibilité. La comparaison porte sur les règles  $R_1$  à  $R_4$ . Selon les mêmes considérations que pour le stock à accès direct, le stock tampon est toujours plein sauf en début et en fin de simulation. La conséquence est de ne pas considérer de politique d'insertion dans le stock en régime permanent car il n'y a toujours qu'une seule place de disponible. Pour le remplissage initial, les véhicules sont placés dans le premier rail le moins vide.

Pour déterminer combien d'expériences faire, 40 tests sur la règle  $R_1$  avec 10 rails de taille 5 sont effectués. De la même manière que pour le stock à accès direct, 20 expériences réduisent suffisamment l'incertitude. 20 expériences sont donc réalisées et les moyennes des valeurs obtenues (en nombre de places) sont énoncés dans le

tableau I.2 pour 10 rails de taille 5 et dans le tableau 2.2 pour 5 rails de taille 10. Lorsque non précisé, les retards et les avances sont à 95%.

Tableau 2.2: Comparaison des règles de cadencement pour le ferrage pour un stock 1 de 5 rails de 10 places. Moyennes sur 20 expériences, en nombre de places.

<i>Règle</i>	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$
Retards cum	78912	77252	1312	240
Avances cum	-79507	-77387	-238	0
Retards max	20.5	20.0	3.3	2.6
à 98%	25.6	24.5	4.5	3.4
à 99%	28.5	27.4	4.4	2.3
à 100%	43.3	41.2	5.9	3.1
Avances max	-24.8	-24.4	-1.4	-0.7
à 98%	-28.7	-28.15	-3.0	-1.2
à 99%	-30.2	-29.65	-2.8	-1.3
à 100%	-36.6	-36.9	-9.8	-4.3
Nb lots	11625	11648	19459	19856

Le tableau 2.2 montre que  $R_2$  donne de meilleurs résultats que  $R_1$  sur tous les indicateurs sauf le nombre de lots et l'avance maximale à 100%. Ces deux valeurs sont tout de même très proches; leurs différences sont moindres que pour les avances et les retards cumulés. Dans le tableau I.2,  $R_2$  donne de meilleurs résultats sur tous les critères.  $R_2$  sera alors préférée à  $R_1$ . Les règles  $R_3$  et  $R_4$  induisent des nombres de lots très importants dans les deux tableaux. Ils ne seront pas employés. La règle  $R_2$  sera donc choisie dans le cas de l'utilisation d'un stock à tiroirs: le lot de taille maximale est retenu et si plusieurs lots ont la même taille, celui qui présente les retards cumulés les plus grands sera retenu.

À l'issue de ce stock tampon, les véhicules vont passer dans l'atelier de ferrage où ils vont être soumis aux perturbations obtenues en 2.3. Ils subiront ensuite le cadencement précédant l'atelier de peinture.

## 2.6 Cadencement pour la peinture

De la même manière que pour les carrosseries avant l'atelier de ferrage, les véhicules de même teinte sont regroupés pour passer à l'atelier de peinture. Ce regroupement par lots répond non seulement à la contrainte de minimiser les changements d'outils, mais aussi à la minimisation du nombre de purges entre lots de couleurs différentes.

Le stock tampon reste plein sauf en début et en fin de traitement. Tout se passe comme s'il existait avant le stock tampon un autre stock poumon, qui permet uniquement d'absorber les variations de dates de sortie des véhicules de l'atelier précédent. Dès qu'un véhicule est envoyé vers l'atelier aval, le stock tampon est rempli avec un véhicule qui vient du poumon.

Les caractéristiques de peinture et de ferrage ont été supposées indépendantes. Pour décider du lot à faire passer en premier, les mêmes règles de tri que pour le premier cadencement sont alors utilisées. Une fois le lot choisi, les véhicules au sein de ce dernier sont aussi choisis de façon à minimiser les retards.

À l'issue de ce dernier, l'ensemble des véhicules va être soumis aux perturbations de l'atelier de peinture décrites en 2.3 pour ensuite être reséquencées avant l'entrée dans l'atelier de montage.

## 2.7 Reséquencement en entrée de montage

Il s'agit ici de la modélisation du stock tampon à l'entrée du montage, le stock 3. Deux configurations possibles du stock sont aussi considérées ici: à accès direct ou à tiroirs. Des poumons sont également présents en avant du stock pour lisser

les taux d'arrivée des différents véhicules. Lorsqu'un véhicule passe à l'atelier suivant, le stock est rempli au maximum avant de décider d'en faire passer un autre; l'algorithme de reséquencement fonctionne aussi avec un stock tampon plein sauf pendant la période de terminaison.

Contrairement à Baratou (1998) qui tente d'introduire au sein du reséquencement des contraintes liées au montage comme l'éloignement nécessaire entre deux options identiques, de telles contraintes ne sont pas prises en considération. La LUO initiale est déjà déterminée en tenant compte de ces contraintes. Le seul objectif ici est de retrouver la LUO initiale.

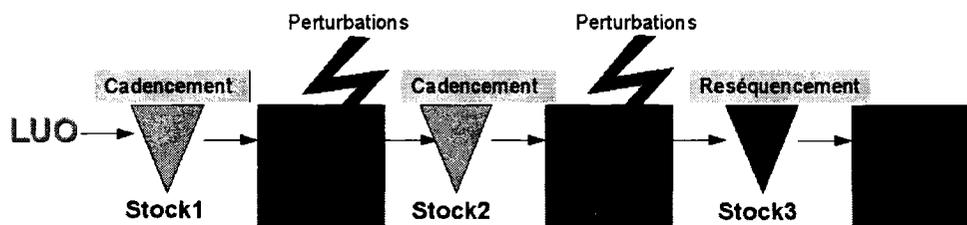


Figure 2.5: Modélisation d'une chaîne d'assemblage.

### 2.7.1 Stock à accès direct

Dans le cas d'un autostockeur, le problème est assez simple. Le véhicule qui a le plus grand retard passe en premier. C'est celui dont la position dans la LUO est la plus avancée. Pour éviter un parcours de la liste trop fréquent dans l'algorithme, le stock tampon est classé au fur et à mesure, par l'insertion des éléments, dans l'ordre croissant des positions initiales dans la LUO. Le premier élément du stock aura toujours le retard maximal; ce sera donc toujours l'élément que l'on enverra à l'atelier de montage.

## 2.7.2 Stock à tiroirs - Intervention d'un critère de choix

Dans le cas d'un stock à tiroirs, le choix de l'élément à faire passer à l'atelier suivant est plus compliqué. Il faut affecter une pénalité au premier élément de chaque tiroir et choisir celui qui a la plus petite pénalité. Mais deux questions se posent. La pénalité doit-elle être calculée à partir de l'élément considéré seul ou à partir de tous les éléments de son rail? Quelle métrique choisir pour la pénalité d'un élément? Ces deux volets sont étudiés dans cette partie.

### 2.7.2.1 Comparaison entre un critère de choix individuel et collectif

Cette partie suppose tout d'abord que la pénalité est l'avance d'un véhicule (qui est donc négative s'il s'agit d'un retard). Il faut opter pour un des deux critères de choix. Le premier,  $C_1$ , regarde le premier véhicule de chaque rail et choisit celui qui a la pénalité la plus petite. Le deuxième,  $C_2$ , regarde tous les éléments des rails et choisit le premier élément du rail qui présentera la pénalité moyenne la plus petite.

Les deux stocks de cadencement sont à accès direct et de taille 100 dans ces simulations. La différence entre les deux types de reséquencement est déterminée en termes de retards et avances cumulés. Les moyennes sur 20 expériences sont calculées. La différence relative du deuxième par rapport au premier est également évaluée (les deux valeurs étant prises en valeur absolue, une diminution sera négative). Les résultats sont énoncés dans le tableau 2.3 pour 5 rails de taille 10 et dans le tableau I.3 pour 10 rails de taille 5. Lorsque non précisé, les retards et les avances sont à 95%.

Il y a une petite quantité de véhicules dont l'avance est plus grande mais globalement, autant sur les retards que sur les avances, la situation est meilleure avec  $C_2$ .

Tableau 2.3: Comparaison des deux critères de choix pour un stock de reséquencement de 5 rails de taille 10. Moyennes sur 20 simulations.

<i>Critère de choix</i>	$C_1$	$C_2$	<i>Diff. rel. moyenne</i>
<b>Retards</b> cumulés moyens	634792	576310	-9.2%
Retards max moyens	238.3	210.4	-11.3%
98%	292.1	259.5	-11.4%
99%	329	291.2	-11.4%
100%	509.5	445.6	-13.8%
<b>Avances</b> cumulées moyennes	-688584	-603326	-12.4%
Avances max moyennes	-133.6	-153.2	15.5%
98%	-142.4	-176.6	25.2%
99%	-148	-191.9	31.3%
100%	-177.3	-268.4	46.9%

La différence entre les deux critères est aussi plus importante dans le cas à 10 rails. En se restreignant aux valeurs liées au pourcentage 95% et en supposant que les améliorations apportées aux avances cumulées sont plus intéressantes que les moins bons résultats sur les avances maximales,  $C_2$  est retenu pour toute la suite.

### 2.7.2.2 Influence du type de métrique

Il faut évaluer ici si le type de métrique joue un rôle important dans les résultats du reséquencement (dans le cas d'un stock à tiroirs uniquement). Trois différentes métriques sont testées. La première est l'avance  $N_1(avance) = avance$ . La deuxième est une exponentielle de la forme  $N_2(avance) = e^{\frac{avance+1}{100}}$ . La troisième  $N_3$  est celle employée par Bernier (2000), figure 2.6.

La première métrique est convexe, la deuxième l'est strictement, mais la troisième ne présente pas de propriété de convexité. D'après Baratou (1998), l'avantage de la convexité stricte est de minimiser la dispersion. 20 expériences sont simulées. Pour chaque expérience, la séquence à la sortie de l'atelier de la peinture est reséquencee avec les trois métriques. Les stocks 1 et 2 sont à accès direct de 100 places de

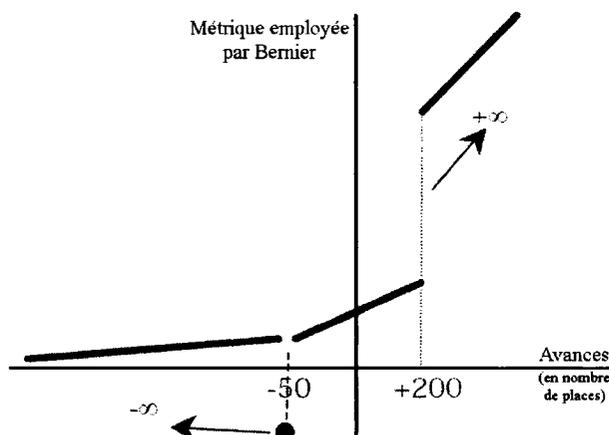


Figure 2.6: Métrique employée par Bernier,  $N_3$ , en fonction du nombre de places d'avance.

façon à avoir plus de modifications de listes à rattraper. Les retards et les avances cumulés et maximaux à 95% sont calculés pour chacune des listes obtenues. Les moyennes et les écarts types relatifs obtenus sur l'ensemble des expériences sont présentés dans le tableau 2.4 pour 5 rails de taille 10 et dans le tableau I.4 pour un stock de reséquencement (stock 3) de 10 rails de taille 5.

Tableau 2.4: Comparaison des trois métriques avec un stock de reséquencement de 5 rails de taille 10. Moyenne sur 20 expériences, en nombre de places.

Métrique employée	$N_1$	$N_2$	$N_3$
Retards cumulés	577198	592148	577234
Retard max	213	229.5	212.85
Avances cumulées	-604059	-629360	-604300
Avance max	-153.2	-145.3	-153.45

Dans le tableau 2.4, la deuxième métrique est moins bonne que les deux autres sur trois critères: elle engendre entre 2.5% et 4.2% plus de retards et d'avances cumulés et des retards maximaux de l'ordre de 7.8% plus importants. Elle permet par contre d'obtenir des avances maximales plus faibles d'un peu plus de 5.1%. Ces relations d'ordre sont même vraies pour chaque expérience réalisée. Des remarques similaires peuvent être faites pour le tableau I.4.

Les différences étant minimes, il est intéressant de regarder au niveau du deuxième indicateur de performance (cf. 2.2.2) si la répartition des retards est grandement modifiée, figures 2.7.

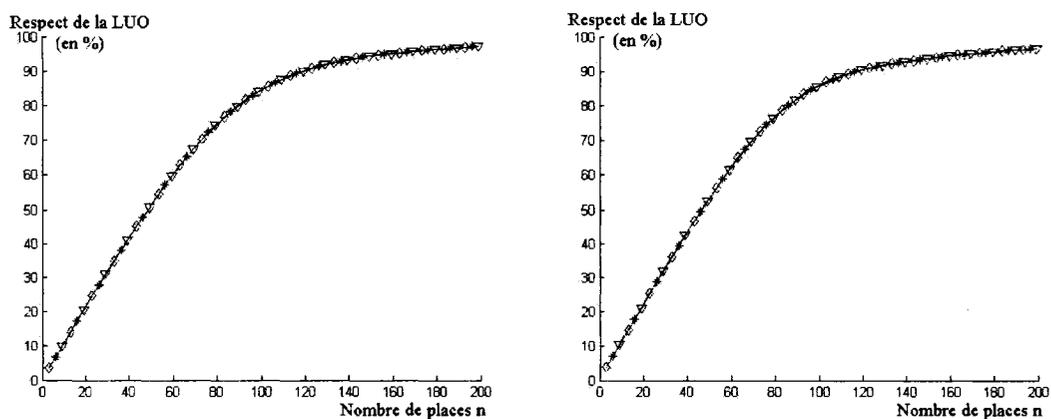


Figure 2.7: Respect de la LUO à  $\pm n$  places ( $0 \leq n \leq 200$ ) pour des listes reséquencées à l'aide des métriques  $N_1$  (diamants),  $N_2$  (étoiles) et  $N_3$  (triangles) pour un stock de 10 rails de taille 5 (à gauche) et 5 rails de taille 5 (à droite).

Les trois courbes sont très proches. Leur distinction est impossible sur le graphique. Dans les deux cas, l'écart maximal entre la première courbe et la troisième, associées de  $N_1$  et  $N_3$  est inférieur à 0.03%. Par contre, la deuxième courbe, associée à  $N_2$ , est inférieure entre 0 et 200 aux deux autres. L'écart avec les deux autres courbes peut aller jusqu'à 0.74%, ce qui n'est tout de même pas gigantesque. Le respect de la LUO ne donne donc pas plus d'informations.

Étant données les différences sur les avances et les retards cumulés obtenues aux tableaux 2.4 et I.4, il est préférable de ne pas utiliser  $N_2$ . Par contre, les différences entre les deux étant minimes, n'importe laquelle des métriques  $N_1$  ou  $N_3$  peut être utilisée.

La métrique de plus grand retard, c'est à dire  $N_1$ , sera donc utilisée dans la suite par simplicité et rapidité algorithmique.

Avec cette dernière partie, la construction du modèle est terminée. Il est alors possible de prendre un peu de recul et d'obtenir des premiers résultats permettant d'établir certaines remarques importantes.

## 2.8 Observations sur le modèle établi

Pour tester la validité de ce modèle, il serait bon de retrouver des caractéristiques semblables aux observations réelles. Il est par exemple possible de regarder la question de la reséquenceabilité parfaite. Cette dernière sera traitée en section 2.8.1. L'évolution des retards le long de la ligne d'assemblage sera ensuite présentée en 2.8.2.

### 2.8.1 Reséquenceabilité parfaite

De la même manière que dans la thèse de Vincent Bernier (2000), une chaîne sans aucun cadencement est simulée. La liste initiale est seulement perturbée dans les ateliers de ferrage et de peinture. La valeur  $n$  telle que le pourcentage  $x$  des items aient plus de  $n$  places de retard ou d'avance est relevée pour des tailles de stock entre 50 et 200. Les deux valeurs  $x = 10\%$  et  $x = 5\%$  sont considérées. les résultats sont consignés dans le tableau 2.5.

Tableau 2.5: Valeur de  $n$  telle que le pourcentage  $x$  des items aient plus de  $n$  places de retard ou d'avance en fonction de la taille du stock de reséquenceement.

<i>Taille du stock</i>	50	75	100	125	150	175	200
$x = 10\%$	49	24	14	10	7	5	4
$x = 5\%$	115	91	65	40	15	7	5

Même avec un stock de reséquencement de 200 places, encore 5% des véhicules ont un retard ou une avance supérieurs à 5 places. La reséquenceabilité parfaite est donc impossible: il est impossible de retrouver la LUO initiale en entrée de montage à cause des perturbations seules. C'est notamment l'argument qui oblige Bernier à redéfinir la reséquenceabilité.

## 2.8.2 Évolution des retards le long de la ligne

### 2.8.2.1 Évolution globale

Pour avoir une vision globale des réordonnements au sein du modèle, l'évolution de la répartition des retards (et des avances) le long de la ligne est représentée, figure 2.8. La taille des deux premiers stocks est fixée à 150 places et la taille du dernier est de 100 places. Ils fonctionnent tous à accès direct.

Il y a six courbes. Le retard est représenté entre -300 et 400 places et la répartition entre 0 et 0.6% sauf pour la dernière courbe en bas à droite qui représente la répartition des retards en entrée du montage entre 0 et 8%.

Comme le bon-sens l'indiquait, il y a étalement des retards au fur et à mesure de l'avancement dans la ligne d'assemblage. Le reséquencement diminue ensuite de beaucoup les avances et permet d'améliorer globalement les retards. Par contre, du fait de la taille limitée du stock de reséquencement, les retards gardent tout de même des valeurs importantes. Le chapitre 3 tentera d'améliorer cette situation.

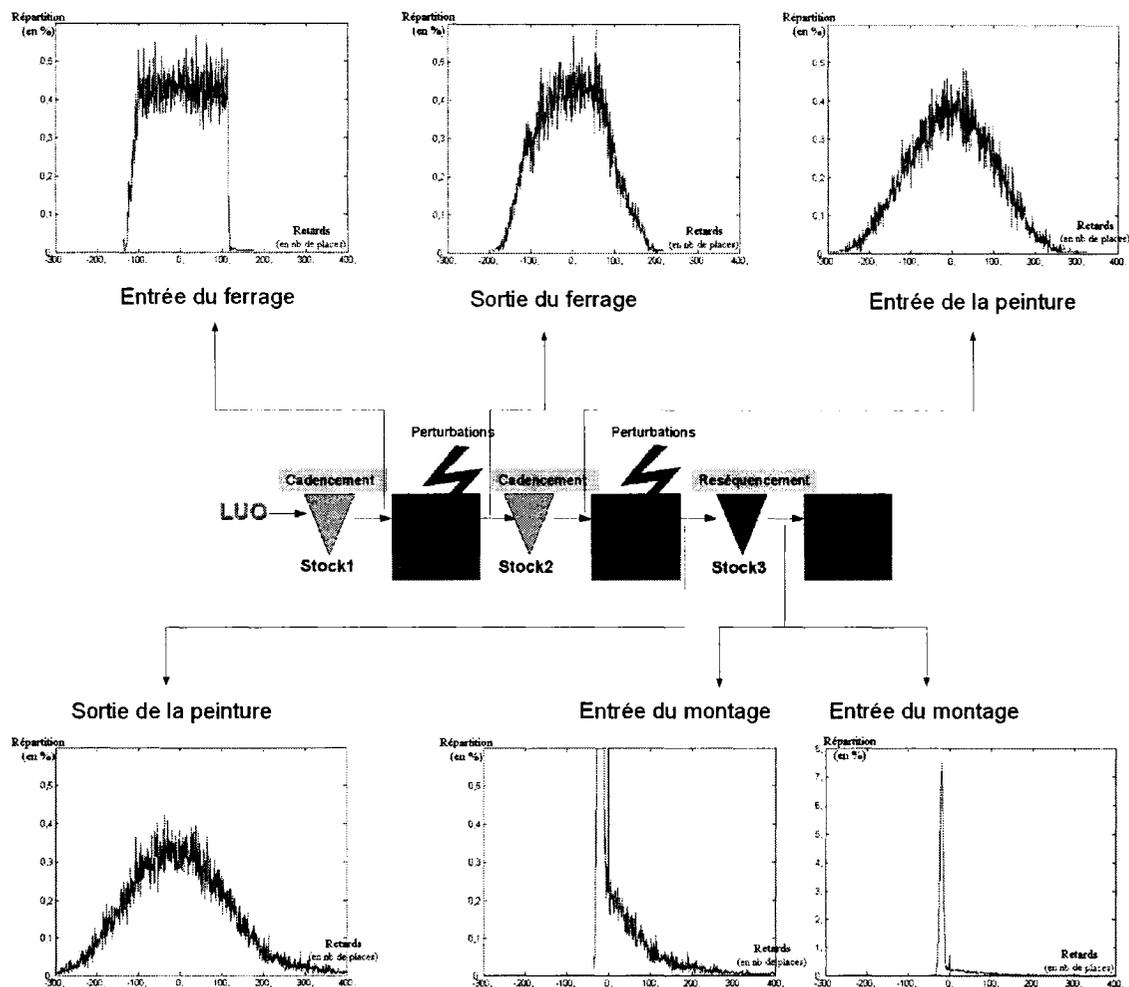


Figure 2.8: Répartition (en %) des retards (en nombre de places) le long de la ligne.

### 2.8.2.2 Indicateurs de performance

Il est possible de compléter la vision des retards par une comparaison avec les observations de Bernier sur la base des indicateurs de performance qu'il utilise: les avances et les retards maximaux et le respect de la LUO (cf. sections 2.2.1 et 2.2.2). Pour ce faire, il faut déterminer en premier lieu les paramètres à employer, à savoir la taille des différents stocks. Par rapport à son objectif de reséquencement, il considère que le stock 1 ne doit pas dépasser 140 places si le stock 2 est de 150 places et le stock 3 de 100 places ((2000) chap.7), les trois stocks étant à accès direct.

Les stocks choisis pour cette simulation seront à accès direct de 150 places pour les deux premiers stocks et de 100 places pour le troisième. Ces valeurs permettront de voir si des aberrations apparaissent.

Les avances et les retards maximaux à 90, 95, 96, 97, 98, 99 et 100% sont d'abord représentés dans la figure 2.9. Il y a à gauche les résultats de cette modélisation et à droite les observations relevées dans une usine automobile par Vincent Bernier. Les retards sont dans la partie supérieure de chaque figure et les avances dans la partie inférieure. Les pourcentages sont croissants de l'axe des abscisses vers l'extérieur.

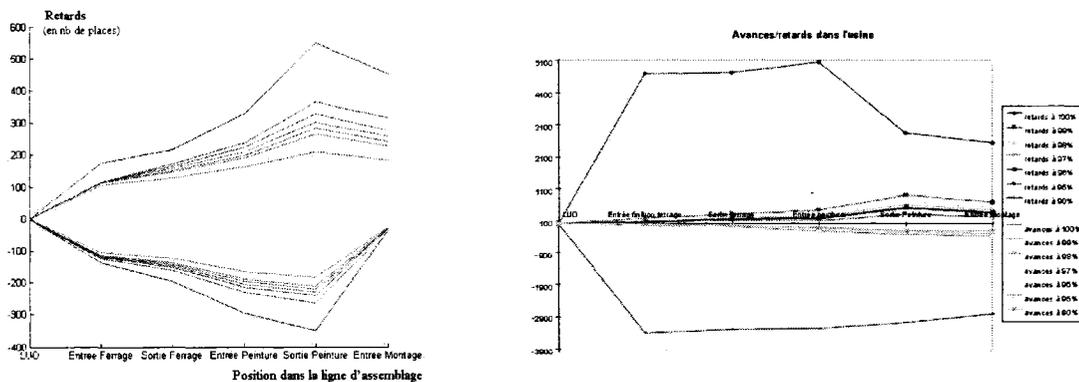


Figure 2.9: Retards et avances maximaux à 90, 95, 96, 97, 98, 99 et 100% (de l'axe des abscisses vers l'extérieur) tout au long de la chaîne d'assemblage obtenus par modélisation (à gauche) ou observés chez un constructeur (à droite).

Les deux indicateurs croissent jusqu'au reséquencement. Le retard maximal sur toute la ligne est de 551 places et l'avance maximale de -351 places, c'est-à-dire beaucoup plus petit que respectivement 5 000 et -3 500 observés par Bernier. Le retard maximal et l'avance maximale à l'issue du reséquencement finissent respectivement à 452 et -35 places. Mais il faut être prudent en comparant les deux figures. Le retard maximal à 100% de 5 000 places obtenu en pratique prouve qu'il existe dans l'usine des cas pathologiques que cette modélisation ne peut pas prendre en compte.

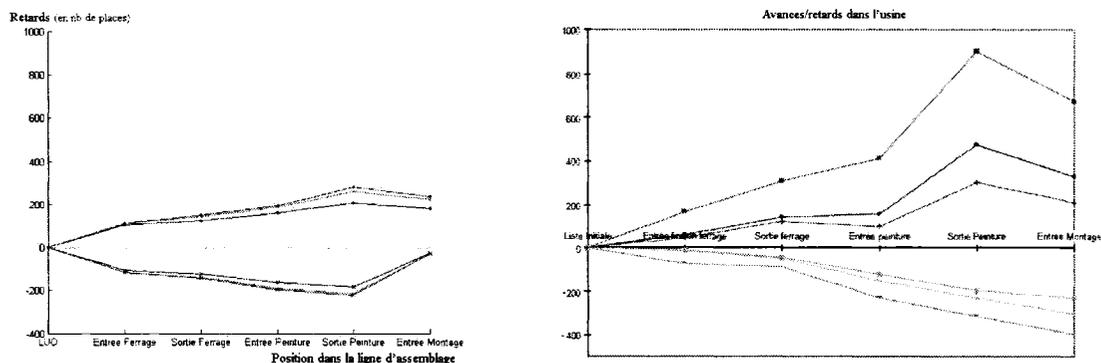


Figure 2.10: Retards et avances maximaux à 90, 95 et 99% (de l'axe des abscisses vers l'extérieur) tout au long de la chaîne d'assemblage obtenus par modélisation (à gauche) ou observés chez un constructeur (à droite).

Les données exposées dans la figure 2.9 sont restreints aux seuls pourcentages 90, 95 et 99% dans la figure 2.10 pour éliminer ces cas pathologiques et regarder le comportement des avances et retards pour une portion représentative de cas. Les résultats obtenus diffèrent légèrement de la situation d'usine. Le premier cadencement (avant l'entrée du ferrage) modifie plus la séquence de production puisque les retards et les avances sont plus grands. Le deuxième cadencement (avant l'entrée de la peinture) engendre des avances maximales à 90 et 95% semblables. Pour ce qui est du reséquencement, la modélisation donne des résultats meilleurs sur les avances maximales mais relativement moins bons sur les retards maximaux.

De façon générale, les avances maximales à 99% sont plus importantes et les perturbations au sein des ateliers ont plus d'effets. Il faut éviter des conclusions hâtives. La comparaison complète n'est pas possible mais il est simplement important de remarquer que pour 95% des retards, les évolutions sont tout de même semblables. Le modèle permet de bien représenter la réalité observée pour cette proportion. La restriction à une portion représentative de cas, en dessous de 95%, se justifie donc.

Pour finir l'étude de l'évolution des retards et des avances, le deuxième indicateur de performance, le respect de la LUO à  $\pm n$  places, est représenté pour  $n$  compris entre 0 et 500 à l'entrée du montage, figure 2.11.

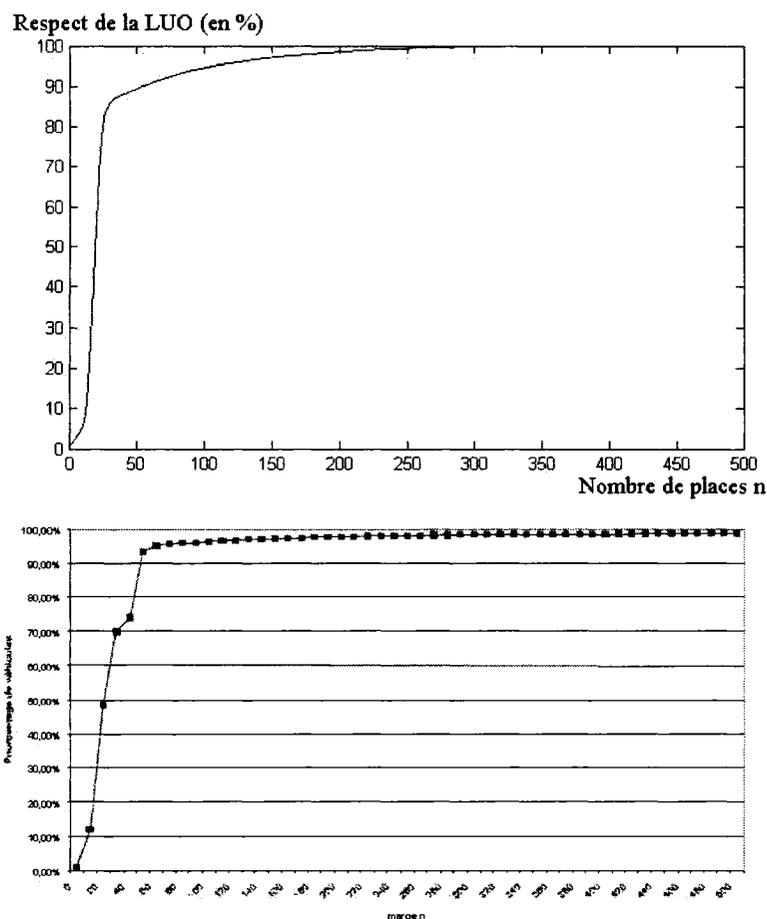


Figure 2.11: Respect de la LUO à  $\pm n$  places,  $0 \leq n \leq 500$  obtenus par modélisation (en haut) ou observés chez un constructeur (en bas).

Les deux courbes présentent une croissance très forte de 0 à 30 places. Dans la modélisation, le pourcentage atteint alors déjà près de 86% alors que dans la deuxième courbe, il n'atteint que 70%. À 60 places de retard ou d'avance, la première atteint 91% et il semble en être de même pour la deuxième courbe. Entre 0 et 60 places, celle-là se trouve donc être meilleure. Tout ceci ne fait que montrer que la modélisation engendre majoritairement moins de retards ou d'avances que

la situation que l'on retrouve en pratique, et que la répartition de ces retards et avances est aussi légèrement différente.

## 2.9 Conclusion

La modélisation est globalement réaliste, même si elle ne donne pas exactement des résultats identiques aux observations réelles. Il faut se rappeler qu'au sein de la modélisation des perturbations (section 2.3), il était déjà justifié qu'il n'est pas important de retrouver exactement la situation réelle. Il faut considérer que les différences proviennent de la modélisation d'une usine de même comportement, mais non identique. Dans ce cadre, le modèle construit paraît tout à fait satisfaisant.

## CHAPITRE 3

### INTRODUCTION DE LA DIFFÉRENCIATION RETARDÉE DANS LE MODÈLE

À l'issue du cadencement pour le ferrage, à la sortie du stock 1, la séquence de production est modifiée. Au sein d'un lot de carrosseries identiques, les ordres de priorité sont conservés. À la sortie du ferrage par contre, il peut y avoir des véhicules de même carrosserie dont l'ordre de priorité n'est pas celui donné par la liste initiale. Avant de tenter de rattraper ce retard au niveau du cadencement, il est possible d'introduire un échange d'ordres de commande de deux véhicules. L'indépendance deux à deux des caractéristiques des véhicules le rend possible. Ces dernières sont alors redéfinies (cela peut par exemple être réalisé grâce à des puces RFID qui seront reprogrammées le long de la ligne). Le véhicule, qui était destiné par un ordre de commande à une personne précise, change de propriétaire. Il s'agit d'un point de différenciation pour l'ensemble des caractéristiques du véhicule hormis la carrosserie.

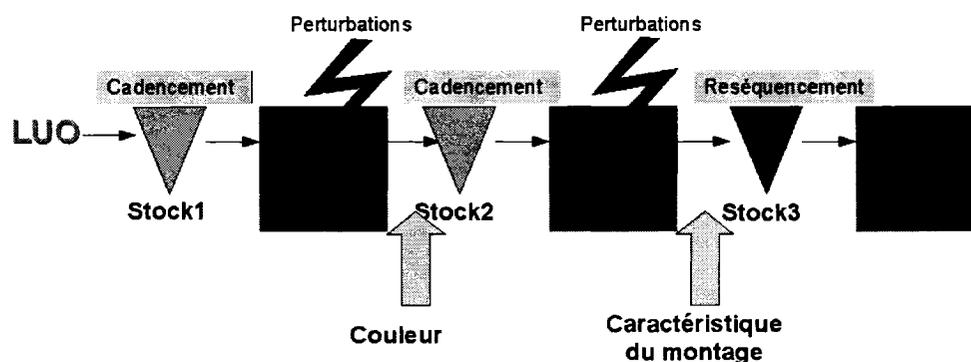


Figure 3.1: Modélisation de la chaîne avec les deux points de différenciation.

Compte tenu de la modélisation introduite dans ce travail, un deuxième point de

différenciation peut être introduit avant le reséquencement du stock 3 et concerne les caractéristiques du montage. Il est possible d'échanger les ordres de commande de véhicules qui ont la même carrosserie et la même couleur mais pas nécessairement les mêmes caractéristiques liées au montage si leur ordre de précedence a été modifié. Finalement, tout se passe comme si la couleur des véhicules était choisie au niveau du premier point de différenciation et les caractéristiques du montage au niveau du deuxième, figure 3.1.

Cette différenciation retardée doit permettre de minimiser les avances et les retards tout au long de la chaîne. L'évaluation de son influence est l'objectif de ce mémoire. Ce chapitre va regarder cette influence au niveau local pour les deux points de différenciation. Une première partie 3.1 décrira deux manières de procéder à un échange d'ordres de commande. Ces deux derniers seront ensuite comparés, partie 3.2. La situation avec le premier point de différenciation est tout d'abord présentée en section 3.3, puis avec seulement le deuxième point de différenciation et les deux ensemble en 3.4. Pour finir, la répartition des retards en entrée de montage conclura ce chapitre en section 3.5. Lorsque plusieurs séquences seront comparées à un endroit donné de la chaîne de production, elles auront été perturbées de la même manière lors de leur passage dans les ateliers précédents pour mieux mesurer les impacts de ces échanges uniquement.

### **3.1 Deux types d'échanges**

Cette section présente deux types d'échange d'ordres de commande: le premier est un échange global qui peut avoir lieu quel que soit le type de stock, à accès direct ou à tiroirs. Le deuxième par contre, un échange limité au stock, n'a d'intérêt que dans le cas d'un stock à tiroirs.

### 3.1.1 Un échange global

Lorsqu'un véhicule sort de l'atelier de ferrage, un ou plusieurs éléments qui le suivent peuvent avoir la même carrosserie et une position initiale plus petite. Si tel est le cas, il échange son ordre de fabrication avec celui de ces éléments qui a la position initiale la plus faible. La figure 3.2 donne un exemple.

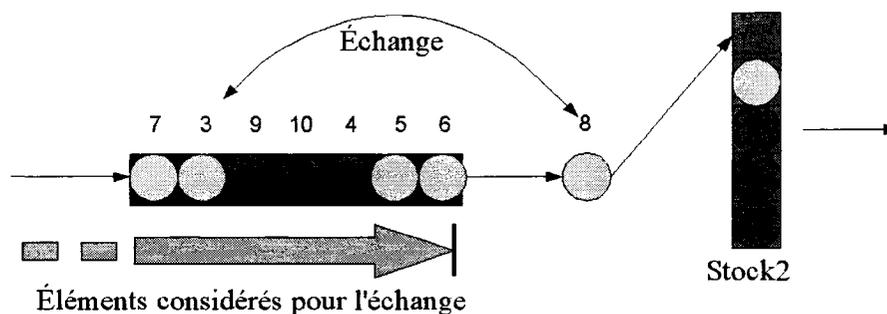


Figure 3.2: Fonctionnement de l'échange global d'ordres de commande.

Supposons que les véhicules 3 et 8 (chiffres correspondant à leur position dans la liste initiale) partagent la même carrosserie. Supposons que le véhicule 3 se retrouve en 11<sup>ème</sup> place et le 8 en 5<sup>ème</sup> place à l'issue du ferrage. Lorsque le véhicule 8 sort du ferrage, il va donc échanger son ordre de commande avec le véhicule 3. Deux retard de +2 et +3 remplacent un retard de +8 et une avance de -3 (en nombre de places). Cela améliore donc les avances cumulées de 3 places et les retards cumulés de 3 places à cet endroit. Cela améliore également le deuxième indicateur de respect de la LUO à  $\pm n$  places. Les possibilités de cadencement au niveau du stock tampon ne sont pas modifiées puisque les caractéristiques des véhicules ont été considérées indépendantes et que le cadencement est effectué sur la couleur de peinture.

Un deuxième type d'échange est possible: un échange limité au stock tampon. Il est développé dans la section suivante.

### 3.1.2 Un échange limité au stock tampon

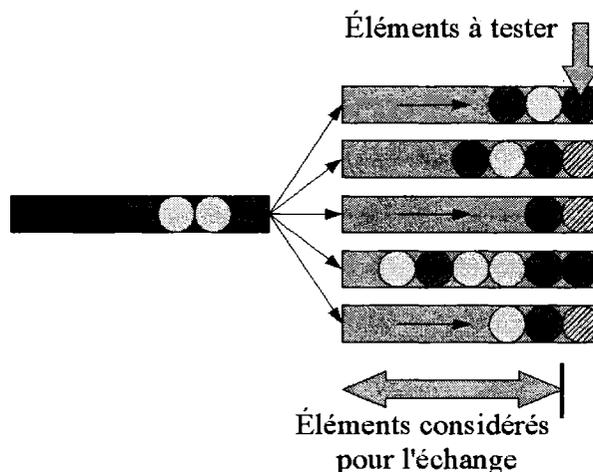


Figure 3.3: Fonctionnement de l'échange limité au stock.

Contrairement au premier échange qui avait lieu avant l'insertion dans le stock tampon, ce deuxième échange a lieu une fois le stock tampon rempli au maximum. Il n'a également d'intérêt que dans le cas d'un stock à tiroirs.

Avant d'évaluer le lot optimal pour le cadencement du stock 2 ou avant de choisir l'élément à faire passer pour le reséquenceur du stock 3, tous les premiers éléments de chaque rail sont comparés à tous les autres éléments du stock. Si un élément a un retard supérieur à l'un des premiers, ils échangent leurs ordres de commande, figure 3.3.

## 3.2 Comparaison des deux types d'échange

Cette section s'attache à comparer les deux types d'échange dans le cas de stocks à tiroirs et pour le cadencement du stock 2. Le stock 1 est fixé à 10 rails de taille 10. La taille des rails du stock 2 est une variable en jeu.

Trois séquences de production sont évaluées en sortie du stock 2. La première séquence ne subit aucun échange. Les deux autres subissent chacune l'un des deux échanges. Leur comparaison relative avec la première est donnée par la figure 3.4 pour un stock 2 de 5 rails. Les résultats absolus sont donnés dans les figures II.1 et II.2 pour un stock 2 de 5 et 10 rails.

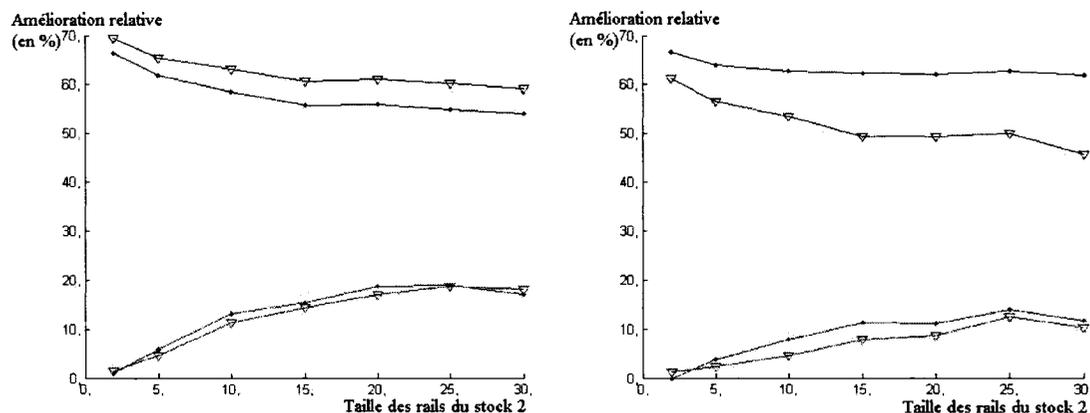


Figure 3.4: Amélioration relative des retards (points) et avances (triangles) cumulés (à gauche) et maximaux (à droite) à 95% apportée par l'échange limité au stock (en bas) ou par l'échange global (en haut) en fonction de la taille des 5 rails du stock 2.

Il y a une différence nette sur la figure 3.4. L'amélioration apportée par le deuxième échange atteint un maximum à 19.1%, et ceci pour les quatre indicateurs de retards et avances cumulés et maximaux à 95%. Elle est croissante avec la taille des rails. L'amélioration obtenue avec le premier échange considéré se situe quant à elle entre 45.8% et 69.5%. Lors d'un échange global, l'amélioration sur les avances cumulées est supérieure à celle pour les retards cumulés alors que c'est le contraire pour les valeurs maximales. Cette dernière est décroissante avec la taille des rails.

Dans le cas à 10 rails, figure II.2, les propriétés de croissance sont semblables. Par contre, le deuxième échange donne des retards et des avances cumulés à 95% plus faibles que le premier échange à partir de 15 places. Pour les valeurs max-

imales, les retards sont déjà meilleurs à partir de 6 places mais les avances ne le sont pas en dessous de 15 places. Les courbes indiquent néanmoins que les avances maximales à 95% tendent à être meilleures pour des valeurs plus grandes.

Ce phénomène peut s'expliquer. Le deuxième échange considère tous les éléments du stock alors que le premier échange ne considère à chaque itération que la liste en amont. Pour une taille de stock infinie, il considère donc plus d'éléments. Il doit exister une taille de stock, dépendant du nombre de rails, au delà de laquelle le deuxième échange est meilleur que le premier sur les 4 critères. En tout cas, cette limite n'est pas atteinte avec 5 rails pour une taille de stock raisonnable.

Bien que peut-être plus facile en pratique, le deuxième échange est moins efficace pour un nombre de rails et une taille de stock raisonnables. Le premier type d'échange sera donc employé dans la suite. Il faut maintenant étudier l'influence de l'introduction de cette différenciation retardée en différents points de la chaîne.

### **3.3 Introduction de la différenciation avant le cadencement de la peinture**

Cette partie étudie l'introduction du premier point de différenciation, avant le stock 2 de cadencement. Il y aura échange de deux ordres de commande si deux véhicules présentent la même carrosserie et si l'ordre de précedence n'est pas celui donné par la liste initiale. L'attention porte sur les avances et les retards cumulés et maximaux en entrée du stock 2. Deux types de stocks sont toujours considérés.

Les simulations réalisées permettent de comparer une séquence de production subissant l'échange considéré et une séquence n'en subissant aucun.

### 3.3.1 Stock à accès direct pour le cadencement du ferrage

La figure 3.5 représente les améliorations relatives apportées par l'introduction du premier point de différenciation, pour différentes tailles du stock 1 à accès direct. La figure II.3 représente les valeurs absolues.

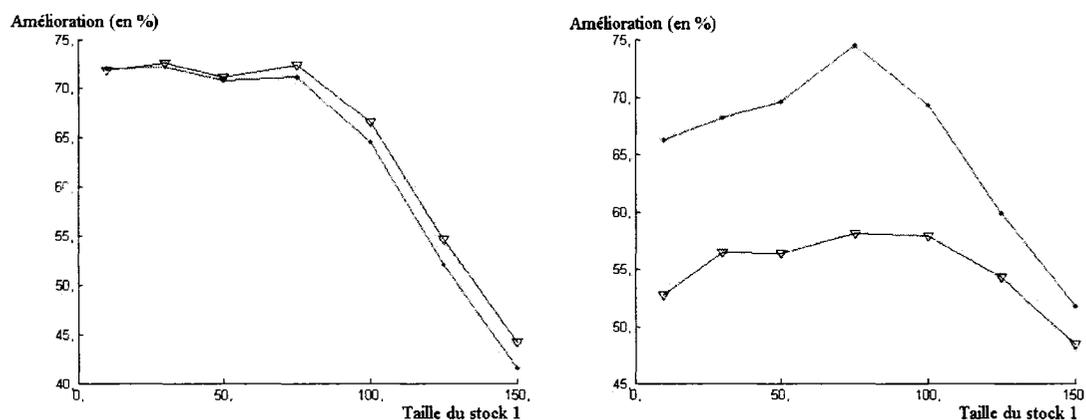


Figure 3.5: Améliorations relatives des retards (points) et avances (triangles) cumulés (à gauche) et maximaux (à droite) à 95% apportées par des échanges d'ordres de commande avant le stock 2 en fonction de la taille du stock 1 à accès direct.

Les quatre indicateurs présentent dans la figure 3.5 une diminution de plus de 40%. Une diminution de plus de 57% est même atteinte pour les avances maximales à 95% et de plus de 72% pour les trois autres.

Le bénéfice de cette introduction pour les avances et les retards cumulés (figure de gauche) est d'autant plus grand que la flexibilité des stocks est faible, si ce n'est quelques variations qui doivent provenir des incertitudes du système. La différenciation retardée à ce niveau de la ligne d'assemblage paraît donc limiter grandement les avances et les retards générés par le cadencement. Il faut regarder s'il en est de même pour un stock à tiroirs.

### 3.3.2 Stock à tiroirs pour le cadencement du ferrage

Dans le même contexte qu'un stock 1 à accès direct, les améliorations relatives apportées par l'introduction du premier point de différenciation sont évaluées pour un stock 1 à tiroirs. Les résultats sont présentés sur les figures 3.6 pour 5 tiroirs, II.4 pour 10 tiroirs et II.5 pour 15 tiroirs.

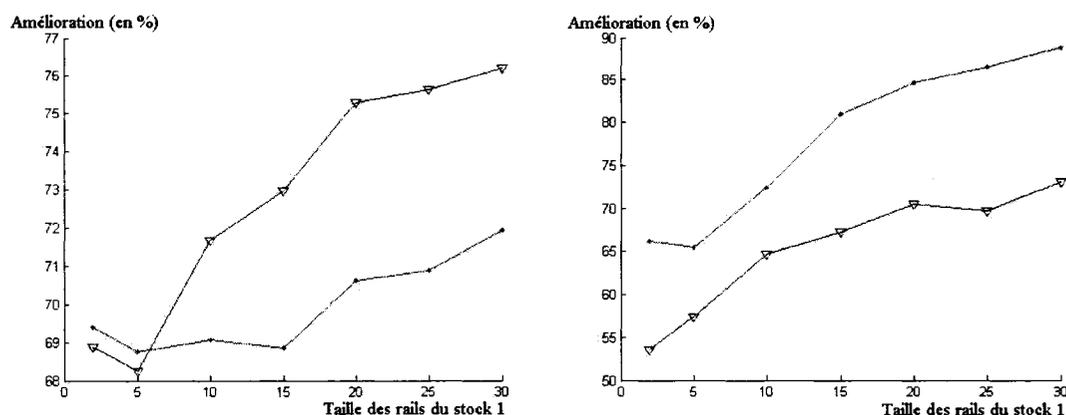


Figure 3.6: Améliorations relatives des retards (points) et avances (triangles) cumulés (à gauche) et maximaux (à droite) à 95% apportées par des échanges d'ordres de commande avant le stock 2 en fonction de la taille des 5 rails du stock 1.

Dans le cas à 5 rails, figure 3.6, les améliorations apportées sont plus grandes que dans le cas à accès direct, sauf pour les retards et les avances cumulés à 95% pour une taille de stock inférieure ou égale à 75 places. Pour une taille de stock de 150 places, les améliorations dépassent 72% sur tous les indicateurs. Elles atteignent même plus de 88% pour les retards maximaux à 95%.

L'amélioration semble globalement croissante en fonction de la taille des rails. Cette dernière observation est également valable pour les cas à 10 et 15 rails, figures II.4 et II.5. La comparaison des figures en fonction du nombre de rails indique que l'amélioration a tendance à décroître lorsque le nombre de rails aug-

mente. L'amélioration relative est donc d'autant meilleure que la flexibilité du stock à tiroirs est faible. Le cas à accès direct présente un comportement bien différent. Il n'est pas possible de tirer des informations supplémentaires de la comparaison avec celui-ci.

Il est maintenant clair que l'introduction du premier point de différenciation apporte une diminution conséquente des indicateurs de performance choisis ici. Il est alors légitime de se demander s'il en est de même pour le deuxième.

### **3.4 Introduction de la différenciation avant le reséquencement**

Cette partie introduit un point de différenciation pour les contraintes liées au montage. Il y aura échange de deux ordres de commande s'il existe des véhicules ayant la même carrosserie et la même couleur de peinture et dont l'ordre de précedence n'est pas l'ordre initial de la LUO. L'attention porte sur les avances et les retards cumulés et maximaux en entrée du stock 3 et deux types de stocks sont toujours considérés. Meilleures seront les améliorations apportées, plus facile sera le reséquencement.

Les simulations réalisées dans cette partie permettront la comparaison de trois situations: la séquence de production ne subit aucun échange d'ordres de commande, la séquence de production subit un échange au deuxième point de différenciation ou elle en subit aux deux points de différenciation.

### 3.4.1 Stock à accès direct pour le cadencement de la peinture

Dans un premier temps, le stock 2 de cadencement fonctionne à accès direct et sa capacité est une variable en jeu. Le stock 1 de cadencement avant le ferrage est un stock à accès direct d'une capacité de 100 véhicules. Le gain relatif de la différenciation retardée est obtenu par comparaison des trois situations. Il est évalué à partir des avances et des retards cumulés et maximaux dans la figure 3.7. Les valeurs absolues des trois situations sont également représentées dans la figure II.6.

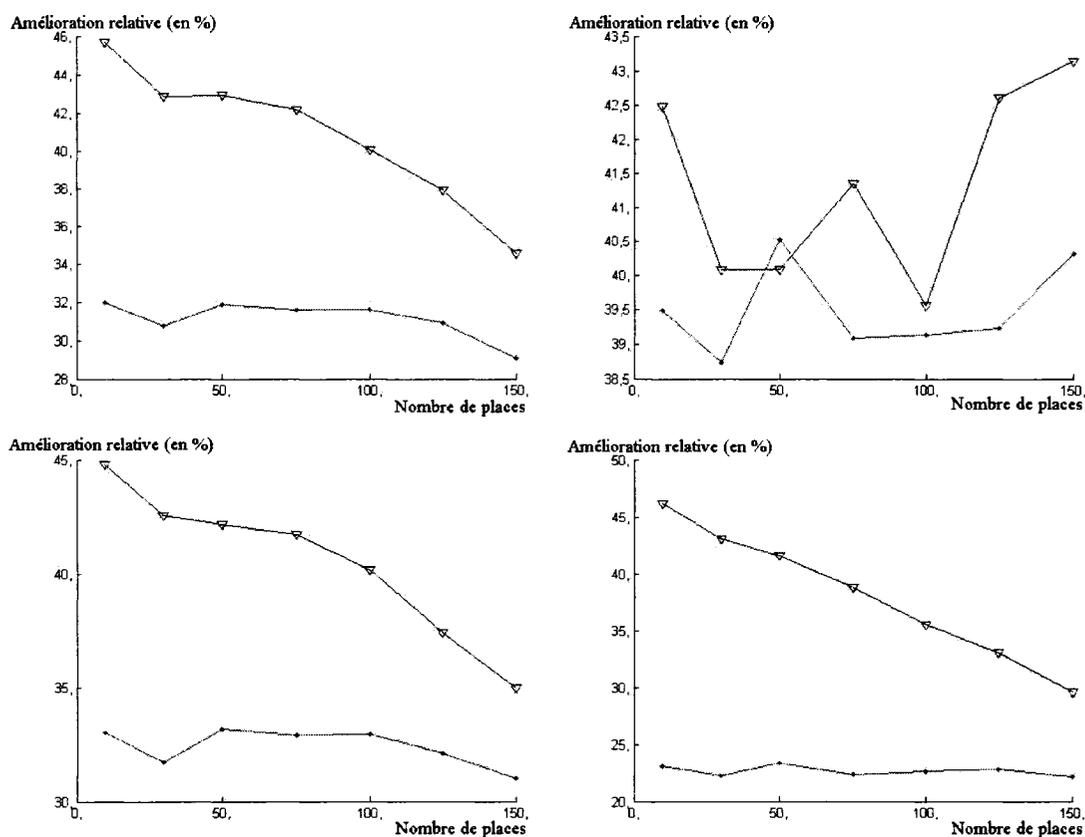


Figure 3.7: Améliorations relatives des avances (en bas) et retards (en haut) cumulés (à gauche) et maximaux (à droite) à 95% avec un échange après l'atelier de peinture (points) ou avec deux échanges (triangles) par rapport à la situation sans échange en fonction de la taille du stock 2 à accès direct.

La figure 3.7 montre que les bénéfices sont meilleurs avec deux échanges sauf dans le cas où la taille du stock est de 50 places et seulement pour le retard maximal à 95% (mais les valeurs avec un ou deux échanges ne diffèrent que de moins de 0.5%). Les perturbations de l'atelier de peinture introduisent dans les simulations une incertitude suffisante qui modifie la répartition des retards, ce qui explique ce phénomène. Sur les avances et les retards cumulés, l'amélioration apportée par un deuxième échange se situe entre 3.7% et 13.8% supplémentaires. Il est déjà clair que l'introduction d'un deuxième échange est également intéressante.

### 3.4.2 Stock à tiroirs pour le cadencement de la peinture

La simulation prend un stock 1 à 10 tiroirs de 10 places et un stock 2 à tiroirs de taille variable. La comparaison des trois situations citées est présentée dans la figure 3.8 pour 5 rails et également en annexe dans les figures II.7 et II.8 pour 10 rails. Les valeurs absolues sont également données dans les figures II.9 et II.10.

Les bénéfices sont semblables au cas à accès direct. L'introduction de deux échanges apporte des améliorations par rapport à la situation avec un seul échange de plus de 9% sur les avances et les retards cumulés et de plus de 18% sur les avances maximales, figure 3.8. Pour le retard maximal à 95% par contre, aucune amélioration supplémentaire n'est introduite avec le deuxième échange pour une taille de rails de 10 ou de 25. Des considérations semblables au cas à accès direct peuvent être faites quant aux incertitudes dans le modèle.

Ces incertitudes empêchent de déterminer le comportement des indicateurs concernés. Cependant, en regardant les améliorations sur les avances et les retards cumulés, il est possible de voir que l'apport d'un deuxième point de différenciation est indéniable. Quelle est ensuite l'influence de ces points de différenciation sur ces

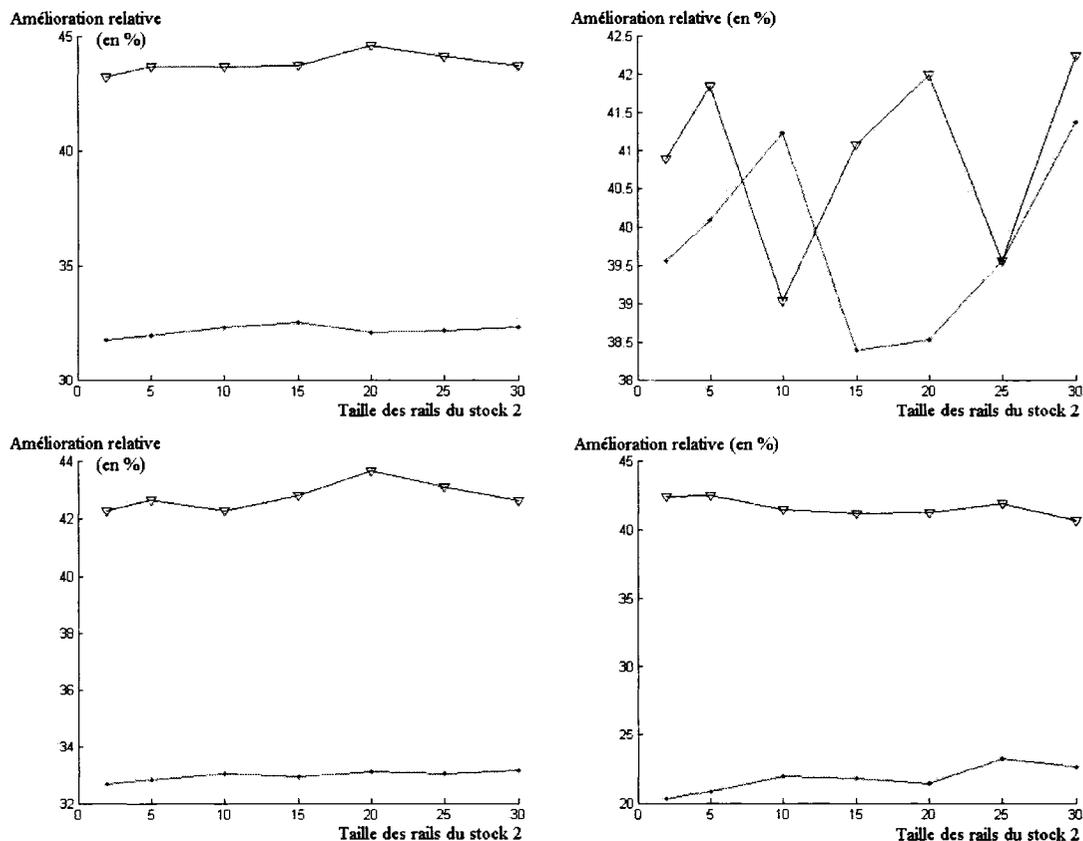


Figure 3.8: Amélioration relative des retards (en haut) et avances (en bas) cumulés (à gauche) et maximaux (à droite) à 95% avec un échange après l'atelier de peinture (points) ou avec deux échanges (triangles) par rapport à la situation sans échange en fonction de la taille des 5 rails du stock 2.

indicateurs en entrée de montage? La prochaine et dernière section de ce chapitre s'y intéresse.

### 3.5 Répartition des retards en entrée de montage

Dans les sections 3.4.1 et 3.4.2, l'effet immédiat de la différenciation retardée a été mis en valeur après chaque point de différenciation. Mais il est encore plus intéressant de savoir ce qu'il se passe à l'entrée du montage. C'est à cet endroit

que les différences avec la liste unique ordonnancée initiale (LUO) doivent être minimisées pour satisfaire les contraintes de production synchrone. Cette partie y montre donc la répartition des retards. De la même manière que pour la figure 2.8, la taille des stocks est ici de 150 places pour les deux premiers et de 100 places pour le dernier. Une première section développera le cas à accès direct et une deuxième section le cas à 5 tiroirs.

### 3.5.1 Stocks à accès direct

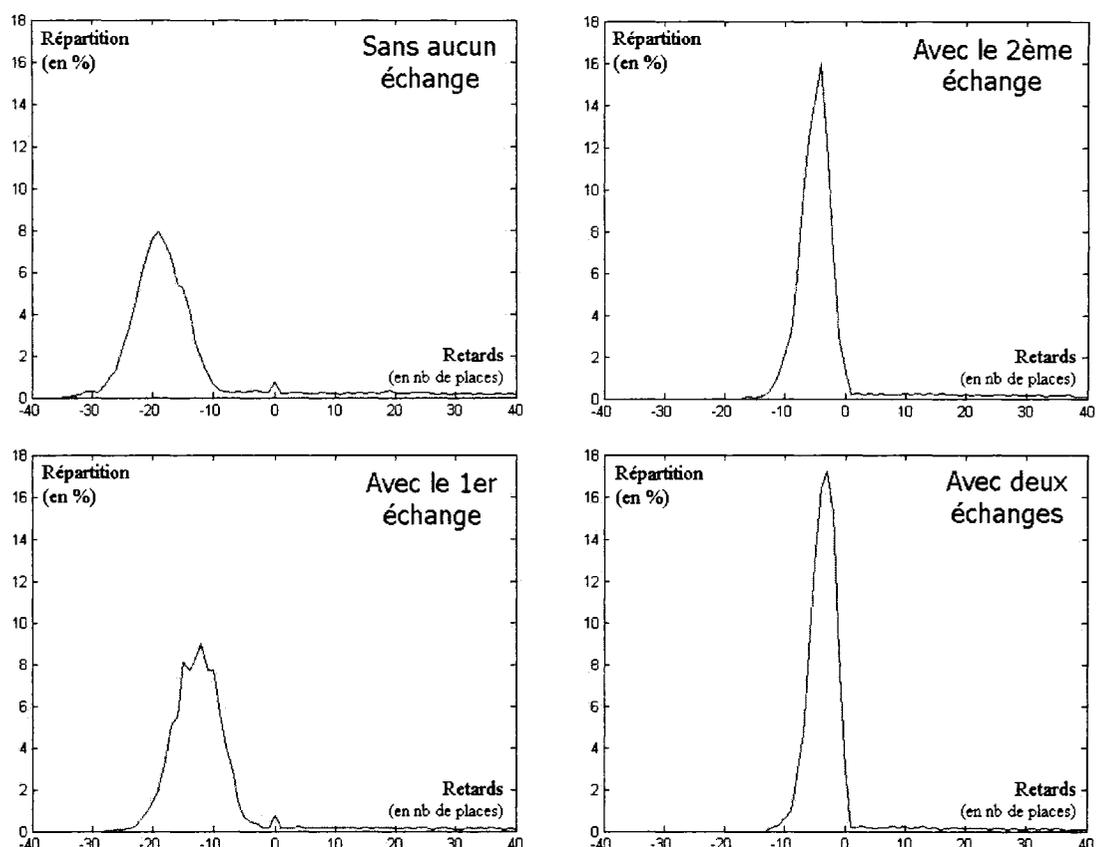


Figure 3.9: Répartition des retards en entrée du montage en fonction de l'intervention ou non d'échanges de propriétaires au niveau des deux points de différenciation. Stocks à accès direct.

La répartition des retards pour les tailles de stocks données est présentée en figure

3.9 en fonction de l'utilisation ou non de la différenciation retardée. Dans ce cas, les trois stocks sont à accès direct.

La répartition obtenue sans aucune différenciation retardée est la même que celle de la figure 2.8 mais avec une échelle différente.

La figure 3.9 montre que l'introduction du deuxième point de différenciation a un effet avant le montage bien plus important que l'introduction du premier et que l'amélioration apportée par le premier échange est relativement meilleure lorsqu'il n'y a pas de deuxième échange. Les meilleurs résultats sont bien évidemment obtenus lorsque les deux sont mis en place. Chacune de leur introduction est donc justifiée.

### 3.5.2 Stocks à 5 tiroirs

La taille des stocks est ici de 5 rails de 30 places pour les deux premiers et de 5 rails de 20 places pour le dernier (la taille globale des stocks est la même qu'en 3.5.1). La répartition des retards est alors présentée en figure 3.10.

Les deux courbes correspondantes aux situations avec un seul échange sont fortement semblables. De la même manière que pour le stock à accès direct, la répartition est tout de même meilleure avec le deuxième échange qu'avec le premier: le retard au pic de la répartition est plus proche de zéro et les retards de plus de 150 places sont moins nombreux. Il apparaît en tout cas une nette amélioration lorsque les deux échanges ont lieu. Par contre, l'amélioration apportée par la différenciation retardée est plus faible que dans le cas d'un stock à accès direct; elle est sans doute minimisée par le reséquencement du stock 3 à tiroirs qui engendre un étalement inévitable des retards.

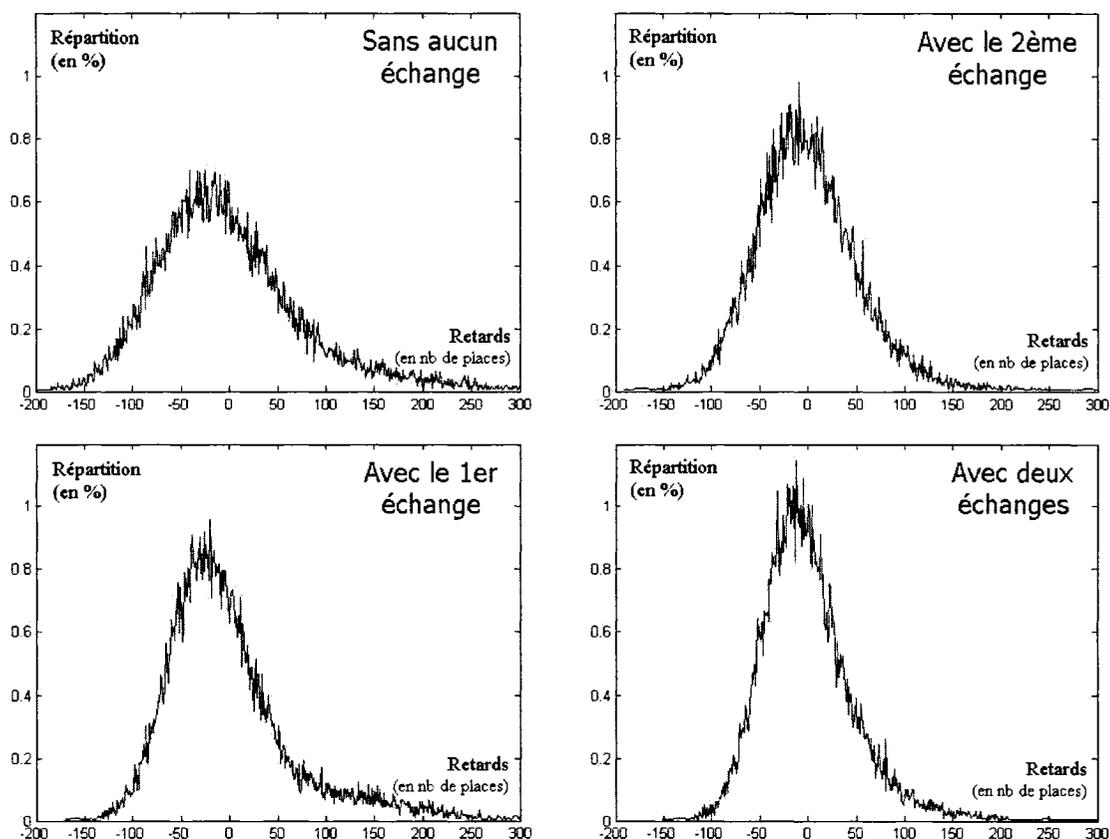


Figure 3.10: Répartition des retards en entrée du montage en fonction de l'intervention ou non d'échanges de propriétaires au niveau des deux points de différenciation. Stocks à 5 rails.

### 3.6 Conclusion

Ce chapitre montre que la différenciation retardée permet de limiter les retards et les avances de la séquence de production à l'entrée du montage. Il apparaît clairement que les améliorations sont conséquentes. L'incertitude dans le modèle provoque néanmoins des résultats inattendus. Il est nécessaire d'étudier ce modèle plus en profondeur. Pour ce faire, un plan d'expériences sera développé dans le chapitre 4.

## CHAPITRE 4

### PLAN D'EXPÉRIENCES

Pour déterminer l'influence de différents paramètres en intégrant la différenciation retardée et de la façon la plus simple possible, il suffit de ne faire varier qu'un seul paramètre à la fois comme au chapitre 3. Mais le nombre d'expériences à réaliser devient vite gigantesque. Pour trois paramètres de 6 valeurs différentes, cela fait déjà  $6^3 = 216$  expériences! Des contraintes de coût et de temps rendent souvent impossible la réalisation de toutes les expériences nécessaires. La technique des plans d'expériences propose alors de se limiter à une partie seulement de ces expériences mais permet tout de même d'en tirer des informations sur l'influence des différents paramètres.

Ce chapitre s'inscrit dans cette volonté d'obtenir de meilleurs résultats sur la performance de la gestion des stocks en prenant en compte les différents paramètres en jeu. Il répondra également à l'objectif de ce mémoire de façon plus précise que le chapitre précédent. Cet objectif est toujours la détermination du gain de l'introduction de la différenciation retardée sur des indicateurs de performance convenablement choisis. Plusieurs parties seront développées: les variables ainsi que les indicateurs de performance seront tout d'abord choisis en 4.1. Cette section trouvera également un plan d'expériences adéquat. La section 4.2 analysera ensuite les résultats obtenus par ce plan.

## 4.1 Détermination des différents paramètres

### 4.1.1 Détermination des variables

Les chapitres précédents indiquent qu'il y a 8 variables dont le rôle est important ici:

- la taille  $s_1$  du stock 1,
- la taille  $s_2$  du stock 2,
- la taille  $s_3$  du stock 3,
- le nombre de rails  $r_1$  du stock 1 (si ce nombre est  $s_1$ , le stock est à accès direct),
- le nombre de rails  $r_2$  du stock 2,
- le nombre de rails  $r_3$  du stock 3,
- l'emploi ou non de la différenciation retardée au niveau du 1<sup>er</sup> point de différenciation,  $d_1 \in \{0, 1\}$ ,
- l'emploi ou non de la différenciation retardée au niveau du 2<sup>ème</sup> point de différenciation,  $d_2 \in \{0, 1\}$ .

Le but de cette partie est de déterminer le nombre de modalités de chacun des paramètres de façon à trouver un plan d'expériences réalisable.

En ce qui concerne  $r_i$ , le nombre de rails du stock  $i$ , trois modalités vont être considérées: 5, 10 ou  $s_i$ . Cette dernière valeur est variable. Elle correspond au cas à accès direct. Les variables de différenciation retardée  $d_1$  et  $d_2$  auront quant à elles

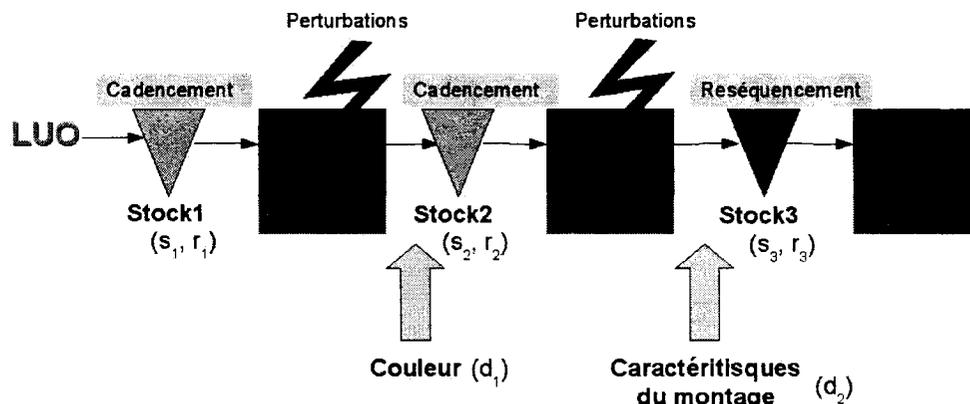


Figure 4.1: Modélisation de la chaîne avec les deux points de différenciation.

deux modalités: 1 si la différenciation retardée est employée et 0 sinon.

Pour la taille des stocks, un premier essai est effectué avec six tailles de stocks: 20, 40, 70, 100, 130 et 160. Six est un multiple du nombre de modalités des autres variables; cela permet de réduire le nombre d'expériences à réaliser. S'il fallait réaliser toutes les expériences, il y aurait  $2^2 * 3^3 * 6^3 = 23328$  combinaisons différentes (plan factoriel complet). Ce serait impossible à réaliser d'autant plus que chaque expérience sera répétée une dizaine de fois: à raison d'approximativement 1200 secondes par expérience (sur Centrino 1.5GHz avec 512Mo de Ram), le temps de calcul total serait d'environ 3240 jours. Il est alors possible de trouver de façon empirique un plan de 1296 expériences, ce qui restreint le temps de calcul à 180 jours. Il vient alors l'idée de changer de nombre de modalités.

Au lieu d'en prendre six, un deuxième plan d'expériences va être recherché avec neuf modalités pour ces trois variables. Les valeurs 20, 30, 40, 50, 70, 90, 110, 130 et 150 sont choisies. Un plan orthogonal comprenant seulement 324 expériences est trouvé. L'ordre de grandeur du temps de calcul pour répéter 10 fois ce plan d'expériences est alors estimé à 45 jours.

Le but étant d'évaluer l'effet de la différenciation retardée, il est important de partir de la même liste initiale et de faire subir les mêmes perturbations au niveau des ateliers de ferrage et de peinture aux différentes listes engendrées, en fonction des valeurs de  $d_1$  et  $d_2$ . Il est également possible de regrouper des expériences ayant d'autres calculs en commun pour diminuer le temps de calcul: le gain est sans aucun doute de plus de 50%, ce qui le ramène à moins de 3 semaines. Cette durée est raisonnable, d'autant plus que ce n'est qu'un ordre de grandeur majorant.

Pour des tailles de  $s_1, s_2, s_3, r_1, r_2, r_3$  données (81 possibilités, voir tableau III.1), il y aura alors 4 choix possibles pour les variables  $d_1$  et  $d_2$  réunies. La figure III.1 présente les avances cumulées moyennes (à 95%) obtenues avec les expériences où le stock 1 est de 90 ou de 110 places et la taille du stock 2 est variable. Il y a une variabilité très importante. Il n'est pas possible de déterminer si cette dernière est due à la dépendance des deux variables  $s_1$  et  $s_2$  ou à l'incertitude dans le modèle. L'indépendance des paramètres reste indéterminée. Ce plan d'expériences n'est donc peut-être pas orthogonal mais il permettra néanmoins d'avoir des résultats plus conséquents que le chapitre 3. Il sera employé dans la suite. Il ne reste plus qu'à préciser comment évaluer les différentes expériences.

#### 4.1.2 Détermination des indicateurs de performance

L'objectif du problème traité est de faire le moins de lots possible, pour le ferrage et pour la peinture, mais également de retrouver la liste initiale (LUO). De ce fait, les indicateurs de performance considérés ici sont le nombre de lots formés par le stock 1, le nombre de lots formés par le stock 2 et les retards cumulés, avances cumulées, retards maximaux et avances maximales à 95% au niveau de l'entrée du montage. Ces six indicateurs de performance sont à minimiser.

## 4.2 Analyse des résultats

Le plan d'expériences étant établi, les simulations ont été séparées et lancées sur plusieurs ordinateurs dont un centrino 1.5GHz avec 512Mo de Ram et un pentium 4 à 3GHz avec 512 Mo de Ram. Le temps de calcul total a été d'un peu moins de deux semaines.

Pour chaque variable, les expériences avec chacune des modalités sont isolées. La moyenne par modalité est ensuite calculée pour tous les indicateurs. Les résultats sont présentés par variable dans les figures III.2 pour  $s_1$ , III.3 pour  $s_2$ , III.4 pour  $s_3$ , III.5 pour  $r_1$ , III.6 pour  $r_2$ , III.7 pour  $r_3$  et 4.2 pour les deux dernières variables de différenciation retardée  $d_1$  et  $d_2$  réunies. Les courbes avec triangles présentent la moyenne sur les expériences considérées alors que les courbes avec points en donnent l'écart type.

### 4.2.1 Taille de stocks

Sur la figure III.2 (respectivement III.3), le nombre de lots formés par le stock 1 (resp. le stock 2) décroît avec  $s_1$  (resp.  $s_2$ ). Les avances et les retards cumulés à 95% semblent être globalement croissants (en valeur absolue) avec  $s_1$  (resp.  $s_2$ ). Mais une certaine variabilité est toujours présente. Elle empêche de conclure à une monotonie stricte.

Il est également possible de voir que les avances et les retards maximaux à 95% sont croissants (en valeur absolue) avec  $s_2$  dans la figure III.3. Une croissance avec  $s_1$  est beaucoup moins visible dans la figure III.2.

Pour la taille  $s_3$  du stock 3, figure III.4, la variabilité est moindre. Les avances et les retards cumulés à 95% sont nettement décroissants (en valeur absolue). Les retards maximaux sont également décroissants. Par contre, les avances maximales sont presque constantes.

D'après la construction du modèle, il est évident que le nombre de lots de carrosseries est indépendant de  $s_2$  et  $s_3$ . Il en est de même pour le nombre de lots de couleurs et  $s_3$ . Les résultats en figure III.4 semblent aller dans ce sens même si les nombres de lots présentent une grande variabilité.

#### 4.2.2 Type de stocks

La figure III.5 montre sans ambiguïté que plus le stock 1 est flexible (nombre de rails croissant), plus grands sont les avances cumulées, les retards cumulés, les écarts types associés et les avances maximales (en valeur absolue). Des considérations identiques peuvent être faites pour le stock 2 dans la figure III.6.

Ces relations sont inversées pour le stock 3 dans la figure III.7. Par contre, les retards maximaux ont un comportement plutôt stable pour les trois types de stocks. Cela rejoint certains résultats du chapitre 3 où les retards maximaux n'avaient pas de comportement clair et identifiable.

D'autre part, le nombre de lots formés par un stock diminue fortement avec sa flexibilité. Pour chacun des trois stocks, leur flexibilité est également indépendante du nombre de lots formés par un autre stock de cadencement. Cela est en accord avec les hypothèses du modèle.

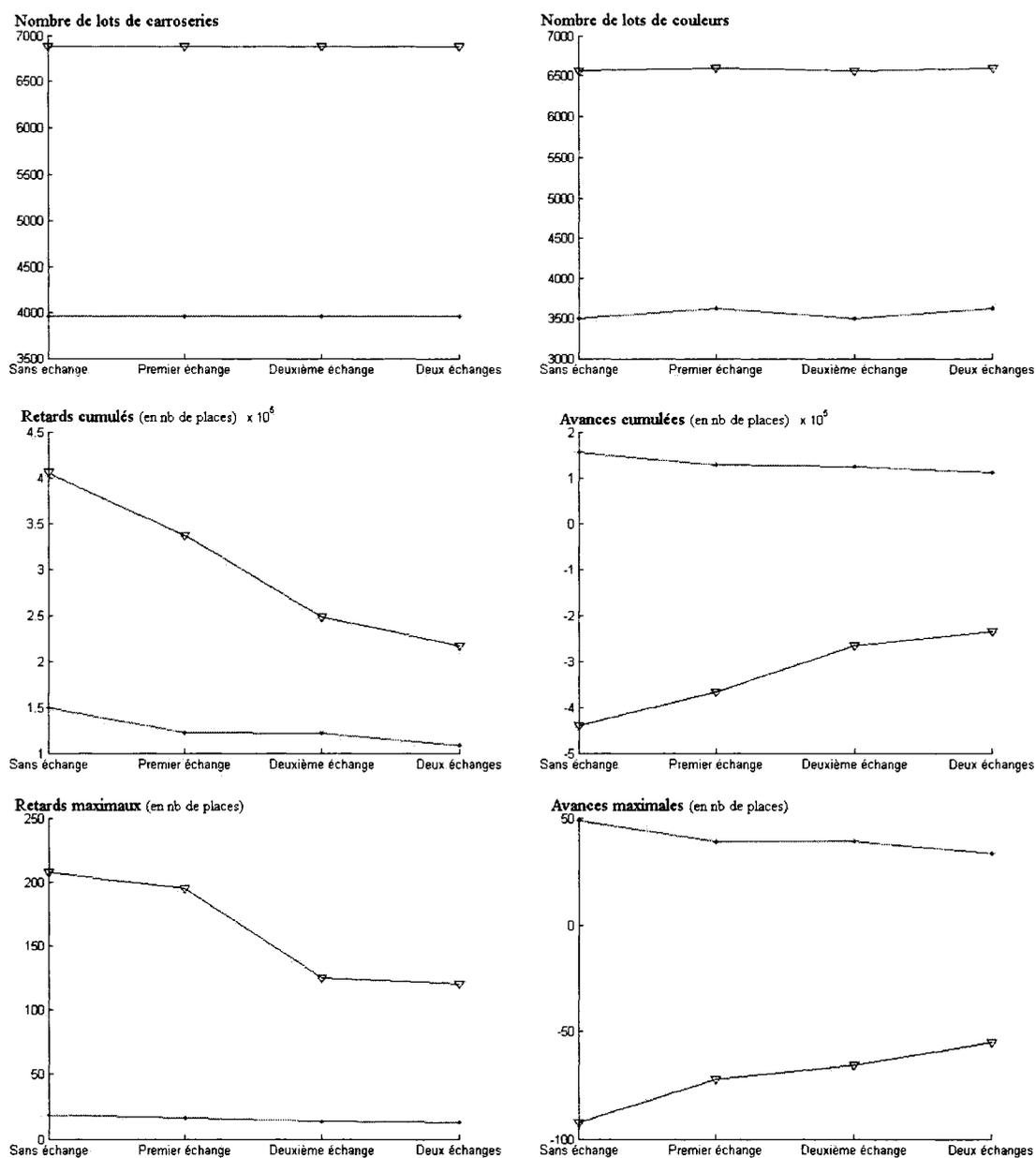


Figure 4.2: Évolution des indicateurs de performance choisis au chapitre 4 en fonction de l'emploi ou non de la différenciation retardée aux deux points de différenciation.

### 4.2.3 Introduction de la différenciation retardée

Pour l'introduction de la différenciation retardée à la figure 4.2 les résultats sont sans appel. Chacun des points de différenciation diminue les retards et les avances cumulés et maximaux à 95% (en valeur absolue) ainsi que les écarts types associés. Avec l'introduction des deux points simultanément, les améliorations apportées se situent entre 39.70 et 46.55% pour les moyennes présentées. Les améliorations se situent en fait entre 19.22 et 89.57% suivant les différentes valeurs de tous les paramètres.

Les nombres de lots ne sont quant à eux pas perturbés. Cela confirme une remarque qui a déjà été établie: les capacités de cadencement ne sont pas affectées par l'introduction de la différenciation retardée car les caractéristiques des véhicules ont été supposées indépendantes deux à deux.

Il est aussi intéressant de noter que l'introduction du deuxième point seul apporte des améliorations beaucoup plus grandes que l'introduction du premier.

## 4.3 Conclusion

L'introduction de la différenciation retardée est très intéressante car elle améliore non seulement la moyenne des quatre derniers indicateurs de façon considérable mais également leur écart type. Elle est d'autant plus intéressante qu'elle coûterait beaucoup moins cher que l'augmentation de la flexibilité des stocks par leur taille ou par leur type d'accès.

## CONCLUSION

Dans le cadre de la personnalisation de masse sur des chaînes d'assemblage de type automobile, ce mémoire a présenté l'introduction de la différenciation retardée et en a évalué les bénéfices sur divers indicateurs de performance.

Un premier chapitre a présenté un état de l'art de principes largement employés sur des chaînes multi-produits, à savoir le séquençement, le cadencement, le reséquençement et la différenciation retardée.

Un modèle d'une telle chaîne a ensuite été introduit au chapitre 2. Le séquençement initial a été supposé préétabli. Cette étude s'est attachée à déterminer les paramètres du modèle de la façon la plus pertinente possible en ce qui concerne le cadencement, les perturbations qui peuvent apparaître au sein des ateliers, le reséquençement en entrée de montage et les indicateurs de performance. Deux types de stocks ont d'ailleurs été considérés: à accès direct et à tiroirs. Des critères de choix et des métriques ont été choisis par compromis entre la volonté de former le moins de lots possible et celle de ne pas trop perturber la séquence de production. Quelques remarques permettant de valider ce modèle ont été présentées en fin de chapitre.

Le chapitre 3 a introduit la différenciation retardée en deux points de la ligne. Après avoir défini la façon de procéder à des échanges d'ordres de commande entre deux véhicules, cette étude montre que l'introduction au niveau du deuxième point est plus efficace qu'au niveau du premier. Il est néanmoins clair que les deux apportent des améliorations substantielles. La meilleure situation se trouve bien sûr lorsque la différenciation retardée est introduite simultanément aux deux points.

Dans le cas de stocks à tiroirs, l'amélioration apportée est d'autant plus grande que la flexibilité des stocks est faible. Mais les résultats présentent une grande variabilité. Ils n'apportent pas de certitudes.

Un dernier chapitre tente alors d'établir des résultats plus fiables. Il détaille un plan d'expériences reproduit dix fois. Après avoir correctement choisi huit variables et six indicateurs de performance liés à ce problème précis, les résultats sont présentés par variable selon les différentes modalités. Les améliorations relatives apportées par l'introduction de deux points de différenciation se situent en moyenne pour cette variable entre 39.70 et 46.55%. Elles sont entre 19.22 et 89.57% suivant les valeurs de toutes les variables. L'apport de la différenciation retardée est donc indéniable. Elle paraît indispensable car son introduction est facile, ne coûte pas cher et permet une augmentation de flexibilité immédiate qui engendre une diminution des coûts. Il faut néanmoins que la résistance au changement ne soit pas trop forte.

Ce modèle donne des résultats satisfaisants. Il serait cependant possible de l'affiner. Certaines hypothèses pourraient être différentes. Une étude détaillée de l'influence des différentes métriques et des différents critères de choix dans les stocks tampons permettrait d'obtenir de meilleurs résultats.

La connaissance de davantage de données réelles serait également bénéfique. Les perturbations et les échanges de propriétaires pourraient être encore mieux modélisés. D'autres aspects du modèle pourraient subir des modifications. Les caractéristiques des différents véhicules ont été supposées indépendantes: la carrosserie, la couleur de peinture et les caractéristiques liées au montage (autres options du véhicule). Si ce n'est pas le cas, il est possible dans certains cas de changer les propriétés considérées pour arriver à un jeu de propriétés indépendantes. Les résultats

seraient semblables. Mais cela n'est pas possible dans tous les cas. Il faudrait alors étudier l'évolution des retards et des avances avec l'introduction de la différenciation retardée lorsque les caractéristiques ne sont pas indépendantes.

Le modèle fixe également 10 types de carrosseries ou 10 couleurs de peinture. D'autres nombres auraient pu être considérés. De même, une gestion des stocks plus dynamique aurait été possible. Il est clair que le changement de tels paramètres rendrait possible la résolution d'un problème réel d'usine.

Un élargissement de cette approche pourrait ensuite mener à la production à la commande virtuelle par la modification des points d'entrée des commandes. Les cibles sont les systèmes productifs où la fabrication à la commande n'est pas encore prépondérante. Cela permettrait d'engendrer une meilleure gestion des commandes de véhicules et une réduction des délais.

Il serait également intéressant de travailler sur l'implantation de la différenciation retardée au niveau opérationnel, avec des puces RFID par exemple, et sur la gestion des échanges d'ordres de commande au niveau des systèmes ERP des entreprises. Il faut par exemple que le temps d'évaluation de l'échange à réaliser plus le temps de choix du véhicule (pour le cadencement ou le reséquencement) soit inférieur au temps de cadence de la chaîne (takt time). L'intégration de règles simples applicables par des opérateurs et en rapport avec la différenciation retardée est également envisageable.

Ce modèle est une bonne base pour des études futures. Quelques petites modifications pourraient amener des résultats assez rapidement. Le seul inconvénient est le temps de calcul de chaque expérience. L'optimisation des algorithmes et une plus grande rapidité informatique apporteraient des améliorations significatives.

## RÉFÉRENCES

AGARD, B., TOLLENAERE, M., (2002), Conception d'assemblages pour la customisation de masse, *Mécanique et Industrie*, Vol. 3, P. 113-119.

AGARD, B., (2002), Contribution à une méthodologie de conception de produits à forte diversité, 142 p., Thèse de Doctorat, *Institut National Polytechnique de Grenoble*.

AGRAWAL, M., KUMARESH, T.V., (2001), The false promise of mass customization, *McKinsey Quarterly*, Vol. 3, P. 62-71.

ALDERSON, W., (1950), Marketing efficiency and the principle of postponement, *Cost and Profit Outlook*, Vol. 3, N. 4.

BARATOU, P., (1998), Gestion réactive des stocks intermédiaires d'un flux de production automobile, 193 p., Thèse de Doctorat, *Université des Sciences et Technologies de Lille, Laboratoire d'Automatique et Informatique Industrielle*.

BAUTISTA, J., COMPANYS, R., COROMINAS, A., (1996), Heuristics and exact algorithms for solving the Monden Problem, *European Journal of Operational Research*, Vol. 88, P. 101-113.

BAUTISTA, J., COMPANYS, R., COROMINAS, A., (2000), Note on cyclic sequences in the product rate variation problem, *European Journal of Operational Research*, Vol. 124, P. 468-477.

BEAMON, B.M., (1999), Measuring supply chain performance, *International Journal of Operations and Production Management*, Vol. 19, N. 3, P. 275-292.

BEATY, S.J., (1992), Genetic Algorithms for Instruction Sequencing and Scheduling, *Workshop on Computer Architecture Technology and Formalism for Computer Science Research and Applications*, December.

BERGEN, M.E., VAN BEEK, P., CARCHRAE, T., (2001), Constraint-based vehicle assembly line sequencing, *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 2056, P. 88-99.

BERNIER, V., (2000), Sur une nouvelle politique de gestion des flux, le cadencement reséquençable, 118 p., Thèse de Doctorat, *Institut National Polytechnique de Grenoble*.

BOLAT, A., (1994), Sequencing jobs on an automobile assembly line: objectives and procedures, *International Journal of Production Research*, Vol. 32, N. 5, P. 1219-1236.

BRABAZON, P.G., MACCARTHY, B., (2004), Virtual-Build-to-Order as a mass customization order fulfilment model, *Concurrent Engineering: Research and Applications*, Vol. 12, N. 2.

BUCKLIN, L.P., (1965), Postponement, Speculation and the Structure of Distribution Channels, *Journal of Marketing Research*, Vol. 2, February, P. 26-32.

BULLOCK, P.J., (9 août 2002), Knowing when to use postponement, *International logistics*, première soumission.

DANJOU, F., GIARD, V., LE ROY, E., (1999), Analyse de la robustesse des ordonnancements/réordonnancements sur ligne de production et d'assemblage dans l'industrie automobile, *GREGOR, IAE de Paris*, Vol. 05.

DANJOU, F., GIARD, V., BOCTOR, F., (1999), Analyse théorique des décyclages sur ligne de production, *GREGOR, IAE de Paris*, Vol. 08.

- DANJOU, F., GIARD, V., (1999), Indicateur de performance et stocks de sécurité de composants optionnels, sur ligne de production perturbée, *GREGOR, IAE de Paris*, Vol. 14.
- DING, F.-Y., CHENG, L., (1993), An effective mixed-model assembly line sequencing heuristic for Just-In-Time production systems, *Journal of Operations Management*, Vol. 11, P. 45-50.
- DING, F.-Y., CHENG, L., (1993), A simple sequencing algorithm for mixed-model assembly lines in just-in-time production systems, *Operations Research Letters*, Vol. 13, P. 27-36.
- DUPLAGA, E.A., HAHN, C.K., HUR, D., (1996), Mixed-model assembly line sequencing at Hyundai Motor Company, *Production and Inventory Management Journal*, Vol. 37, N. 3, P. 20-26.
- DUSONCHET, F., HONGLER, M.-O., (2004), Ordonnancement dynamique d'une chaîne de production flexible en présence de coûts de changement, *MOSIM'04*.
- ERNST, R., KAMRAD, B., (2000), Evaluation of supply chain structures through modularization and postponement, *European Journal of Operational Research*, Vol. 124, P. 495-510.
- GARG, A., TANG, C.S., (1997), On postponement strategies for product families with multiple points of differentiation, *IIE Transactions*, Vol. 29, P. 641-650.
- GIARD, V., JEUNET, J., (2004), Modélisation du problème général d'ordonnancement de véhicules sur une ligne de production et d'assemblage, *Annales du LAMSADE*, Vol. 2, P. 235-256.

GIARD, V., MENDY, G., (2004), Le passage de l'approvisionnement synchrone à la production synchrone dans le chaîne logistique, *Annales du LAMSADE*, Vol. 2, P. 257-276.

GIARD, V., JEUNET, J., (2005), Modélisation du problème général d'ordonnancement de véhicules sur une ligne de production et d'assemblage, *JESA*, deuxième soumission.

GHOSH, S., GAGNON, R.J., (1989), A comprehensive literature review and analysis of the design, balancing and scheduling of assembly systems, *Journal of Production Research*, Vol. 27, N. 4, P. 637-670.

GUERRE-CHALEY, F., FREIN, Y., BOUFFARD-VERCELLI, R., (1995), An efficient procedure for solving a car sequencing problem, *ETFA'05*, Vol. 2, P. 385-394.

HENNET, J.-C., ROUX, W., TCHILINGUIRIAN, P., (1996), A framework for off-line and on-line multi-site production assignment, *9th International Working Seminar on Production Economics*, Innsbruck (Autriche), Rapport LAAS, 19-23 February, Vol. 95183.

HINDI, K.S., PLOSZAJSKI, G., (1994), Formulation and solution of a selection and sequencing problem in car manufacture, *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 26, P. 203-211.

HYUN, C.J., KIM, Y., KIM, Y.K., (1998), A genetic algorithm for multiple objective sequencing problems in mixed model assembly lines, *Computers Ops Res.*, Vol. 25, N. 7-8, P. 675-690.

INMAN, R.R., BULFIN, R. L., (1992), Quick and dirty sequencing for mixed-model multi-level JIT systems, *International Journal of Production Research*, Vol. 30, N. 9, P. 2011-2018.

JOLY, A., FREIN, Y., GAUTHIER, D., BERNIER, V., (2004), Etude de l'impact des blocages sur le flux de production d'une usine terminale automobile, *APII-JESA*, version préliminaire, MOSIM'03.

KARABATI, S., SAYIN, S., (2003), Assembly line balancing in a mixed-model sequencing environment with synchronous transfers, *European Journal of Operational Research*, Vol. 149, P. 417-429.

KIM, H.-G., CHO, H.-S., (2003), Sequencing in a mixed-model final assembly line with three goals: simulated annealing approach, *International Journal of Industrial Engineering*, Vol. 10, N. 4, P. 607-613.

KIS, T., (2004), On the complexity of the car sequencing problem, *Operations Research Letters*, Vol. 32, P. 331-335.

KORKMAZEL, T., MERAL, S., (2001), Bicriteria sequencing methods for the mixed-model assembly line in just-in-time production systems, *European Journal of Operational Research*, Vol. 131, P. 188-207.

KOTANI, S., ITO, T., OHNO, K., (2004), Sequencing problem for a mixed-model assembly line in the Toyota production system, *International Journal of Production Research*, Vol. 42, N. 23, P. 4955-4974.

KRAJEWSKI, L., WEI, J.C., TANG, L.-L., (2004), Responding to schedule changes in build-to-order supply chains, *Journal of Operations Management*, Vol. 23, P. 452-469.

KUBIAK, W., (1993), Minimizing variation of production rate in just-in-time systems: a survey, *European Journal of Operational Research*, Vol. 66, P. 259-271.

LAHMAR, M., ERGAN, H., BENJAAFAR, S., (2003), Resequencing and feature assignment on an automated assemblyline, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 19, N. 1, P. 89-102.

LAHMAR, M., BENJAAFAR, S., (2004), Sequencing with limited flexibility, [www.ie.umn.edu/pdf/lb05.pdf](http://www.ie.umn.edu/pdf/lb05.pdf) (Page consultée le 01 Mars 2006), *Operations Research*, première soumission.

LEE, H.L., TANG, C.S., (1997), Modelling the costs and benefits of delayed product differentiation, *Management Science*, Vol. 43, N. 1, P. 40-53.

LI, S., RAO, S.S., RAGU-NATHAN, T.S., RAGU-NATHAN, B., (2005), Development and validation of a measurement instrument for studying supply chain management practices, *Journal of Operations Management*, Vol. 23, N. 6, P. 618-641.

MA, S., WANG, W., LIU, L., (2002), Commonality and postponement in multi-stage assembly systems, *European Journal of Operational Research*, Vol. 142, P. 523-538.

MALONEY, D., (2002), Ford takes control with AS/RS, *Modern Materials Handling*, October.

MILTENBURG, J., (1989), Level schedules for mixed-model assembly lines in just-in-time production systems, *Management Science*, Vol. 35, P. 192-207.

MONDEN, Y., (1983), "Toyota Production System: Practical Approach to Management", *Industrial Engineering and Management Press*, Norcross, GA.

NGUYEN, A., (2004), La planification et l'ordonnancement de la production dans les usines de carrosserie-montage Renault, *MOSIM'04*.

- PARRELO, B.D., KABAT, W.C., WOS, L., (1986), Jop-shop scheduling using automated reasoning: a case study of the car-sequencing problem, *Journal of Automated Reasoning*, Vol. 2, P. 1-42.
- RAMDAS, K., RANDALL, T., (2004), The impact of component sharing on product quality: an empirical study in the automotive industry, *Darden, University of Virginia*, non publié, Avril.
- SO, K.C., (1990), The impact of buffering strategies on the performance of production line systems, *International Journal of Production Research*, Vol. 26, P. 2293-2307.
- SU, J. C.P., CHANG, Y.-L., FERGUSON, M., (2005), Evaluation of postponement structures to accommodate mass customization, *Journal of Operations Management*, Vol. 23, P. 305-318.
- SWAMINATHAN, J.M., TAYUR, S.R., (1999), Managing design of assembly sequences for product lines that delay product differentiation, *IIE Transactions*, Vol. 31, P. 1015-1026.
- TAMURA, T., LONG, H., OHNO, K., (1999), A sequencing problem to level part usage rates and work loads for a mixed-model assembly line with bypass subline, *International Journal of Production Economics*, Vol. 60-61, P. 557-564.
- THOMOPOULOS, N.T., (1970), Mixed-model balancing with smoothed station assignments, *Management Science*, Vol. 14B, P. 59-75.
- VAN HOEK, R.I., PEELEN, D.E., COMMANDEUR, H.R., (1999), Achieving mass customization through postponement: a study of international changes, *Journal of Market Focused Management*, Vol. 3, P. 353-368.

VAN HOEK, R.I., VOS, B., COMMANDEUR, H.R., (1999), Restructuring european supply chains by implementing postponement strategies, *Long Range Planning*, Vol. 32, N. 5, P. 505-518.

VAN HOEK, R.I., (2001), The rediscovery of postponement a literature review and directions for research, *Journal of Operations Management*, Vol. 19, P. 161-184.

WENG, M.X., (2000), Scheduling flow-shops with limited buffer spaces, *Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference*, <http://ieeexplore.ieee.org>.

WOMACK, J.P., JONES, D.T., ROOS, D., SAMMONS CARPENTER, D., (1990), "The Machine That Changed The World: the story of lean production", *Harper Perennial*, New York, NY.

XIAOBO, Z., ZHOU, Z., ASRES, A., (1999), A note on Toyota's goal of sequencing mixed models on an assembly line, *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 36, P. 57-65.

YANG, B., BURNS, N., (2001), A conceptual framework of postponed manufacturing and its impact on global performance, *Global integration (The Symposium Proceedings)*, Vol. 1-902546-23-7, P. 177-185.

## ANNEXE I

## MODÉLISATION

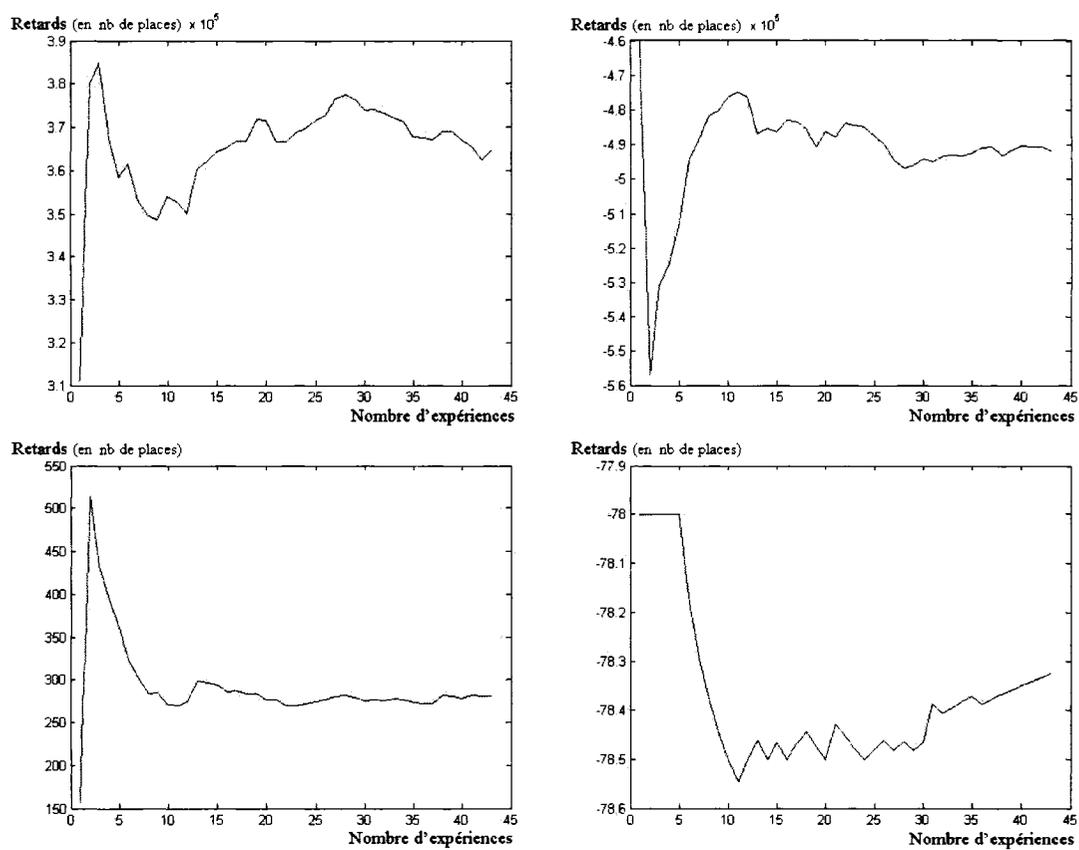


Figure I.1: Évolution de la moyenne des retards (à gauche) et avances (à droite) cumulés (en haut) et maximaux (en bas) à 95% en fonction du nombre d'expériences réalisées.

Tableau I.1: Comparaison des différentes règles de cadencement pour le ferrage pour un stock 1 à accès direct de 100 places. Moyennes sur 20 expériences, en nombre de places. Lorsque non précisé, les valeurs sont à 95%.

<i>Règle</i>	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	$R_6$	$R_7$
Retards cum	364622	363957	348711	400402	303766	330069	359813
Avances cum	-491600	-492365	-343727	-396591	-410420	-442652	-485892
Retards max	280.9	280.3	73.4	87.6	272.5	271.7	279.9
à 98%	549.2	548.5	75.3	91.1	639.3	551.4	549.8
à 99%	763.6	763.8	77.0	92.8	853.3	752.45	766.8
à 100%	1502	1542	121.4	153.4	1282	1412	1534
Avances max	-78.3	-78.4	-75.5	-93.1	-60,2	-72.2	-78.4
à 98%	-81.1	-81.3	-80.2	-98.0	-65.9	-81.3	-81.4
à 99%	-82.7	-82.8	-83.1	-99	-66.5	-81.3	-83.0
à 100%	-85.7	-85.7	-92.3	-99	-77.8	-86.6	-86.0
Nb lots	1078	1079	1139	2107	2003	1341	1106

Tableau I.2: Comparaison des différentes règles de cadencement pour le ferrage pour un stock 1 de 10 rails de 5 places. Moyennes sur 20 simulations, en nombre de places. Lorsque non précisé, les valeurs sont à 95%.

<i>Règle</i>	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$
Retards cum	145034	122244	13634	3074
Avances cum	-179728	-148530	-10303	-765
Retards max	80.2	61.4	7.6	5.5
à 99%	146.5	118.2	11	7.9
à 100%	294	242.8	17.7	13.0
Avances max	-35.0	-32.3	-8.4	-2.3
à 99%	-40.1	-38.6	-13.1	-6
à 100%	-44.3	-44.3	-26.15	-20.3
Nb lots	6862	6777	17285	19382

Tableau I.3: Comparaison des deux critères de choix pour un stock 3 de reséquencement de 10 rails de taille 5. Moyennes sur 20 simulations.

<i>Critère de choix</i>	$C_1$	$C_2$	<i>Diff. rel. moyenne</i>
<b>Retards</b> cumulés moyens	610631	527071	-13.7%
Retards max moyens	239.6	197.6	-17.6%
98%	293.8	247.4	-16.4%
99%	331.0	278.5	-16.1%
100%	500.0	432.5	-18.5%
<b>Avances</b> cumulées moyennes	-673618	-553050	-17.9%
Avances max moyennes	-110	-142.0	28.2%
98%	-115.8	-165.4	44.3%
99%	-119.5	-180.2	55.9%
100%	-137	-252.0	88.8%

Tableau I.4: Comparaison des trois métriques avec un stock 3 de reséquencement de 10 rails de taille 5. Moyennes sur 20 expériences, en nombre de places.

<i>Métrique employée</i>	$N_1$	$N_2$	$N_3$
Retards cumulés	526842.2	554445.7	526306.9
Retard max	197.2	222.45	196.65
Avances cumulées	-551639.8	-594455.05	-552093.2
Avance max	-142.05	-130	-142

## ANNEXE II

## INTRODUCTION DE LA DIFFÉRENCIATION RETARDÉE

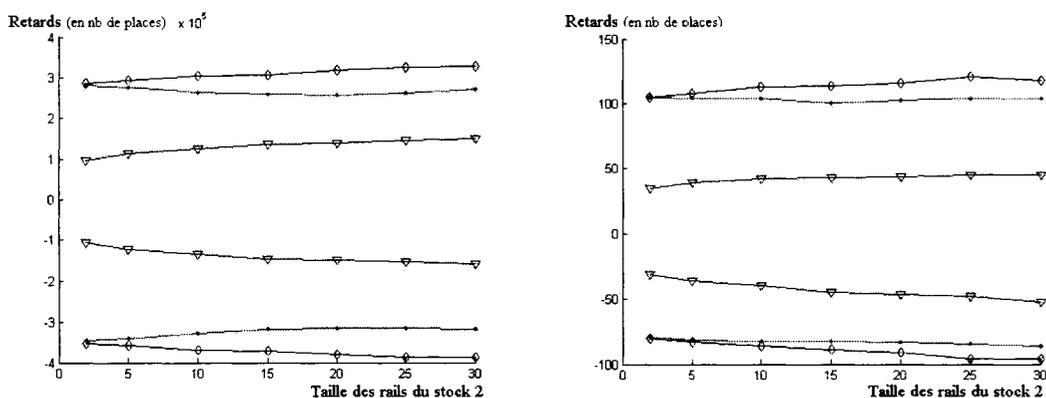


Figure II.1: Retards (en positifs) et avances (en négatifs) cumulés (à gauche) et maximaux (à droite) à 95% en sortie du stock 2 sans échange (diamants), avec échange au niveau du stock (points) et avec échange global (triangles) en fonction de la taille des rails. Stock 2 à 5 rails.

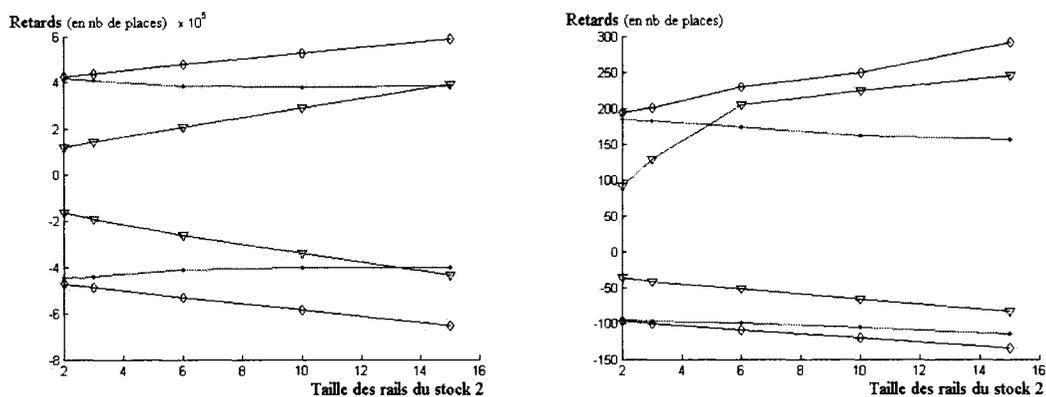


Figure II.2: Retards (en positifs) et avances (en négatifs) cumulés (à gauche) et maximaux (à droite) à 95% en sortie du stock 2 sans échange (diamants), avec échange au niveau du stock (points) et avec échange global (triangles) en fonction de la taille des rails. Stock 2 à 10 rails.

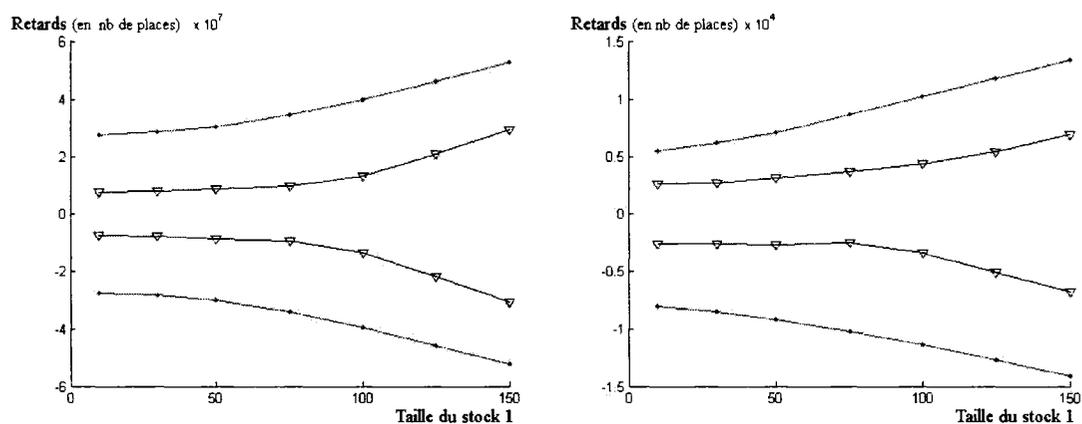


Figure II.3: Retards (en positifs) et avances (en négatifs) cumulés (à gauche) et maximaux (à droite) à 95% en entrée du stock 2 sans échange d'ordre de commande (points) et avec échange (triangles) en fonction de la taille du stock 1 à accès direct.

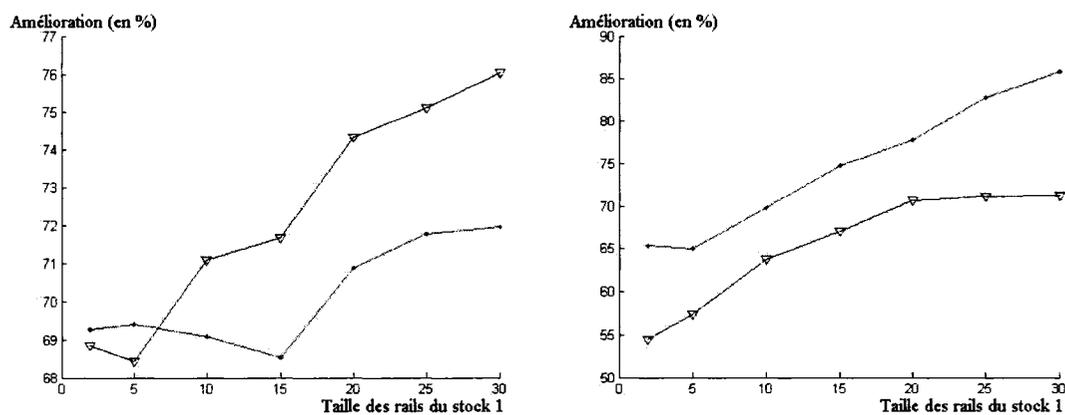


Figure II.4: Améliorations relatives des retards (points) et avances (triangles) cumulés (à gauche) et maximaux (à droite) à 95% avec un échange d'ordres de commande avant le stock 2 en fonction de la taille des rails. Stock 1 à 10 rails.

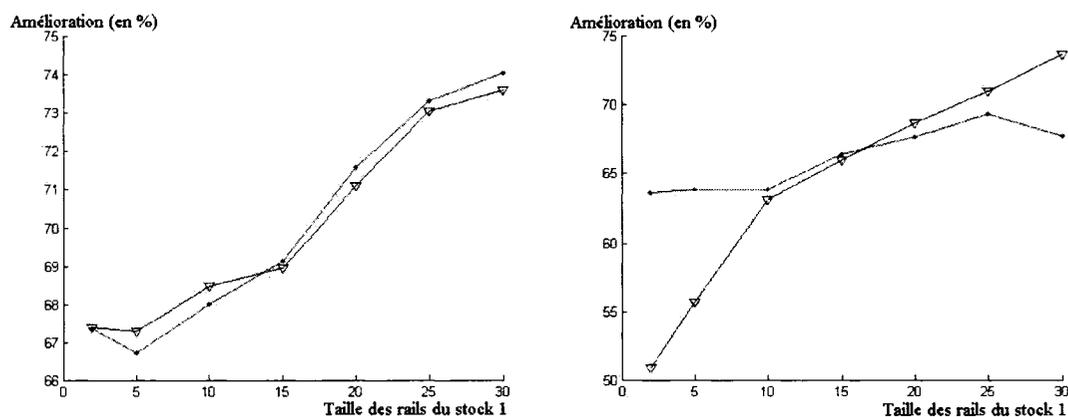


Figure II.5: Améliorations relatives des retards (points) et avances (triangles) cumulés (à gauche) et maximaux (à droite) à 95% avec un échange d'ordres de commande avant le stock 2 en fonction de la taille des rails. Stock 1 à 15 rails.

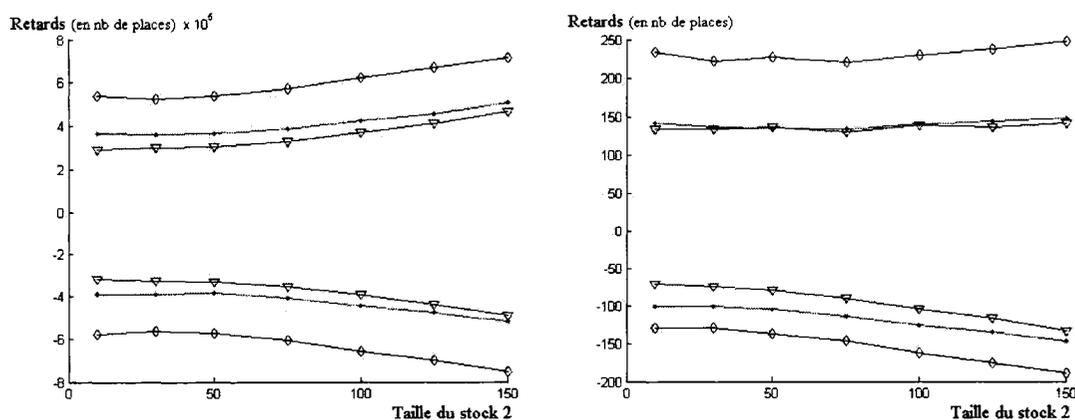


Figure II.6: Retards (en positifs) et avances (en négatifs) cumulés (à gauche) et maximaux (à droite) à 95% avec un échange d'ordres de commande après l'atelier de peinture (points), avec deux échanges (triangles) ou sans aucun échange (diamants) en fonction de la taille du stock 2 à accès direct.

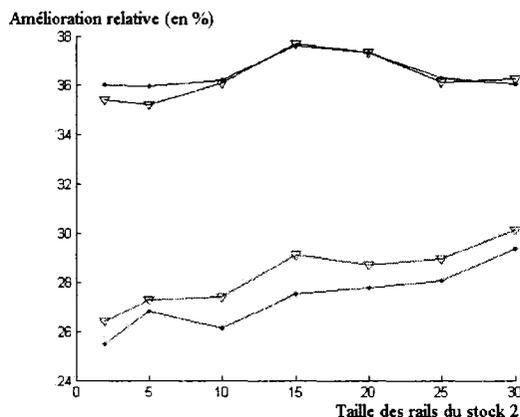


Figure II.7: Améliorations relatives des retards (points) et avances (triangles) cumulés à 95% avec un échange après l'atelier de peinture (en haut) ou avec deux échanges (en bas) par rapport à la situation sans échange en fonction de la taille des rails. Stock 2 à 10 rails.

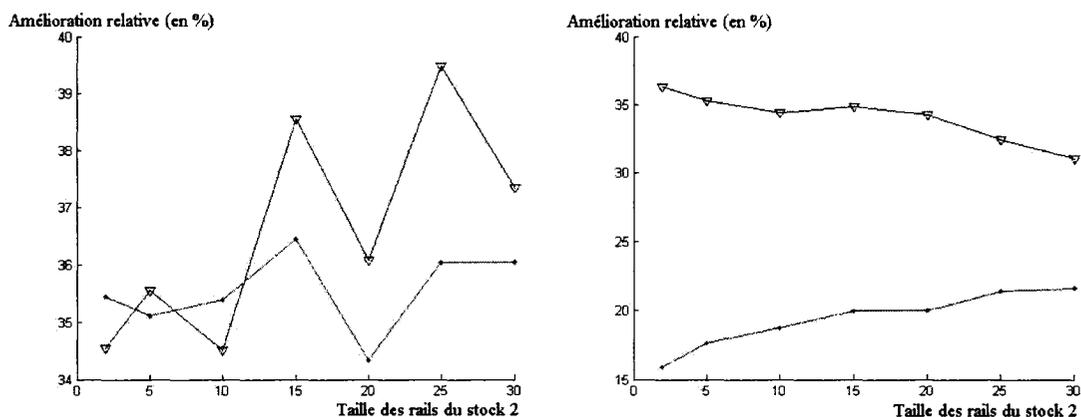


Figure II.8: Améliorations relatives des retards (à gauche) et avances (à droite) maximaux à 95% avec un échange après l'atelier de peinture (points) ou avec deux échanges (triangles) par rapport à la situation sans échange en fonction de la taille des rails. Stock 2 à 10 rails.

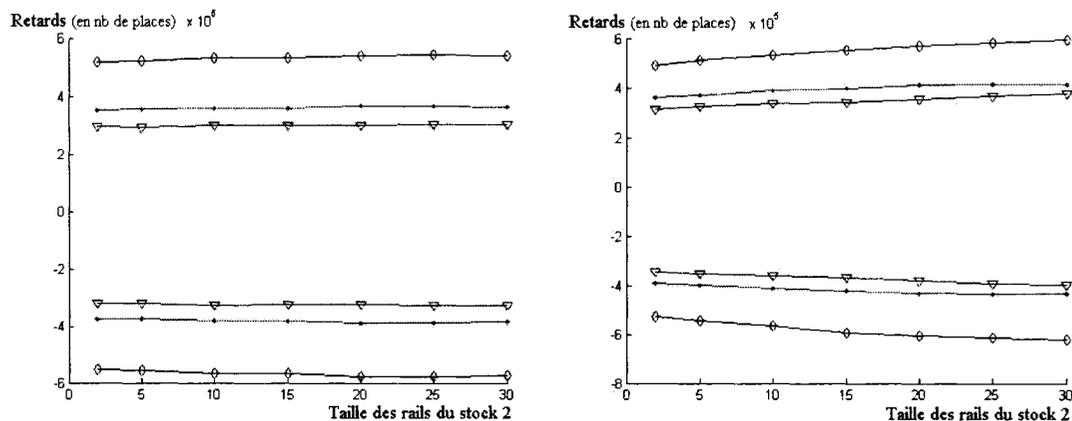


Figure II.9: Retards (en positifs) et avances (en négatifs) cumulés à 95% avec un échange d'ordres de commande après l'atelier de peinture seulement (points), avec deux échanges (triangles) ou sans aucun échange (diamants) en fonction de la taille des rails. Stock 2 à 5 rails (à gauche) et 10 rails (à droite).

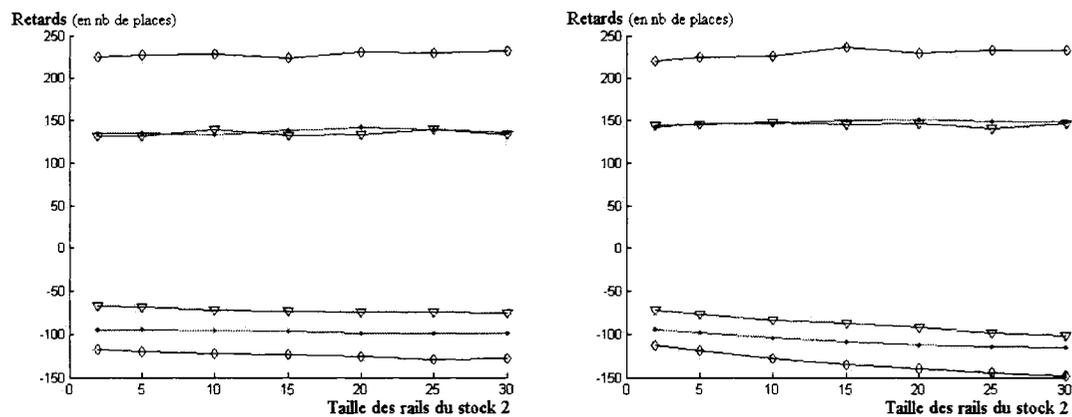


Figure II.10: Retards (en positifs) et avances (en négatifs) maximaux à 95% avec échange d'ordres de commande de véhicules après l'atelier de peinture seulement (points), avec deux échanges (triangles) ou sans aucun échanges (diamants) en fonction de la taille des rails. Stock 2 à 5 rails (à gauche) et 10 rails (à droite).

## ANNEXE III

## PLAN D'EXPÉRIENCES

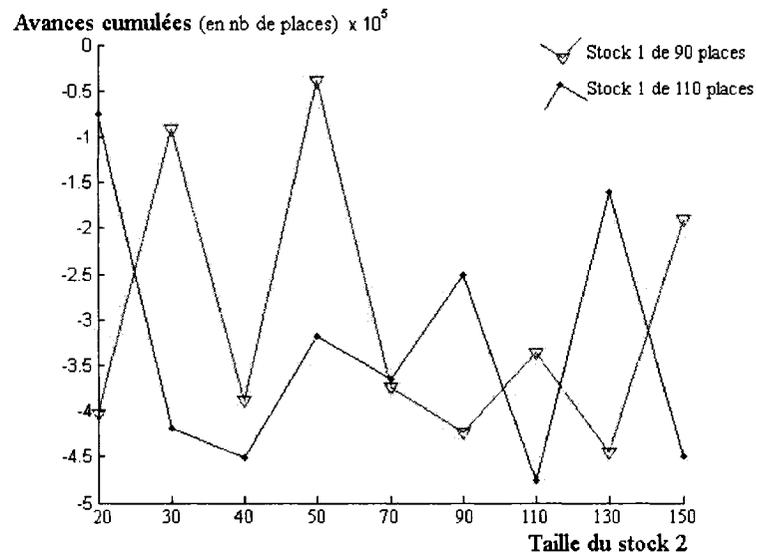


Figure III.1: Avances cumulées moyennes en entrée de montage en fonction de la taille du stock 2 pour un stock 1 de 90 places (triangles) ou 110 places (points).

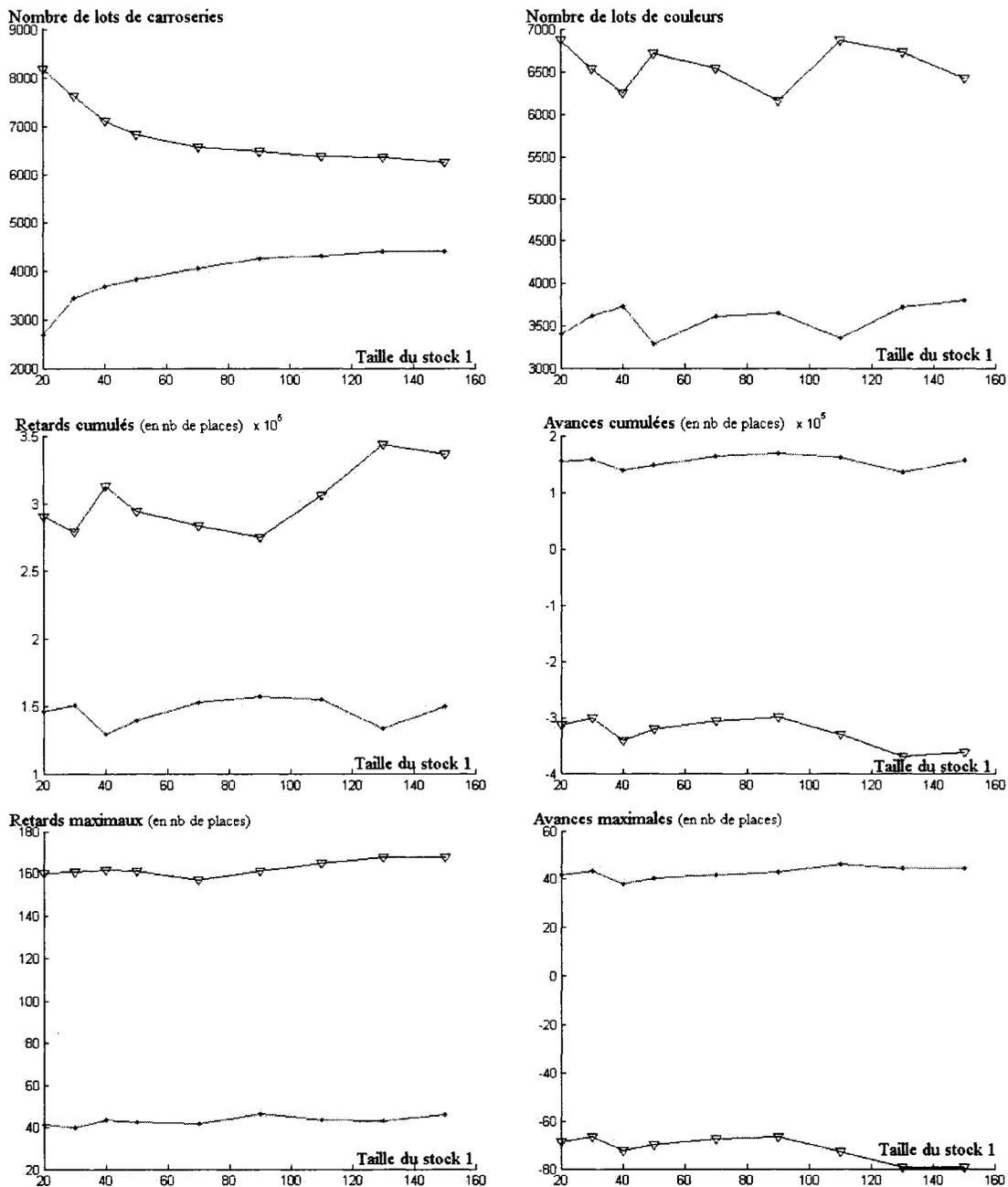


Figure III.2: Évolution des indicateurs de performance choisis au chapitre 4 en fonction des modalités de la taille du stock 1.

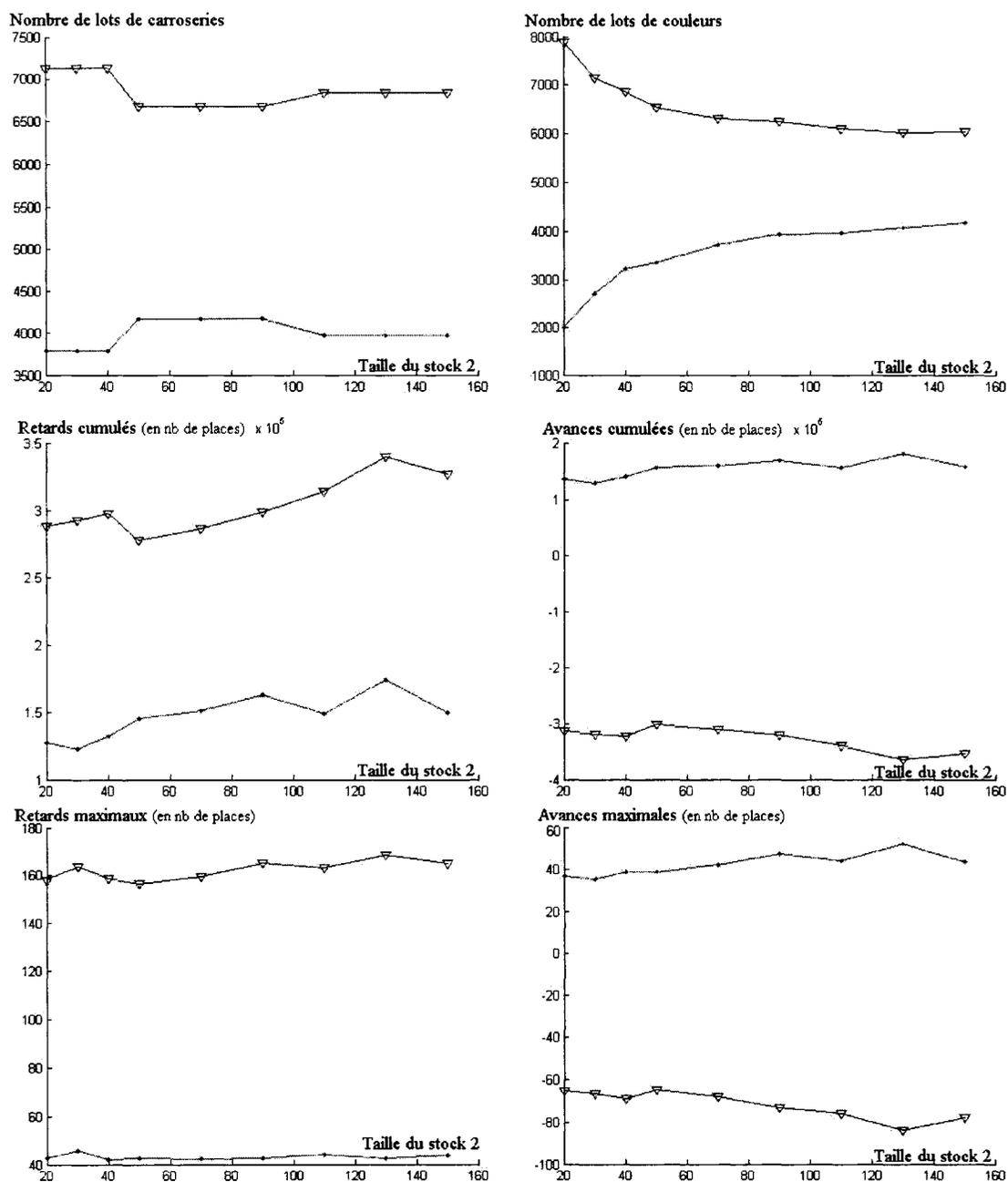


Figure III.3: Évolution des indicateurs de performance choisis au chapitre 4 en fonction des modalités de la taille du stock 2.

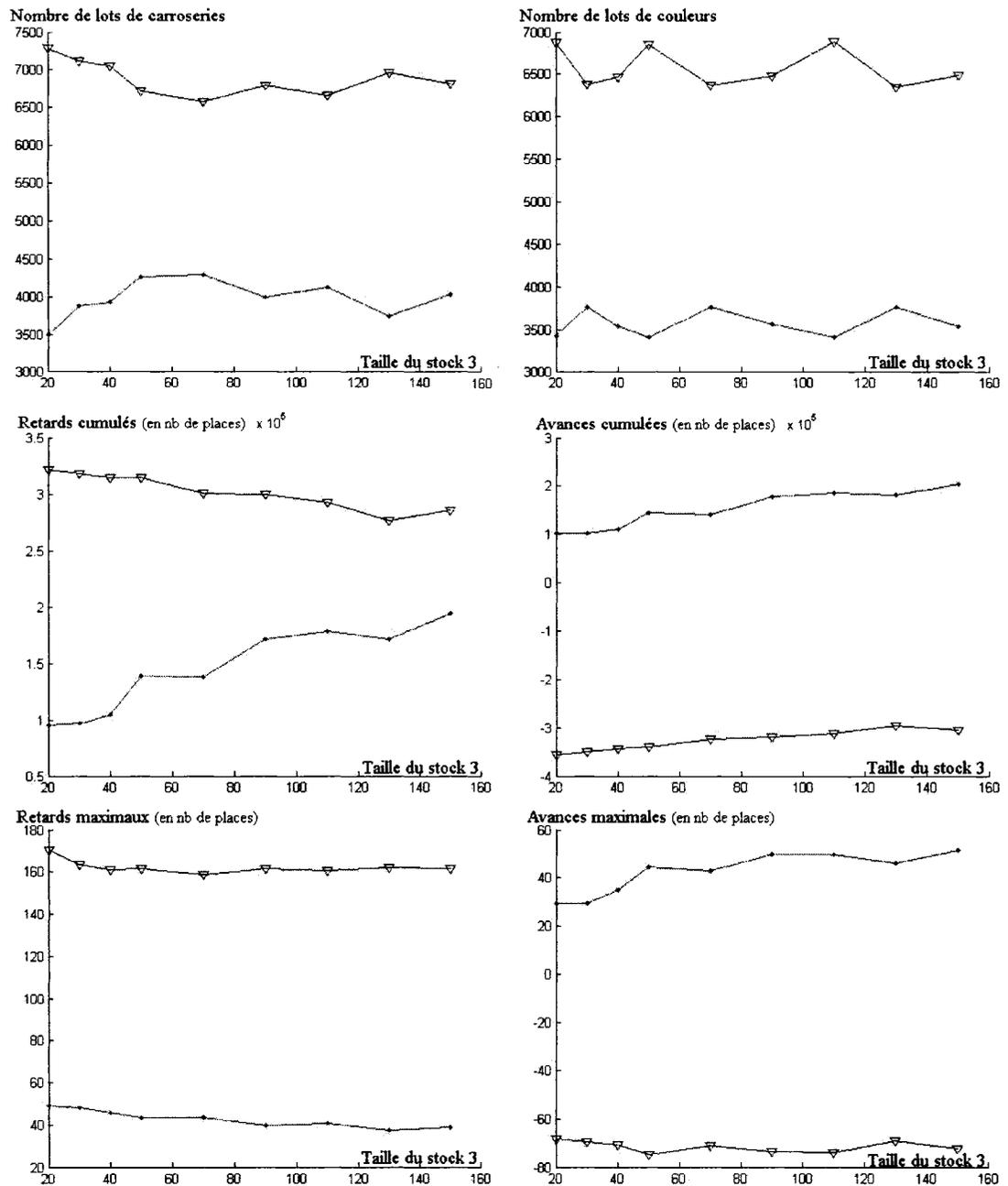


Figure III.4: Évolution des indicateurs de performance choisis au chapitre 4 en fonction des modalités de la taille du stock 3.

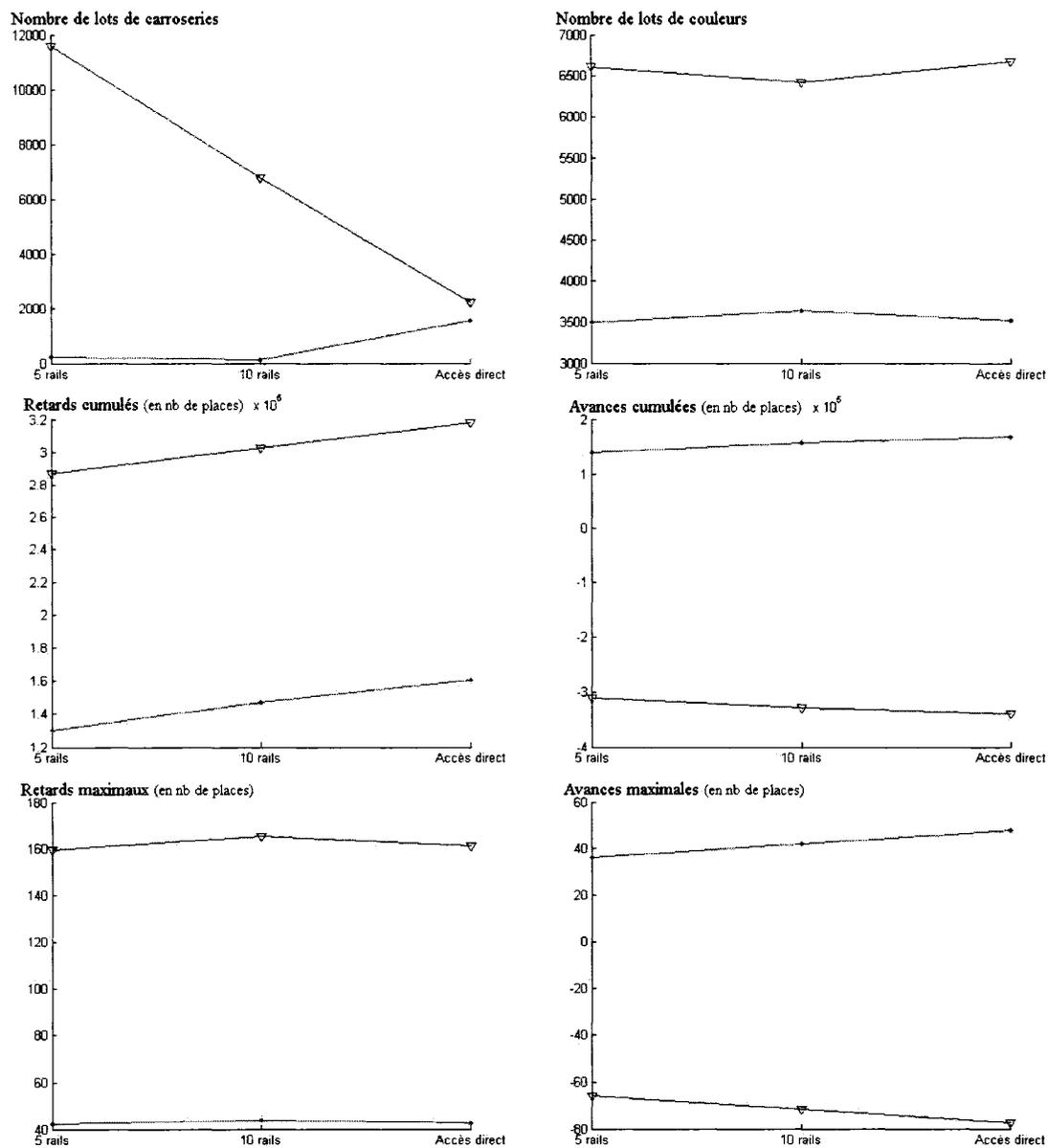


Figure III.5: Évolution des indicateurs de performance choisis au chapitre 4 en fonction des modalités du type du stock 1.

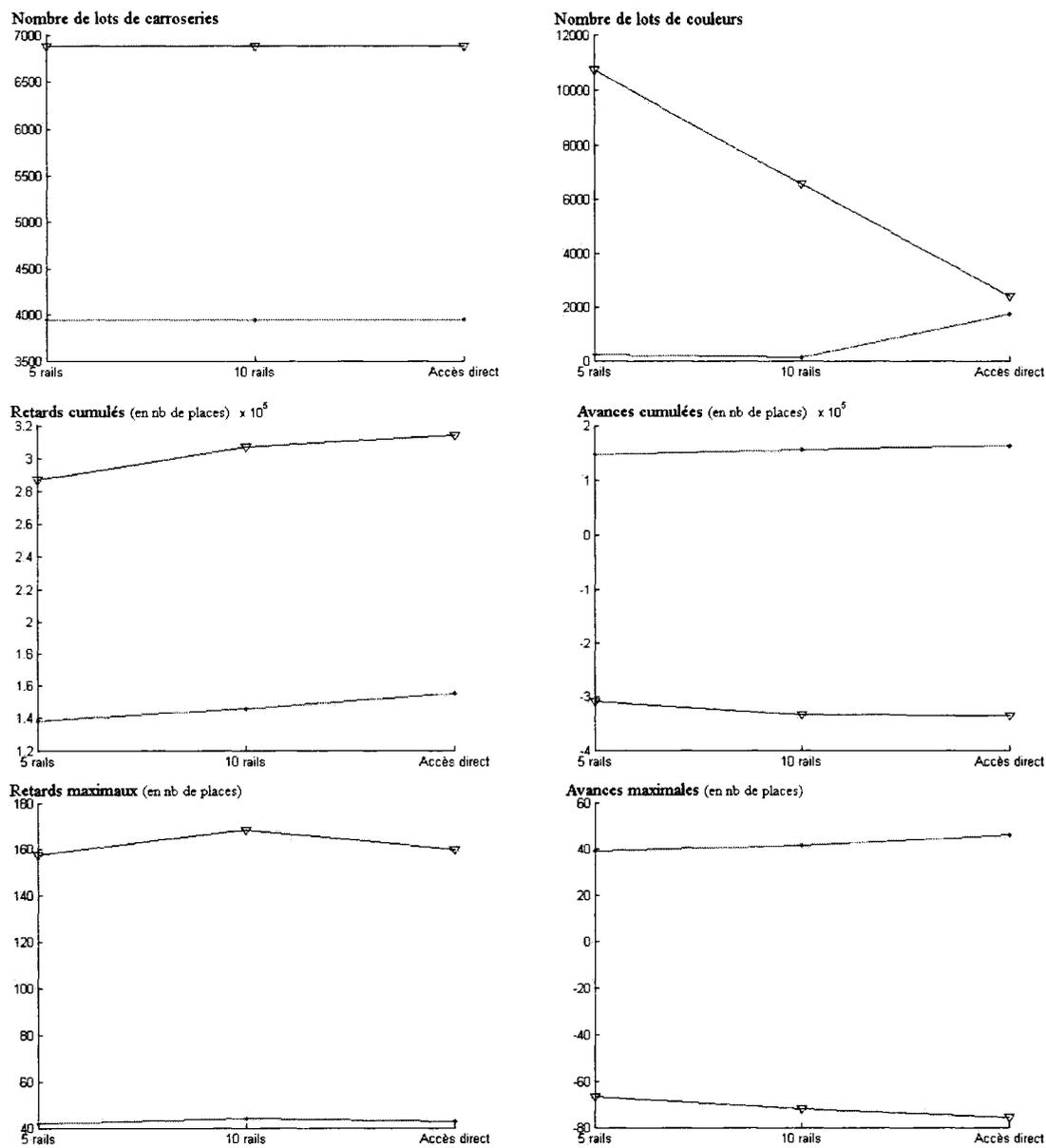


Figure III.6: Évolution des indicateurs de performance choisis au chapitre 4 en fonction des modalités du type du stock 2.

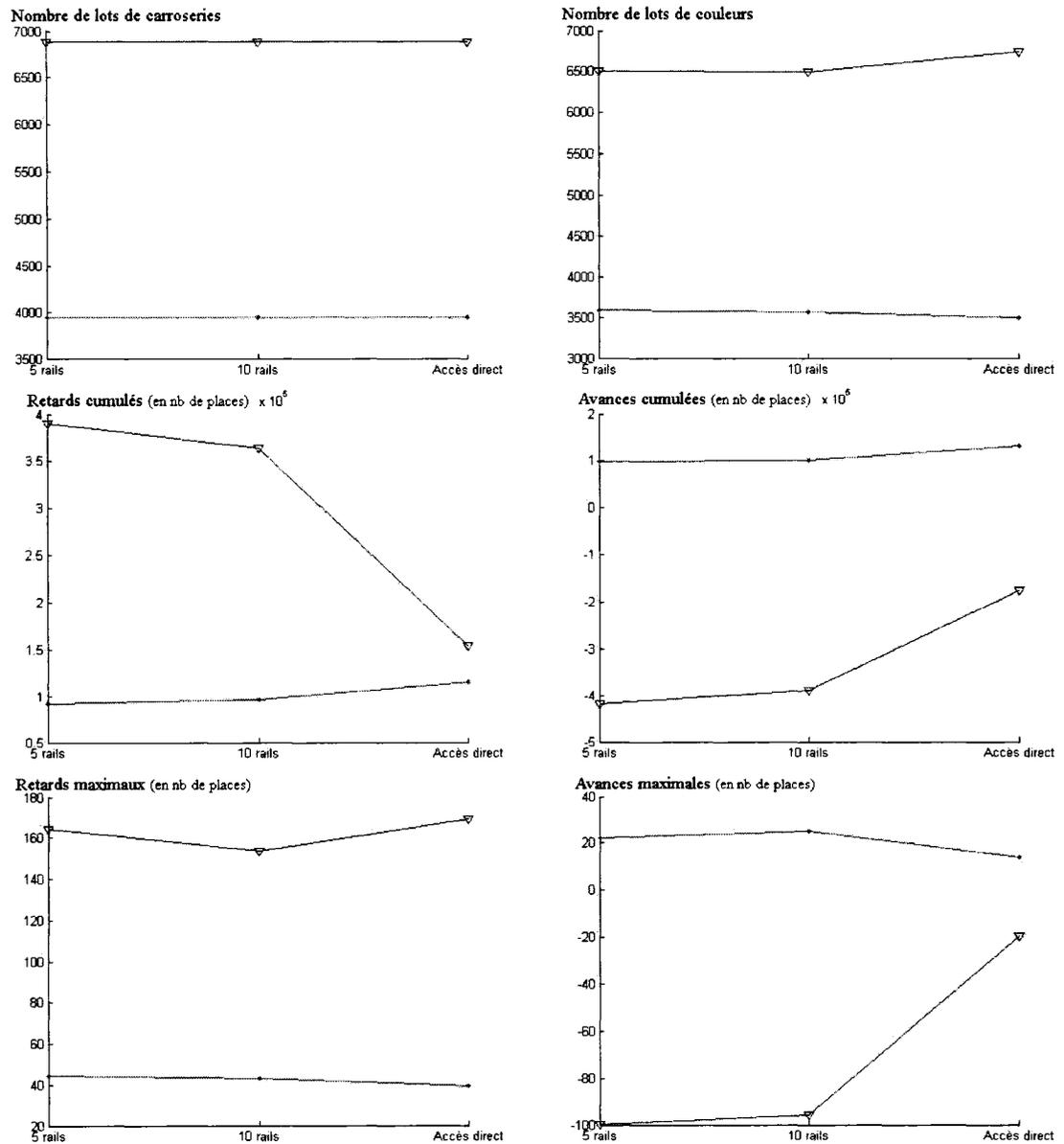


Figure III.7: Évolution des indicateurs de performance choisis au chapitre 4 en fonction des modalités du type du stock 3.

Tableau III.1: Les 81 combinaisons de valeurs des 6 premières variables pour le plan d'expériences (voir la section 4.1.1). Les tailles de stocks prennent 9 valeurs notées de 1 à 9 (pour les valeurs respectives 20,30,40,50,70,90,110,130 et 150) et les types de stocks sont notés de 1 à 3 (pour respectivement à accès direct, à 5 rails et à 10 rails).

<i>Variables</i>	$s_1$	$s_2$	$s_3$	$r_1$	$r_2$	$r_2$
1	1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	1	2	3
3	1	3	3	1	3	2
4	1	4	4	2	1	3
5	1	5	5	2	2	2
6	1	6	6	2	3	1
7	1	7	7	3	1	2
8	1	8	8	3	2	1
9	1	9	9	3	3	3
10	2	1	2	2	3	3
11	2	2	3	2	1	2
12	2	3	4	2	2	1
13	2	4	5	3	3	2
14	2	5	6	3	1	1
15	2	6	7	3	2	3
16	2	7	8	1	3	1
17	2	8	9	1	1	3
18	2	9	1	1	2	2
19	3	1	3	3	2	2
20	3	2	4	3	3	1
21	3	3	5	3	1	3
22	3	4	6	1	2	1
23	3	5	7	1	3	3
24	3	6	8	1	1	2
25	3	7	9	2	2	3
26	3	8	1	2	3	2
27	3	9	2	2	1	1

<i>Variables</i>	$s_1$	$s_2$	$s_3$	$r_1$	$r_2$	$r_2$
28	4	1	4	1	1	1
29	4	2	5	1	2	3
30	4	3	6	1	3	2
31	4	4	7	2	1	3
32	4	5	8	2	2	2
33	4	6	9	2	3	1
34	4	7	1	3	1	2
35	4	8	2	3	2	1
36	4	9	3	3	3	3
37	5	1	5	2	3	3
38	5	2	6	2	1	2
39	5	3	7	2	2	1
40	5	4	8	3	3	2
41	5	5	9	3	1	1
42	5	6	1	3	2	3
43	5	7	2	1	3	1
44	5	8	3	1	1	3
45	5	9	4	1	2	2
46	6	1	6	3	2	2
47	6	2	7	3	3	1
48	6	3	8	3	1	3
49	6	4	9	1	2	1
50	6	5	1	1	3	3
51	6	6	2	1	1	2
52	6	7	3	2	2	3
53	6	8	4	2	3	2
54	6	9	5	2	1	1

<i>Variables</i>	$s_1$	$s_2$	$s_3$	$r_1$	$r_2$	$r_2$
55	7	1	7	1	1	1
56	7	2	8	1	2	3
57	7	3	9	1	3	2
58	7	4	1	2	1	3
59	7	5	2	2	2	2
60	7	6	3	2	3	1
61	7	7	4	3	1	2
62	7	8	5	3	2	1
63	7	9	6	3	3	3
64	8	1	8	2	3	3
65	8	2	9	2	1	2
66	8	3	1	2	2	1
67	8	4	2	3	3	2
68	8	5	3	3	1	1
69	8	6	4	3	2	3
70	8	7	5	1	3	1
71	8	8	6	1	1	3
72	8	9	7	1	2	2
73	9	1	9	3	2	2
74	9	2	1	3	3	1
75	9	3	2	3	1	3
76	9	4	3	1	2	1
77	9	5	4	1	3	3
78	9	6	5	1	1	2
79	9	7	6	2	2	3
80	9	8	7	2	3	2
81	9	9	8	2	1	1

## ANNEXE IV

## EXEMPLES DE FONCTIONS MATLAB

```

function [total_retards] = retards_cumules(listeinitiale,pourcentage)
    %cette fonction renvoie le retard cumulé des pourcentage% de vehicules
    %les moins en retard
    liste=repartition_retard(retard(listeinitiale));
    %on va extraire de cette liste seulement les retards (positifs)
    i=1;
    taille=size(liste,2);
    while(i<taille)&&(liste(2,i)<=0)
        i=i+1;
    end

    if (i==taille)
        total_retards=liste(2,i)*liste(1,i);
        %si liste(1,i)==0, alors total_retards=0, c'est correct
    else
        total_temp=liste(:,i:taille);
        %c'est notre liste des retards, on va en faire la somme. On va
        %utiliser la premiere ligne pour calculer jusqu'ou on prend en
        %compte les véhicules, et la deuxieme ligne pour calculer les
        %retards cumulés.
        %size(total_temp,2)=taille-i+1
        nbretardstotal=0;
        for j=1:(taille-i+1)
            nbretardstotal=nbretardstotal+total_temp(1,j);
        end
        k=1;
        nbretards=0;
        tt_rd=0;
        %nbretard=nombre de retards inférieurs à pourcentage% souhaité.
        %tt_rd sera notre réponse finale, on divise pas par taille, mais
        %par nbretardstotal
        while (k<=(taille-i+1))&&(nbretards/nbretardstotal<pourcentage)
            nbretards=nbretards+total_temp(1,k);
            tt_rd=tt_rd+total_temp(2,k)*total_temp(1,k);
        end
    end

```

```

        k=k+1;
    end
    total_retards=tt_rd*size(listeinitiale,2);
    %parce que tt_rd est en fait une proportion, voir
    %repartition_retard pour plus d'infos
end

function [listefintemp] = film_taux_modeles(taille,nbcarross,nbcouleurs,nbmontage)
    %on suppose qu'il n'y a pas plus de 100 carrosseries, 100 couleurs de
    %peinture, mais le nombre max n'intervient pas ici

    %ligne 1 pour le modele (le montage ici)
    %ligne 2 pour position initiale
    %ligne 3 pour la carrosserie
    %ligne 4 pour la couleur de peinture

    %nbmontage introduit le nb de contraintes diff au niveau du montage. Le
    %nombre de modeles est donc nbcouleurs*nbcarross*nbmontage
    %le séquençement initial tiend compte des contraintes de montage, donc
    %uniquement de nbmontage, mais comme on suppose l'indépendance des 3
    %valeurs, on doit séquençer les 3 pour se retrouver avec une bonne
    %répartition des couleurs et carrosseries.
    listefintemp=zeros(4,taille);
    taux_carross=rand(1,nbcarross);
    taux_carross=taux_carross/sum(taux_carross);

    taux_couleurs=rand(1,nbcouleurs);
    taux_couleurs=taux_couleurs/sum(taux_couleurs);

    taux_montage=rand(1,nbmontage);
    taux_montage=taux_montage/sum(taux_montage);

    k=0;
    tabletemp=zeros(1,nbcarross);
    %tabletemp est la table temporaire des ratios, devant se rapprocher de
    %la table avec les taux théoriques à la fin de l'algorithme...A VERIFIER

    %on commence par la carrosserie, troisieme ligne
    while k<taille
        %on cherche les minima
        s=1;

```

```

valmin=(tabletemp(1,s)-taux_carross(1,s));
for i=2:nbcarross
    valtemp=(tabletemp(1,i)-taux_carross(1,i));
    if valtemp<valmin
        valmin=valtemp;
        s=i;
    end
end
k=k+1;
listefintemp(3,k)=s;

%on update la tabletemp avec les nouveaux taux
tabletemp=tabletemp*k;
tabletemp(1,s)=tabletemp(1,s)+1;
tabletemp=tabletemp/(k+1);
end

%on fait ensuite les contraintes de montage, premiere ligne
tabletemp2=zeros(1,nbmontage);
k=0;
while k<taille
    %on cherche les minima
    s=1;
    valmin=(tabletemp2(1,s)-taux_montage(1,s));
    for i=2:nbmontage
        valtemp=(tabletemp2(1,i)-taux_montage(1,i));
        if valtemp<valmin
            valmin=valtemp;
            s=i;
        end
    end
    k=k+1;
    listefintemp(1,k)=s;

    %on update la tabletemp avec les nouveaux taux
    tabletemp2=tabletemp2*k;
    tabletemp2(1,s)=tabletemp2(1,s)+1;
    tabletemp2=tabletemp2/(k+1);
end

%puis on fait la peinture, quatrieme ligne
tabletemp3=zeros(1,nbcouleurs);

```

```

k=0;
while k<taille
    %on cherche les minima
    s=1;
    valmin=(tabletemp3(1,s)-taux_couleurs(1,s));
    for i=2:nbcouleurs
        valtemp=(tabletemp3(1,i)-taux_couleurs(1,i));
        if valtemp<valmin
            valmin=valtemp;
            s=i;
        end
    end
    k=k+1;
    listefintemp(4,k)=s;

    %on update la tabletemp avec les nouveaux taux
    tabletemp3=tabletemp3*k;
    tabletemp3(1,s)=tabletemp3(1,s)+1;
    tabletemp3=tabletemp3/(k+1);
end

%et enfin la position initiale, deuxième ligne
listefintemp(2,:)=1:taille;

%ligne 1 pour le modele (le montage ici)
%ligne 2 pour position initiale
%ligne 3 pour la carrosserie
%ligne 4 pour la couleur de peinture

function [listefinale,nbatch] = cad3(listeinitiale, taillestockmax)
    %on veut regrouper le plus possible les véhicules de même carrosserie
    %dans une limite de p véhicules, p=taille du stock à un moment donné
    %On peut supposer par exemple que lorsqu'un véhicule arrive en sortie de
    %stock, on regarde derrière lui dans les p suivants, s'il y en a de
    %la même teinte, et l'on fait passer les uns après les autres tous ceux
    %de la même carrosserie(4e ligne du film). Ca c'est ce qu'on fait dans
    %la fonction cadencement_ferrage.
    %ICI, meme le switch n'intervient pas, mais on va considérer toutes les
    %batch possibles, pas seulement celles de la même couleur que le
    %premier. En accès direct, la notion de "premier" n'a pas de sens de
    %toute façon. La diff avec cadencement_ferrage est qu'on considère

```

```

%toutes les batchs.

%nécessairement p<=taillestockmax
%en fait nbcross nous sert a rien, pas dans les arguments

%ici on prend la batch qui a le retard moyen le plus grand

finlistedebut=listeinitiale;
debutlistefin=[];
stocktemp=[];
nbatch=0;

while (size(finlistedebut,2)+size(stocktemp,2))~=0
    n=size(finlistedebut,2);
    m=size(debutlistefin,2);
    p=size(stocktemp,2);

    %on remplit d'abord le stock le max possible
    if p<taillestockmax %à cause du while on sait que n+p>0
        if n<=taillestockmax-p
            stocktemp=[stocktemp,finlistedebut];
            finlistedebut=[];
        else
            stocktemp=[stocktemp,finlistedebut(:,1:taillestockmax-p)];
            finlistedebut=finlistedebut(:,taillestockmax-p+1:n);
        end
    end
end
%pas besoin de else ici: si p==taillestockmax, on passe à l'étape 2
%directement
%Après ça, on ne peut pas plus remplir stocktemp dans cette étape,

%on peut procéder au tri, étape 2. Trouver la batch de retards moyen max.
p=size(stocktemp,2);
stocktemp=sortrows(stocktemp',3)';
batchs=[];
%on va commencer par déterminer le debut et la fin de chaque batch
%possible dans le stock tampon
    init=1;
    nbatchtemp=1;
while init<=p
    carross=stocktemp(3,init);
    batchs(1,nbatchtemp)=carross;

```

```

    batchs(2,nbatchtemp)=init;
    while (init<p)&&(stocktemp(3,init+1)==carross)
        init=init+1;
    end
    batchs(3,nbatchtemp)=init;
    init=init+1; %pour la batch suivante
    nbatchtemp=nbatchtemp+1;
end

%ensuite on détermine le retard moyen max qu'on va mettre dans
%la troisième ligne de batchs
for i=1:size(batchs,2)
    batchprov=stocktemp(2,batchs(2,i):batchs(3,i));
    avancesbatchprov=mean(batchprov);
    batchs(4,i)=avancesbatchprov;
end

%ensuite on calcule quel est la batch avec le plus grand retard
%ie la plus petite avance ici
[minn,indminn]=min(batchs(4,:));

%on extrait la batch du stocktemp et on met à jour stocktemp
%carbatchmin=batchs(1,indminn); pas nécessaire
debutbatch=batchs(2,indminn);
finbatch=batchs(3,indminn);
batch=stocktemp(:,debutbatch:finbatch);

if debutbatch==1
    if finbatch==p
        stocktemp=[];
    else
        stocktemp=stocktemp(:,(finbatch+1):p);
    end
else
    if finbatch==p
        stocktemp=stocktemp(:,1:(debutbatch-1));
    else
        stocktemp=[stocktemp(:,1:(debutbatch-1)),stocktemp(:,(finbatch+1):p)];
    end
end

%on fait ensuite passer la batch

```

```

        debutlistefin=[debutlistefin, batch];
        nbatch=nbatch+1;
    end
    listefinale=debutlistefin;

function [listefinale,nbtotalbatch] = cadmulti2(listeinitiale,taillestockmax,nbrac,nbcarross)
    %on veut regrouper le plus possible les véhicules de même carrosserie
    %la carrosserie est donnée par la 3ème ligne.

    %nécessairement p<=taillestockmax

    %ici on prend la "première" des plus grandes batch
    %si plusieurs on compte les retards totaux

    tailleliste=size(listeinitiale,2);
    debutlistefin=[];
    [finlistedebut,stock_temp,tablerac_temp] = cadpartiel_multirac_ferr(listeinitiale,
        tailleliste*ones(4,taillestockmax*nbrac),taillestockmax,nbrac,zeros(1,nbrac));
    %tablerac_temp nous donne le nombre d'éléments de chaque rac
    nbtotalbatch=0;
    while (size(finlistedebut,2)+sum(tablerac_temp))~=0

        %trouver la batch de plus grande taille
        ensbatch=zeros(nbrac+1,nbcarross);
        %ensbatch(racj,carrossi) sera le nombre d'éléments de carross i dans le
        %rac j que l'on peut prendre
        for i=1:nbrac
            %i+i*taillestockmax est le premier élément du rac
            if tablerac_temp(i)>1
                carross_premier=stock_temp(3,1+(i-1)*taillestockmax);
                memecarross=1;

                j=1;
                while ((memecarross==1)&(j<tablerac_temp(i)))
                    if stock_temp(3,(i-1)*taillestockmax+j+1)==carross_premier
                        j=j+1;
                    else
                        memecarross=0;
                    end
                end
            end
        end
    end
end

```

```

        end
    end
    %il y a alors j éléments de même couleur dans ce rac
    ensbatch(i,carross_premier)=j;
elseif tablerac_temp(i)==1
    ensbatch(i,stock_temp(3,1+(i-1)*taillestockmax))=1;
%et si tablerac_temp(i)==0 on laisse 0 dans notre tableau
end %fin du if tablerac_temp(i)>1
end %fin du for i=1:nbrac

%on fait ensuite la somme des lignes pour calculer la batch max
%et déterminer alors la carross que l'on va prendre
ensbatch(nbrac+1,:)=sum(ensbatch,1);
[taillebatch,carross]=max(ensbatch(nbrac+1,:)); %[max,indicemax]
%regarder s'il y en a plusieurs de taille max
batchsmax=[];
for i=1:nbcarross
    if ensbatch(nbrac+1,i)==taillebatch
        batchsmax=[batchsmax,i];
    end
end
% s'il y'en a plus qu'une, on va comparer les retards cum
q=size(batchsmax,2);
if q>1
    for i=1:q
        totalret=0;
        carross_batch=batchsmax(1,i);
        for j=1:nbrac
            tailleprovisoire=ensbatch(j,carross_batch);
            if tailleprovisoire>=1
                for k=1:tailleprovisoire
                    totalret=totalret+stock_temp(2,(j-1)*taillestockmax+k);
                end
            end
        end
        batchsmax(2,i)=totalret;
    end
end
%carross est la carrosserie du max alors que
%carross_batch est temporaire pour la différenciation
%de plusieurs batchs maximales (de mm taille donc)
[aa,bb]=min(batchsmax(2,:));
carross=batchsmax(1,bb);

```

```

end

%on fait ensuite passer la batch
%il faut regarder alors dans ensbatch(1:nbrac,carross) où prendre
%les éléments pour constituer la batch. c'est une colonne
if taillebatch>1
    batch=ensbatch(1:nbrac,carross);

    %décider dans quel ordre prendre les véhicules de la batch envoyer
    %vers l'aval et remplir de l'amont un par un
    while taillebatch>0
        %déterminer le premier à envoyer en aval (plus grand retard
        %donc plus petite place initiale, la plus petite pénalité, la
        %plus petite valeur de N(colonne,taillelistefin).

        %déterminer le premier à envoyer
        minn=tailleliste+1;
        indiceminn=0;
        for i=1:nbrac
            if batch(i,1)~=0
                avvehicule=stock_temp(2,1+(i-1)*taillestockmax);
                if avvehicule<minn
                    minn=avvehicule;
                    indiceminn=i;
                end
            end
        end
        %c'est donc le premier du rac i à envoyer en premier
        %l'envoyer
        debutlistefin=[debutlistefin,stock_temp(:,1+(indiceminn-1)*taillestockmax)];
        stock_temp(:,(1+(indiceminn-1)*taillestockmax):(indiceminn*taillestockmax-1))=
            stock_temp(:,(2+(indiceminn-1)*taillestockmax):(indiceminn*taillestockmax));
        tablerac_temp(indiceminn)=tablerac_temp(indiceminn)-1;
        taillebatch=taillebatch-1;
        batch(indiceminn)=batch(indiceminn)-1;

        %reremplir le stock
        [finlistedebut,stock_temp,tablerac_temp]=cadpartiel_multirac_ferr(
            finlistedebut,stock_temp,taillestockmax,nbrac,tablerac_temp);
    end
else %dans ce cas taillebatch==1
    minn=tailleliste+1;

```

```

    for i=1:nbrac
        if tablerac_temp(i)>0
            retardi=N(stock_temp(:,(i-1)*taillestockmax+1),0);
            if retardi<minn
                minn=retardi;
                indicemin=i;
            end
        end
    end
    debutlistefin=[debutlistefin,stock_temp(:,1+(indicemin-1)*taillestockmax)];
    stock_temp(:,(1+(indicemin-1)*taillestockmax):(indicemin*taillestockmax-1))=
        stock_temp(:,(2+(indicemin-1)*taillestockmax):(indicemin*taillestockmax));
    tablerac_temp(indicemin)=tablerac_temp(indicemin)-1;
    [finlistedebut,stock_temp,tablerac_temp]=cadpartiel_multirac_ferr(
        finlistedebut,stock_temp,taillestockmax,nbrac,tablerac_temp);
end
nbtotbatch=nbtotbatch+1;
end
%on a fini la boucle où l'on a donc fait passer la batch en faisant
%passer les éléments un par un en rereplissant le stock à chaque fois.
listefinale=debutlistefin;

function [listefinale] = switch_peinture(listeinit)
    n=size(listeinit,2);
    liste=listeinit;
    listefinale=[];
    % exemple si 5, 2 et 3 peuvent être intervertis, il faut
    % à partir de 52143 et 53142 pouvoir retrouver 23145.
    % comme dans N ici on prend pas le retard exact, mais la différence
    % avec le premier considéré, notre meilleur sera 2 puis 3 puis 1 etc...
    % c bon. Si on avait pris le plus en retard, on aurait pris 3 dans l'un
    % et 2 dans l'autre cas, ca ne va pas.
    % ici n puis n-1 puis n-2, donc complexité n*(n-1)/2 ~ n^2
    for i=1:(n-1)
        premier=liste(:,1);
        meilleur=premier;
        indicemeilleur=1;
        Nmeilleur=N(meilleur,i-1);
        for j=2:(n-i+1) %car liste est de taille n-i+1 dans cette boucle
            jeme=liste(:,j);
            if (jeme(3,1)==premier(3,1))&&(N(jeme,i-1)<Nmeilleur)

```

```

        %i-1 car la taille de la liste finale est provisoirement de
        %cette taille. Le prioritaire est celui qui a le N minimum
        %car N est l'avance. retard max = N min, en parlant de
        %retard relatif à la i-1 eme place. (pas le retard
        %par rapport à sa position initiale)
        meilleur=jeme;
        Nmeilleur=N(meilleur,i-1);
        indicemeilleur=j;
    end
end
liste(:,indicemeilleur)=premier;
%on place alors le premier à la place du meilleur
%et on prend le meilleur dans la liste finale
listefinale=[listefinale,meilleur];
liste=liste(:,2:(n-i+1));
end
listefinale=[listefinale,liste];

function [listefin,list,liste2] = reseq_multirac_poidstotal_N2(listedebut,taillestockmax,nbrac)
%on va faire une matrice stock dont les lignes de 1 à taillestockmax
% correspondent au premier rac, puis ensuite de i+i*taillestockmax à
% (i+1)*taillestockmax pour le (i+1)^eme rac. Donc sa taille totale est de
% nbrac*taillestockmax
tailleliste=size(listedebut,2);
[finlistedebut,stock_temp,tablerac_temp]=reseqpartiel_multirac_poidstotal(
    listedebut,tailleliste*ones(4,taillestockmax*nbrac),taillestockmax,nbrac,zeros(1,nbrac));
%on met (tailleliste)*ones(4,taille) mais on s'en fout de toute facon on
%touche jamais à ces valeurs grace a tablerac_temp qui nous donne le
%nombre d'éléments de chaque rac.
list=[];
n=size(finlistedebut,2);
listefin=[];
tabletest=[];
while (size(finlistedebut,2)+sum(tablerac_temp))~=0
    %déterminer d'abord quel est le rac qui a le retard cumulé le plus
    %grand, ensuite prendre le premier élément de ce rac, et répéter
    %l'opération tant que (la condition du while)

    %initialisation tout d'abord
    %on cherche le numéro du rac qui a le max de retard cumulé ie le
    %min de moyenne des pénalités N2

```

```

maxretardcum=exp(tailleliste)*taillestockmax;
%comme on prend le min il faut prendre une borne sup comme
%minimisation et pas 0, on prend tailleliste*nbrac

%recherche du min ensuite (retard cumulé max)
for j=1:nbrac
    if tablerac_temp(j)>0
        rac_j=stock_temp(:,((j-1)*taillestockmax+1):((j-1)*taillestockmax+
            tablerac_temp(j)));
        penalites=[];
        for k=1:size(rac_j,2)
            penalites=[penalites,N2(rac_j(:,k),0)];
        end

        retardcum_j=mean(penalites,2); %en fait c la moyenne ici
        if retardcum_j<maxretardcum
            numrac_maxretardcum=j;
            maxretardcum=retardcum_j;
        end
    end
end

%notre max est donc maxretardcum, qui correspond au rac
%numrac_maxretardcum, on va donc prendre le premier élément de ce
%rac et mettre à jour le rac
listefin=[listefin,stock_temp(:,(numrac_maxretardcum-1)*taillestockmax+1)];
if tablerac_temp(numrac_maxretardcum)>1
    stock_temp(:,((numrac_maxretardcum-1)*taillestockmax+1):((numrac_maxretardcum-1)*
        taillestockmax+tablerac_temp(numrac_maxretardcum)-1))=stock_temp(:,
        ((numrac_maxretardcum-1)*taillestockmax+2):((numrac_maxretardcum-1)*
        taillestockmax+tablerac_temp(numrac_maxretardcum)));
end
tablerac_temp(numrac_maxretardcum)=tablerac_temp(numrac_maxretardcum)-1;
[finlistedebut,stock_temp,tablerac_temp]=reseqpartiel_multirac_poidstotal(
    finlistedebut,stock_temp,taillestockmax,nbrac,tablerac_temp);

    list=[list;tablerac_temp];

end % fin du while (size(finlistedebut,2)+sum(tablerac_temp))~=0

```

```

function [liste_avretcum,liste_avretmax] = exp_switch3(taillestock,nbrac)
    %ces fonctions regardent la différence si on introduit le switch par
    %rapport à la situation initiale

    %cette fonction regarde avant le stock de reséquenceement pour le
    %montage, où intervient le deuxième switch, on compare sans switch,
    %puis avec switch avant le montage puis avec les deux switch pour un
    %accès non direct, avec des racs
    %comme exp_switch2 mais à accès non direct

    %on va considérer qu'il y a 5 racs par exemple (taille des racs par ex
    %ça peut être 2,5,10,15,20,25,30)

    %dans le résultat qu'on renvoie, pour une taille de stock
    %taillestock(i), on met les résultats sur une colonne i.
    %on aura donc:
    % 2e ligne pour les retards cumules sans switch
    % 3e ligne pour les retards cumules avec un switch
    % 4e ligne pour les retards cumules avec deux switch
    % 5e ligne pour les avances cumulees sans switch
    % 6e ligne pour les avances cumulees avec un switch
    % 7e ligne pour les avances cumulees avec deux switch

    listeinit=film_taux_modeles(20000,10,10,10);
    entreeferrage=cadmulti2(listeinit,10,10,10);
    %on suppose que le stock initial est de 5 racs de taille 20
    sortieferrage=perturb_perso(entreeferrage,18,30,-52,23,.47);
    apresswitch=switch_peinture(sortieferrage);

    for i=1:size(taillestock,2)
        entreeferrage1=cadpeintmulti2(sortieferrage,taillestock(i),nbrac,10);
        entreeferrage2=cadpeintmulti2(apresswitch,taillestock(i),nbrac,10);

        [sortiepeinture1,sortiepeinture2]=perturb_perso2(entreeferrage1,entreeferrage2,
            20,40,-60,20,.35);
        %indice 1 pour sans switch, 2 pour avec le switch apres le
        %ferrage, le premier switch

        liste_avretcum(1,i)=taillestock(i);
        liste_avretcum(2,i)=retards_cumules(sortiepeinture1,.95);
    end

```

```
liste_avretcum(5,i)=avances_cumulees(sortiepeinture1,.95);

liste_avretmax(1,i)=taillestock(i);
liste_avretmax(2,i)=retards_max(sortiepeinture1,.95);
liste_avretmax(5,i)=avances_max(sortiepeinture1,.95);

apresswitch1=switch_montage(sortiepeinture1);
apresswitch2=switch_montage(sortiepeinture2);

liste_avretcum(3,i)=retards_cumules(apresswitch1,.95);
liste_avretcum(6,i)=avances_cumulees(apresswitch1,.95);

liste_avretcum(4,i)=retards_cumules(apresswitch2,.95);
liste_avretcum(7,i)=avances_cumulees(apresswitch2,.95);

liste_avretmax(3,i)=retards_max(apresswitch1,.95);
liste_avretmax(6,i)=avances_max(apresswitch1,.95);

liste_avretmax(4,i)=retards_max(apresswitch2,.95);
liste_avretmax(7,i)=avances_max(apresswitch2,.95);
save expswitch3test
end
```