



HAL
open science

Politiques de pilotage pour l'optimisation d'un système de production de semi-conducteurs

Hai Binh Nguyen

► **To cite this version:**

Hai Binh Nguyen. Politiques de pilotage pour l'optimisation d'un système de production de semi-conducteurs. Automatique / Robotique. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2007. Français. NNT: . tel-00212271

HAL Id: tel-00212271

<https://theses.hal.science/tel-00212271>

Submitted on 30 Jan 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

REMERCIEMENTS

Une thèse est rarement le fruit du travail d'une personne seule, isolée du monde : elle est le résultat de rencontres, d'échanges, de discussions. Je tiens donc à remercier tous ceux qui ont permis à mon travail de thèse d'être ce qu'il est.

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de thèse et mon co-encadrant de ce travail de thèse. Un grand merci à Monsieur Christian Commault qui m'a soutenu chaleureusement et m'a guidé dans l'analyse et le traitement rigoureux des étapes successives de recherche et des problèmes rencontrés. Je remercie aussi beaucoup Monsieur Stéphane Mocanu pour son aide plus spécifique dans l'exploration de la problématique complexe du système de production de semi-conducteurs.

J'aimerais aussi remercier Monsieur Didier Georges qui m'a accueilli au sein du Département Automatique de GIPSA-Lab dans le cadre de cette thèse de doctorat. Je remercie aussi tous les membres de l'équipe SED pour leur accueil et leur soutien.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à Monsieur Yannick Frein pour l'honneur qu'il me fait en présidant ce jury. Je suis également reconnaissant envers Monsieur Laurent Hardouin et Monsieur Damien Trenteseaux d'avoir accepté d'être les rapporteurs de ma thèse, ainsi qu'envers Madame Hélène Marian pour sa participation au jury de soutenance.

Merci à tout mon entourage, famille et amis, qui m'ont soutenu durant ces dernières années.

Enfin merci à toutes celles et tous ceux qui ont rendu mon séjour au sein de ce laboratoire agréable, trop nombreux pour que je puisse les citer tous.

TABLE DES MATIÈRES

Liste des Figures	3
Chapitre 1 : Système de production des semi-conducteurs	5
1.1 Histoire et Évolution de la production des semi-conducteurs	5
1.2 Le processus de fabrication des circuits intégrés	9
1.3 Exemple de fabrication d'un transistor	15
1.4 Wafer dans la Fab	20
Chapitre 2 : Modélisation et Evaluation de performances des systèmes ré-entrants	24
2.1 Quelques définitions	24
2.2 Contexte de l'étude	26
2.3 Modélisation d'un système de production de semi-conducteurs	27
2.4 Performances du système	30
2.5 Particularités d'un système ré-entrant	30
Chapitre 3 : Politiques de pilotage	37
3.1 Introduction	37
3.2 Politiques avec priorité au buffer	38
3.3 Politiques avec priorité à la pièce	42
3.4 Politiques mixtes - Classe LS (Least Slack)	46
3.5 Extension au cas multiproduit	49
Chapitre 4 : Stabilité	56
4.1 Définition	56
4.2 Analyse de la stabilité	59
4.3 Stabilité des politiques de pilotage classiques	71

4.4	La stabilité des autres types de systèmes	72
Chapitre 5 :	Simulation	74
5.1	Le logiciel utilisé	74
5.2	Modèles	74
5.3	Simulations & Résultats	75
Bibliographie		95

LISTE DES FIGURES

1.1	<i>(a) Un lingot de silicium pur; (b) Les wafers découpés d'un lingot; (c) La relation de la taille des wafers avec le diamètre de 100 mm à 450 mm</i>	6
1.2	<i>(a) La vente annuelle des semi-conducteurs dans le monde. Le document de World Semi-conducteur Trade Statistics; (b) Les ventes des différentes industries de 1980 à 2000 et prévues jusqu'à 2010</i>	8
1.3	<i>Le Procédé de Lithographie</i>	12
1.4	<i>Machine de Test (gauche), Wafer Bump Inspection system IS-300 / IS-3300 et une machine de Polissage (droite), c'est un SpeedFam-IPEC's Momentum Chemical Mechanical Planarization System</i>	15
1.5	<i>Le processus de 18 étapes de fabrication d'un transistor</i>	18
1.6	<i>FOUP à capacité de 25 wafers dans l'industrie des semi-conducteurs</i>	21
2.1	<i>Un système ré-entrant</i>	27
2.2	<i>Un système ré-entrant Multiproduit</i>	29
2.3	<i>Exemple de calcul de la charge</i>	31
2.4	<i>Un mauvais choix peut saturer le système</i>	34
3.1	<i>Illustration de la politique FBFS</i>	39
3.2	<i>Illustration de la politique LBFS</i>	41
3.3	<i>La Station1 avec 5 pièces données</i>	42
3.4	<i>La sortie de la station sous le régime FIFO</i>	44
3.5	<i>La sortie de la station sous le régime EA</i>	45
3.6	<i>La priorité des buffers sous le régime LBFS Multiproduit</i>	50
3.7	<i>L'exemple de LBFS Local</i>	52
3.8	<i>L'exemple de FIFO(LBFS)</i>	53

4.1	<i>Exemple de système acyclique</i>	61
4.2	<i>Système du contre-exemple pour FIFO</i>	63
4.3	<i>Un système cyclique simple</i>	67
4.4	<i>Le déroulement du système</i>	67
4.5	<i>Système du contre-exemple de LBFS-multiproduit</i>	69
4.6	<i>L'encours des buffers dans le système</i>	70
5.1	<i>Modèle 1</i>	78
5.2	<i>Charge théorique et en simulation</i>	88
5.3	<i>Encours total du système en fonction du taux d'arrivée</i>	89

INTRODUCTION

Les produits à base de semi-conducteurs sont de plus en plus présents dans notre vie quotidienne : dans le téléphone portable, l'ordinateur, la voiture... L'industrie des semi-conducteurs d'aujourd'hui s'affirme de jour en jour comme l'industrie la plus importante du monde. En effet, son revenu annuel a déjà dépassé le chiffre de 240 milliards de dollars en 2006 et est en constante augmentation. Le volume de vente prévu atteindra 10% du produit brut mondial et 25% du chiffre d'affaire de l'industrie électronique en 2010.

Face de ce développement de la demande, les systèmes de production des semi-conducteurs ont dû s'adapter à une production de masse. La technologie des circuits intégrés nécessite une gamme de production complexe qui comporte un grand nombre d'opérations (couramment des centaines) afin de créer plusieurs couches de circuit sur la même base de silicium. Une caractéristique intéressante de la fabrication des circuits intégrés est que la réalisation de chaque couche nécessite presque les mêmes opérations. Des critères économiques liés au coût des machines et de maintenance des salles blanches imposent l'exploitation du caractère répétitif des opérations dans la gamme en regroupant les opérations de même type sur la même machine (ou groupe de machines). Ceci permet de réduire le nombre de machines nécessaires à la réalisation de la gamme de production. En contrepartie, le routage du produit dans le système devient très complexe avec des retours sur la même machine à différentes étapes du processus de fabrication. Le nombre de passages sur une machine correspond au nombre d'opérations similaires que le produit devra subir au long de sa gamme de production. Ce type de système est appelé système ré-entrant.

Le principal problème du pilotage de flux dans les systèmes ré-entrants est celui du choix du produit à traiter en premier. Lorsqu'une machine devient libre, plusieurs produits se trouvant à des étapes différentes dans leur gamme de production peuvent être en attente d'un traitement sur cette même machine. Le choix du produit à traiter en premier peut être déterminant pour les performances du système. Dans la pratique les décisions sont basées

sur une politique de pilotage. En règle générale une politique de pilotage utilisée dans un système ré-entrant présente les caractéristiques suivantes :

- **Distribuée (ou Locale)**. Vu la complexité du système et le grand nombre de machines, de produits et d'opérations impliqués, une optimisation globale n'est pas envisageable. On utilise plutôt des politiques distribuées, c'est-à-dire que le choix des priorités de pièces se fait au niveau de chaque machine. Le choix de priorité des pièces sera fait exclusivement en fonction des données disponibles à la machine et des informations portées par la pièce. On peut prendre en compte, par exemple, le temps passé par la pièce dans le système mais on ne peut pas considérer la longueur de la file d'attente d'une autre machine.

- **Priorités des pièces**. Les politiques qu'on considère sont basées sur la priorité des pièces. Si une machine est disponible et que plusieurs pièces attendent un service sur cette machine la politique de pilotage va établir la priorité de chaque pièce. Dans le cas le plus simple, celui de la politique FIFO, la priorité des pièces est donnée par leur date d'arrivée devant la machine.

L'utilisation de politiques de pilotage basées sur la priorité des pièces dans des systèmes ré-entrants engendre un nouveau type de problème : **la stabilité** de la politique de pilotage. La stabilité des politiques de pilotage revêt une importance particulière pour les systèmes réentrants. Du fait que les flux de produits se croisent plusieurs fois, les pièces à des étapes différentes de production peuvent interférer et se bloquer mutuellement. Ceci peut engendrer la dégradation sévère des performances du système. On peut constater une augmentation continue de l'en-cours et du temps de séjour alors qu'aucune machine n'est en saturation (ce phénomène est appelé instabilité).

Le problème de la stabilité d'une politique est intéressant par sa difficulté théorique et par son importance pratique. La preuve de la stabilité est difficile à faire dans le cas général. Dans certains cas des contre-exemples peuvent être trouvés mais dans la plupart des cas le problème de la stabilité reste ouvert

Notre travail a pour objet de :

- Étudier la stabilité et les performances des politiques de pilotage. Dans le cadre de la thèse, on évalue une politique de pilotage par rapport aux performances à long terme du système. Les performances auxquelles on s'intéresse le plus souvent sont : Le temps moyen

de séjour (autrement dit, c'est le temps cycle ou le temps de production d'un produit), et le nombre de produits présents dans le système (en-cours) .

- Développer des politiques pour les systèmes ré-entrants multiproduit. De nos jours les systèmes de production des semi-conducteurs ne fabriquent plus un seul type de produit mais plusieurs en parallèle, en raison de la diversification de la demande. Les systèmes multiproduit sont donc de plus en plus fréquents dans l'industrie des semi-conducteurs et il devient nécessaire d'étudier les politiques de pilotage dans ce contexte. Jusqu'à présent, la plupart des politiques connues et étudiées en détail sont limitées aux systèmes mono-produit. En fait, l'application de ces politiques aux systèmes multiproduit n'est pas toujours évidente. Certaines politiques gardent leurs caractéristiques et leurs points forts mais ce n'est pas toujours le cas.

L'évaluation des politiques a été faite à travers des méthodes analytiques et un outil de simulation.

Le contenu de notre travail est organisé en 5 chapitres :

Chapitre 1 : Système de production des semi-conducteurs

Dans ce chapitre, on présentera un bref survol de la production des semi-conducteurs avec l'histoire de son développement et les caractéristiques de cette production. On discutera aussi l'exemple de la fabrication des transistors afin de comprendre les opérations de fabrication des circuits intégrés et l'organisation du système de production des semi-conducteurs.

Chapitre 2 : Modélisation et évaluation de performances des systèmes Ré-entrants

Dans ce chapitre, on s'intéresse aux systèmes ré-entrants et à la modélisation d'un système de production par un modèle ré-entrant. Des définitions concernant les performances du système sont aussi présentées. Enfin, dans ce chapitre, le cadre de l'étude et le problème du sujet seront définis.

Chapitre 3 : Politiques de pilotage

Dans ce chapitre, on présentera les politiques de pilotage. Il y a plusieurs politiques classiques présentées telles que FIFO, LBFS, LS . . . et aussi des extensions dans le cas multiproduit comme EA, LBFS-Multiproduit, LBFS-Locale. La nouvelle politique FIFO(LBFS) sera proposée.

Chapitre 4 : Stabilité

Dans ce chapitre, on définira la stabilité des politiques de pilotage. Des preuves de la stabilité pour certaines politiques et des contre-exemples seront présentés ici.

Chapitre 5 : Simulation

Dans ce chapitre, on présentera des expériences de l'étude des politiques en simulation. Sur quelques exemples typiques on comparera les performances des quatre politiques importantes : FIFO, LBFS-Multi, EA et FIFO(LBFS).

Ce travail a donné lieu aux publications suivantes :

- H. B. Nguyen, C. Commault, and S. Mocanu. On the stability of the last buffer first serve scheduling rule for multiproduct Re-Entrant systems. Technical report, LAG, 2005.

- H. B. Nguyen, C. Commault, and S. Mocanu. Etude en simulation de politiques de pilotage multiproduit dans l'industrie des semi-conducteurs. In *Colloque IPI : "Comprendre et piloter la mutation des systèmes de production "*, Allevard, 2006. Cet article a été publié dans l'ouvrage Hermès "Les systèmes de production. Approches interdisciplinaires et mutations", pp 33-45, Octobre 2007.

- H. B. Nguyen. Politiques de pilotage de systèmes à flux complexe. In *JD-JN-MACS*, Reims, 2007.

Chapitre 1

SYSTÈME DE PRODUCTION DES SEMI-CONDUCTEURS

Le système de production est un système qui fournit des opérations aux matières premières à l'entrée et sort les produits finals à la sortie [MS06]. Dans le domaine des semi-conducteurs, la matière première se compose de matériau semi-conducteur, de métal, de dopant et de matière isolante ; le produit final est un circuit intégré (IC), un circuit imprimé ou divers systèmes électroniques (comme les puces, le téléphone portable, la carte électronique ... etc) ; les opérations principales sur les semi-conducteurs sont l'oxydation, la photolithographie, la gravure, le dépôt, le dopage [BDPM06].

1.1 Histoire et Évolution de la production des semi-conducteurs

1.1.1 L'histoire de la production des semi-conducteurs

Le wafer de silicium, le matériel de la fabrication des circuits intégrés

Pendant une période le Germanium a été la matière première la plus utilisée en fabrication des semi-conducteurs, mais avec les nouvelles avancées scientifiques dans les semi-conducteurs au début des années 1960, il a été rapidement remplacé par le Silicium [MS04]. Puis, le Silicium est devenu la matière dominante depuis ce moment jusqu'à ce jour. Sa domination est fondée sur ses deux avantages de fabrication : l'oxydation est facile et la couche d'oxyde fournit une isolation excellente entre les étapes de la fabrication des circuits intégrés.

En plus, le Silicium dispose également de plusieurs autres avantages comme : il est très abondant dans la nature, ce qui permet de diminuer le prix de la matière première et il est capable d'opérer à plus haute température que le Germanium. Les avantages dans la fabrication sont les raisons principales qui expliquent l'émergence du silicium parmi les matériaux semi-conducteurs.

Cependant, du Silicium dans le sable à la matière première utilisable dans la fabrication des circuits intégrés le chemin est long. D'abord, on fond les cristaux de silicium dans une cuve, on l'épure à 99.99% de pureté et on le développe en barres de silicium monocristallin. Cette barre est découpée en disques très minces appelés wafers, comme illustré dans la figure 1.1. C'est le wafer qui est le matériel pour fabriquer les circuits intégrés. Ces wafers servent de substrat de silicium pour la fabrication de micro-structures en subissant des techniques avancées telles que le dopage, la gravure, la déposition d'autres matériaux et la photolithographie. Avec le développement de la technologie des semi-conducteurs et la demande du marché, la taille du wafer est allée croissant de 100 mm à 200 mm, 300 mm et 450 mm [J.T03].

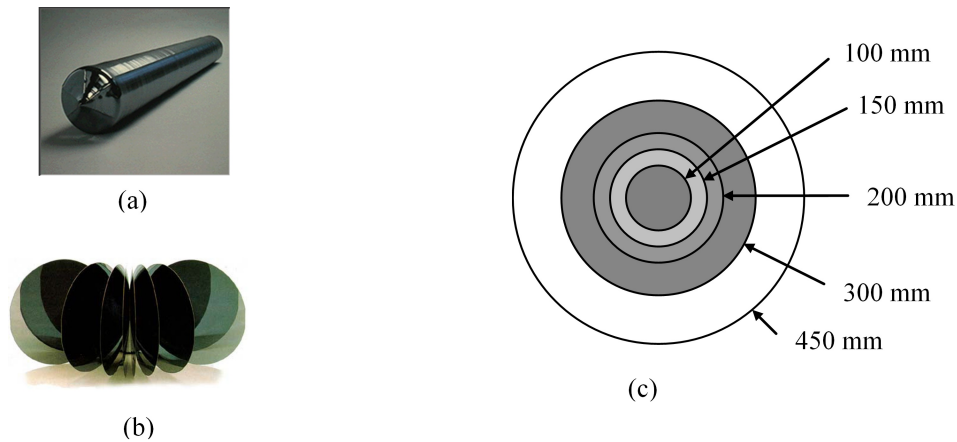


Figure. 1.1 – (a) Un lingot de silicium pur; (b) Les wafers découpés d'un lingot; (c) La relation de la taille des wafers avec le diamètre de 100 mm à 450 mm

La naissance du système de production des semi-conducteurs actuel

Début des années 1960, le premier circuit intégré (IC) est fabriqué avec succès par Texas Instruments et Fairchild Semiconductor, cet IC comporte plusieurs transistors et résistances pour créer des portes logiques simples et des circuits amplificateurs. Depuis ce premier succès, le nombre de dispositifs d'un circuit intégré double tous les deux ans et cette tendance était prévue pour se maintenir. Mais au milieu des années 70, cette tendance se ralentit et le nombre de dispositifs par puce augmente d'un facteur quatre tous les trois ans

et non pas tous les deux ans. Pour ces trente dernières années, l'augmentation du nombre de dispositifs par puce augmente à cette vitesse.

Début des années 1980, avec les deux crises de l'énergie, la fabrication des ICs devenait extrêmement coûteuse. Une chaîne de production à grand volume coûtait des millions de dollars (et coûte des milliards de dollars aujourd'hui). Un processus de fabrication des semi-conducteurs possède des centaines d'étapes séquentielles, avec une perte éventuelle de débit à chaque étape. Le rendement de la production était donc très bas et variait de 20% à 80% [MS06]. En face du coût élevé, du rendement bas et du challenge de la production de masse, les fabricants de semi-conducteurs ont déplacé leurs investissements vers l'automatisation et l'innovation dans la technologie du processus de fabrication (IC-CIM) [MS06]. L'utilisation des technologies avancées de l'ordinateur et de la programmation sont l'objectif de cette direction.

L'effort d'implantation de l'ordinateur dans la fabrication des circuits intégré (IC-CIM) a effectivement entraîné la diminution du temps de fabrication, l'accroissement du rendement, l'augmentation de la qualité et de la performance du produit [Ben03]. La démonstration de l'efficacité économique de la technique IC-CIM a été faite au cours des années 1980. Cette évolution signe la convergence de la science de la production et de la technologie de fabrication des semi-conducteurs qui engendre une approche scientifique et systématique de la production des semi-conducteurs aujourd'hui.

1.1.2 Quelques chiffres relatifs à l'industrie des semi-conducteurs

En étant le cœur de l'industrie électronique, la fabrication des semi-conducteurs est l'industrie la plus importante du monde. Le revenu annuel a déjà dépassé le chiffre de 200 milliards de dollars en 2005 (voir la figure 1.2.a), et augmentera encore dans des années qui suivent [J.T03]. La figure 1.2.b montre le volume de ventes de 1980 à 2000 et prévu jusqu'à 2010 [MS06]. Ce volume atteindra 10% du produit brut mondial et 25% de la distribution de l'industrie électronique en 2010. On estime qu'il y a eu environ 60 millions de transistors créés par habitant en 2001 et ce chiffre sera de près d'un milliard en 2010.

Les chiffres ci-dessus illustrent la situation réelle et le développement de l'industrie des

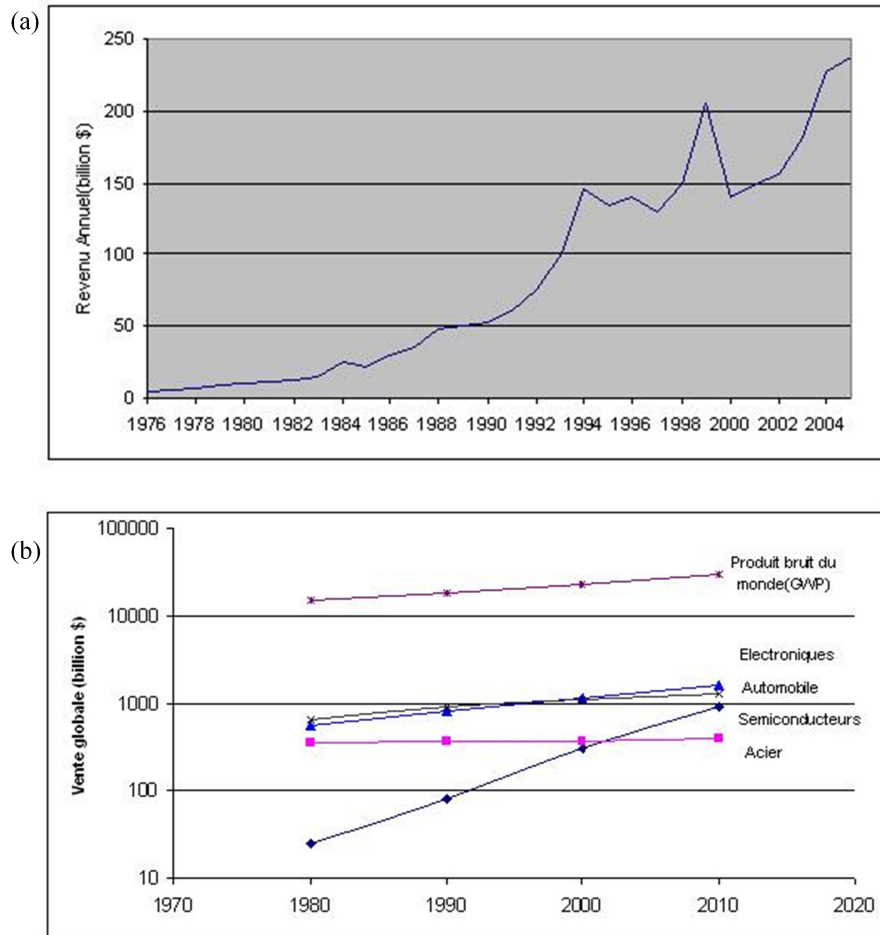


Figure. 1.2 – (a) La vente annuelle des semi-conducteurs dans le monde. Le document de World Semi-conducteur Trade Statistics; (b) Les ventes des différentes industries de 1980 à 2000 et prévues jusqu'à 2010

semi-conducteurs. La distribution se centre dans les pays développés en Amérique, en Europe, en Asie avec les grands vendeurs comme : Intel (Etats-Unis), Toshiba (Japon), Texas Instrument (Etats-Unis), Samsung (Corée), StMicroelectronics (France/Italie).

1.2 Le processus de fabrication des circuits intégrés

1.2.1 Introduction

En général, la production des semi-conducteurs peut être divisée en trois grandes étapes [Jae02] :

- La création du wafer qui utilise le silicium pour produire des wafers vierges.
- La fabrication des circuits intégrés sur le wafer.
- L'assemblage qui découpe le wafer en morceaux et l'assemble en boîtes.

La production du wafer (ou la création du support),

On crée le wafer par développement du cristal de silicium. Le processus initial nécessite une graine de cristal de silicium. C'est en fait la forme la plus minuscule d'une structure cristalline qui a toutes les facettes d'un cristal complet. On laisse cette graine plonger dans un bain de silicium liquide grâce à une tige. Quand l'équilibre thermique est atteint la cristallisation commence. En tirant lentement la graine vers le haut, on obtient une barre de silicium. Dans le même temps, la tige et le contenant du bain sont tournés en sens opposé. La croissance cristalline étant uniforme dans tous les sens, la tige est parfaitement circulaire. La structure de cette barre est monocristalline (c'est-à-dire qu'il s'agit d'un gros morceau de silicium qui n'est qu'un seul et unique cristal et non pas un ensemble de petits cristaux agglomérés). Ce processus dure des heures et le diamètre du cylindre obtenu sera supérieur au diamètre nécessaire. Il sera par la suite rectifié et découpé en tranches. Ces tranches sont appelées wafers.

Pour la petite histoire, la taille du wafer était au début de 100 mm, puis 200 mm pour atteindre 300 mm de diamètre. La technologie actuelle nous permet de produire des wafers de 450 mm de diamètre (illustré par la figure 1.2). Dans l'industrie, on n'utilise que le wafer de 300 mm, l'utilisation du wafer de 450 mm a besoin encore du temps pour que le système de production s'adapte.

Après leur création, les wafers sont disposés et transportés dans des boîtes en plastique sous vide pour les protéger de la poussière et des vibrations. Cette boîte est appelée le FOUP (Front Opening Unified Pod), on va en parler de façon plus détaillée après.

La fabrication des circuits intégrés sur wafer

Lorsque le wafer est fabriqué on l'envoie dans une fonderie de semi-conducteurs pour y construire les IC. Dans l'industrie microélectronique, une fonderie désigne une unité de fabrication de circuits intégrés ou puces électroniques. On la désigne aussi couramment sous le nom de *fab* (de l'anglais *fabrication plant*). Le cœur d'une *fab* réside dans sa salle blanche, une zone où l'environnement est contrôlé pour éviter toute micro-poussière et où la moindre micro vibration est proscrite. La salle blanche est remplie d'équipements extrêmement coûteux nécessaires à la fabrication d'un circuit intégré à partir du wafer.

L'assemblage ou packaging

Une fois toutes les étapes réalisées, le wafer est découpé (sciage) et chaque puce est mise en boîtier (les boîtiers sont généralement en plastique ou en céramique). Ces étapes ne se réalisent pas dans les fabs mais dans d'autres types d'usines dédiées à l'assemblage, qui sont nettement moins coûteuses (appelées couramment Back-End plant).

Dans le cadre de la thèse, on s'intéresse à la partie du système de production des semi-conducteurs qui est le système de fabrication des circuits intégrés. Donc, dans les sections qui suivent, on va détailler les opérations nécessaires à cette fabrication.

1.2.2 Oxydation

Lors de l'exposition à l'oxygène, la surface du wafer silicium s'oxyde pour former du silicium dioxyde. Cette couche d'oxyde est un isolant électrique de haute qualité. L'objet de cette étape est de créer à la surface du silicium un oxyde (SiO_2) qui sera utilisé, soit comme isolant diélectrique (grille de transistor MOS), soit comme couche de protection.

L'oxydation du silicium peut être effectuée de plusieurs manières :

- ***L'oxydation thermique***, il s'agit d'un procédé qui forme une couche de silice (SiO_2) à la surface du wafer de silicium par l'oxydation dans un four à haute température (700°C à 1250°C)

- ***L'oxyde déposé***, il s'agit d'un procédé qui crée la couche de silice sur la surface du wafer en y déposant la vapeur de SiO_2 à la température de environ 400°C.

1.2.3 Lithographie

La lithographie est l'opération qui consiste à créer des canaux sur la surface de l'oxyde de silicium en la creusant selon un motif défini, afin de servir aux opérations suivantes comme l'implantation et l'interconnexion. C'est-à-dire qu'on grave la couche de SiO_2 pour y déposer les autres matériaux ou juste pour isoler les dispositifs entre eux. Ce procédé comporte en général deux étapes : la création de la couche de protection et la gravure de l'oxyde. Parce que la gravure est réalisée par une technique spéciale dont le principe général est la corrodabilité de la surface, la couche de protection protège les zones non concernées. Cette construction est appelée la Photolithographie et le creusement est la Gravure. La Figure 1.6 montre le procédé de lithographie.

Photolithographie

La photolithographie est le fait de graver selon un certain motif une couche mince d'un matériau de protection (qui est souvent une résine photosensible). Le motif à graver se trouve initialement (en positif ou en négatif) sur un support appelé masque. Il s'agit d'une plaque de verre comportant une couche de chrome ou de gélatine sur laquelle a été gravé le motif que l'on veut reproduire.

Le wafer couvert d'une couche mince de protection est déposé sous un faisceau de rayons U.V. à travers le masque. Cette couche est attaquée et formée comme le motif du masque. A la fin de cette opération, on a construit un masque en résine sur le wafer dont la forme est exactement celle du motif.

Lorsque la fabrication du circuit intégré suppose de réaliser plusieurs couches, la photolithographie doit être bien alignée. Pour cela, à la conception des masques, on laisse dans un coin un motif spécial afin d'aligner les couches [MS06].

Lithogravure

Succédant immédiatement à la photolithographie, la gravure est parfois assimilée à cette opération sous le nom de lithogravure. On la connaît aussi sous le nom anglais Etching. La gravure consiste à attaquer et enlever des parties de la couche de silicium dioxyde qui n'est

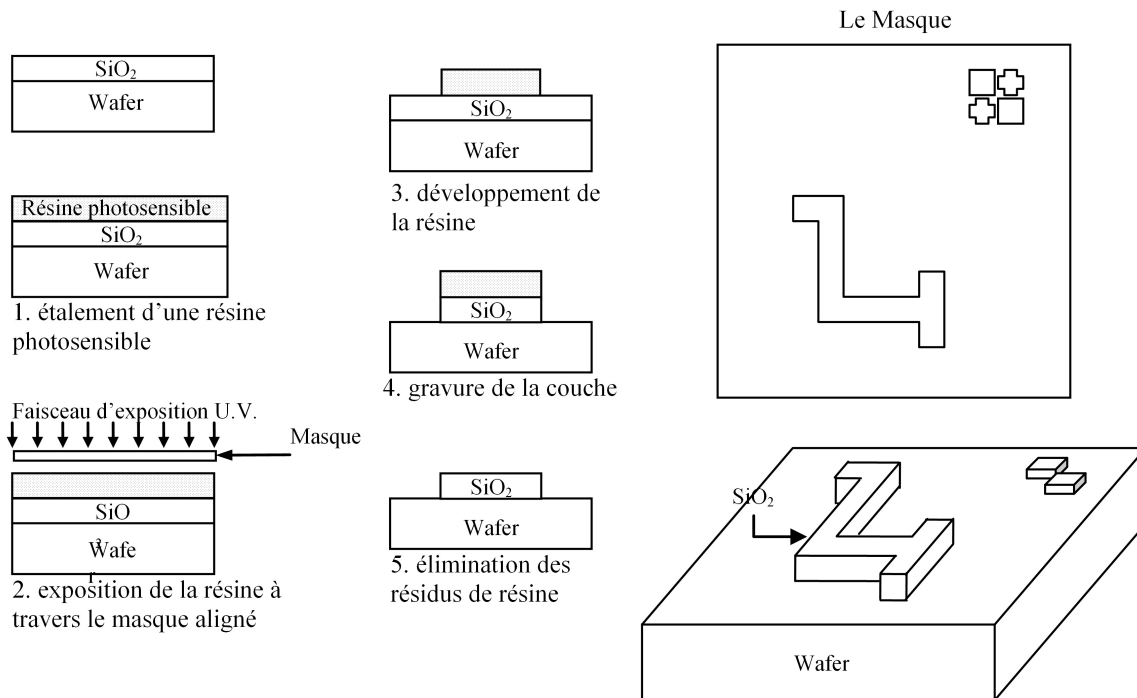


Figure. 1.3 – *Le Procédé de Lithographie*

pas protégée par le masque de protection créée par l'étape de photolithographie.

Au début, la gravure s'est faite par voie d'attaque chimique en milieu humide. Les procédés de gravure sèche ont été introduits plus récemment pour résoudre les problèmes de la gravure humide.

La figure 1.3 montre un procédé simple de lithographie. Dans l'environnement de production de masse de l'industrie des semi-conducteurs, ces étapes sont réalisées par les machines de lithographie, inutile de préciser que ces équipements sont très coûteux.

1.2.4 Dopage du Silicium

Le dopage consiste à injecter des impuretés qui se substituent à des atomes de silicium dans le réseau cristallin de façon à le rendre de type p ou n. Il s'agit de charger électriquement les zones de silicium mises à nu par l'étape de gravure. Le dopage peut être réalisé de deux façons :

-*La diffusion thermique* est l'introduction des impuretés dans la substance de silicium qui se déroule à haute température (environ 1000°C). Pendant des années, la diffusion thermique était la méthode principale pour l'introduction dans le cristal de silicium des impuretés comme le bore, l'aluminium (pour créer le type p), le phosphore et l'arsenic (pour créer le type n). Aujourd'hui, la diffusion est utilisée pour la réalisation de couches dont la profondeur est d'environ un dixième de micron.

-*Implantation Ionique*

Elle permet d'introduire des impuretés dans un substrat grâce à l'énergie cinétique qui leur est fournie dans un accélérateur (implanteur). Les molécules de dopant sont implantées verticalement dans la surface du silicium par un faisceau d'ions de haute intensité.

L'avantage principal de cette technique est le contrôle précis du nombre d'ions implantés. Avec cet avantage cette technique est préférée à la diffusion thermique, notamment pour les circuits à haute densité d'intégration et l'implantation ionique tend à la remplacer systématiquement dans la production des semi-conducteurs.

1.2.5 Dépôt

Le dépôt consiste, en général, à déposer sur la surface du wafer une couche de matériau donné, qui peut être un diélectrique (comme le silicium oxyde) ou du métal. En présentant les opérations dans les parties précédentes, on a aussi abordé la technique du dépôt de couche mince comme *l'oxyde déposé* de l'opération d'oxydation, le dépôt du matériau de protection dans l'opération de photolithographie. Dans cette partie, on s'intéresse en plus au dépôt de métal, dit métallisation, qui sera ensuite gravé pour définir les contacts (qui permettent de relier le circuit intégré au monde extérieur) et les interconnexions (qui relient certains composants entre eux).

La métallisation intervient en fin de fabrication, lorsque la surface du wafer est très irrégulière (en raison de toutes les étapes précédentes). Le dépôt métallique est donc relativement épais afin de recouvrir parfaitement toute la surface. Le métal le plus utilisé est l'aluminium car il satisfait à un grand nombre de conditions : l'adhésion de la couche de métal sur le silicium, la gravure facile, la bonne conductivité électrique . . .

Le dépôt métallique sur le wafer peut être réalisé par deux méthodes :

-*L'évaporation sous vide* est une technique qui condense la vapeur de métal sur la surface du wafer afin d'y créer une couche mince de métal.

-*La pulvérisation cathodique* est un procédé de dépôt en phase vapeur. La couche mince de métal est formée par la condensation des atomes métalliques sur la surface de la plaquette silicium. La différence avec la méthode précédente est que les atomes ne sont pas vaporisés par transformation de phase, mais ils sont expulsés par le bombardement des ions positifs contenus dans un plasma sur la cible de métal qui est en potentiel négatif. L'avantage de cette technique est la possibilité de dépôt de tous les matériaux sur tous les types de substrat qui acceptent une mise sous vide et un léger échauffement, et une meilleure adhérence sur les substrats. Cependant, l'inconvénient majeur est que l'énergie des atomes expulsés peut être suffisante pour endommager la surface du wafer.

1.2.6 Autres étapes

A part les étapes principales ci-dessus, la fabrication des semi-conducteurs dans l'industrie suppose encore d'autres étapes :

Le nettoyage du matériau de protection restant après la gravure est une petite étape mais obligatoire car ce matériau risquerait de produire des défauts s'il n'était pas retiré.

Le polissage mécanique et chimique, qui emploie un abrasif suspendu dans une boue chimique appliquée par des disques rotatifs sur la surface à traiter, permet de créer une surface parfaitement plane. Après le polissage, la surface du wafer est prête pour accueillir une autre couche.

L'inspection, il s'agit d'une étape critique du processus global de fabrication du wafer. En effet, il doit être inspecté minutieusement à l'aide de différents appareils spéciaux (les machines montrées dans figure 1.4 sont des exemples). Généralement, si les différentes phases de conception et le matériel rentrent dans les spécifications initiales, l'inspection du wafer ne concernera que l'aspect global du wafer, par exemple la planéité du wafer ou l'épaisseur des films.

Le test permet de contrôler après la fabrication pour identifier la qualité du wafer, c'est

aussi la qualité des circuits intégrés qui viennent d'être implantés sur le wafer.



Figure. 1.4 – *Machine de Test (gauche), Wafer Bump Inspection system IS-300 / IS-3300 et une machine de Polissage (droite), c'est un SpeedFam-IPEC's Momentum Chemical Mechanical Planarization System*

1.3 Exemple de fabrication d'un transistor

Grâce aux opérations élémentaires présentées précédemment, on construit les circuits intégrés en appliquant au wafer ces opérations dans un ordre donné. Cet ordre résulte de la gamme de production qui est la séquence d'opérations que la matière première doit suivre pour devenir le produit final. Les machines qui fournissent ces opérations constituent le système de production.

A la différence d'autres systèmes de production, celui de la fabrication des circuits intégrés possède des caractéristiques particulières : la grande taille (le système possède des centaines de machines, la gamme de production a des centaines opérations), le routage complexe ... nous reverrons tout cela en détail dans le deuxième chapitre. Ici, je propose d'analyser un exemple qui est le processus de la fabrication du transistor avec le but d'en tirer quelques enseignements généraux sur les systèmes de production des circuits intégrés. Dans cet exemple, on considère les opérations comme des éléments de la fabrication et on

ne s'intéresse pas trop à la technique de réalisation de chaque étape qui est naturellement du domaine des physiciens et des chimistes.

Ce processus de fabrication du transistor consiste en 18 étapes (montrées dans la figure 1.5) divisées en trois parties : l'isolation, la réalisation du transistor et les interconnexions [WT00] :

La réalisation de l'isolation . Le but de cette partie est de construire une isolation en silicium oxyde autour du transistor afin de l'isoler des autres transistors et de définir la zone active sur le wafer où le transistor va être installé. La réalisation de l'isolation comprend 7 étapes qui impliquent quatre types d'opération. Ces 7 étapes sont successivement : oxydation, photolithographie, gravure, dopage, oxydation, photolithographie et gravure.

Pour la réalisation, on crée d'abord une couche de silicium oxyde en oxydant la surface de silicium initial par voie thermique (étape 1). Puis on utilise la photolithographie (étape 2) et la gravure (étape 3) afin de graver cette couche d'oxyde et garder la zone qui va protéger la surface du dopage de l'étape suivante. Le dopage de l'étape 4 implante le bore au silicium dans des zones non protégées par l'oxyde, cette étape sert à créer l'isolation à la racine du transistor. Puis, on recouvre la surface du wafer par une autre couche d'oxyde (étape 5) et on définit la zone active du transistor en gravant cette couche (étapes 6 et 7). Alors, après ces sept étapes, la surface de silicium est bien préparée pour la construction du transistor.

La réalisation du transistor. On construit les parties principales du transistor dans la zone active. Les parties principales sont la grille, la source et le drain, elles vont y être créées dans la zone définie du wafer.

La grille est en fait composée par une couche mince d'oxyde isolant surmontée d'une couche épaisse de silicium polycristallin (étape 11). Pour réaliser cette grille on oxyde d'abord la surface de silicium pendant un court temps (étape 8) afin d'obtenir une couche mince d'oxyde. Puis on dépose une couche épaisse de silicium polycristallin pour former l'électrode supérieure conductrice de la grille (étape 9). Cette couche de polycristallin est ensuite photolithographiée (étape 10) et gravée (étape 11) pour avoir la grille comme prévu. Après la réalisation de la grille les zones de la source et le drain sont aussi définies.

La source et le drain trouvés sur le wafer sont des zones dopées avec un dopant donné, dans cet exemple c'est le phosphore (type n). Le processus de dopage est réalisé par la

diffusion du phosphore dans le substrat de silicium (étape 12) dans la zone réservée lors de la formation de la grille.

On a donc maintenant obtenu les parties principales constituant un transistor, ce qui reste à réaliser sont les connexions de chaque partie.

La réalisation des interconnexions va créer des connexions en métal de trois pôles vers l'extérieur en métallisation. On doit d'abord préparer l'isolation entre les pôles du transistor en déposant une couche d'oxyde isolant sur la surface (étape 13) et puis on construit les puits dans l'oxyde conduisant de chaque pôle à l'extérieur (étapes 14 et 15). Après le dépôt d'aluminium (étape 16), on le fait graver (étapes 17 et 18) pour former les plots de contact électrique.

Alors avec 18 étapes on a construit complètement le circuit intégré d'un transistor sur la surface d'un substrat silicium.

Dans l'industrie, en poursuivant une telle gamme de production, on peut fabriquer plusieurs transistors à la fois et sur un même wafer, chaque transistor prend une petite case sur le wafer. Après la création des circuits intégrés, les wafers sont transportés à des entreprises d'emballage où on les découpe et on réalise la boîte.

Pour la fabrication du transistor de l'exemple ci-dessus, on constate qu'il n'y a que 5 opérations mais qu'elles sont répétées tout au long de la gamme de production avec 18 étapes. Ces opérations sont l'oxydation, la photolithographie, la gravure, le dopage et le dépôt. En effet, la réalisation de l'isolation consiste en sept étapes dont deux d'oxydation, deux de photolithographie, deux de gravure et une de dopage. Autrement dit, dans toute la gamme, on a utilisé l'oxydation 3 fois, la photolithographie 5 fois, la gravure 5 fois, le dépôt trois fois et 2 fois du dopage. La répétition des opérations n'est pas spécifique à cet exemple, c'est aussi le cas dans la fabrication d'autres circuits intégrés plus complexes. Alors, on peut dire que la répétition des opérations dans la gamme de production est très importante. Cette caractéristique est aussi une propriété intéressante de la production des semi-conducteurs, qui influence directement l'organisation et la nature du système de production [UUS06].

Les machines qui réalisent les opérations sur les semi-conducteurs sont très chères, surtout celles servant à la production de masse dans l'industrie des semi-conducteurs, en particulier celles qui peuvent effectuer l'opération sur plusieurs wafers en même temps. Par

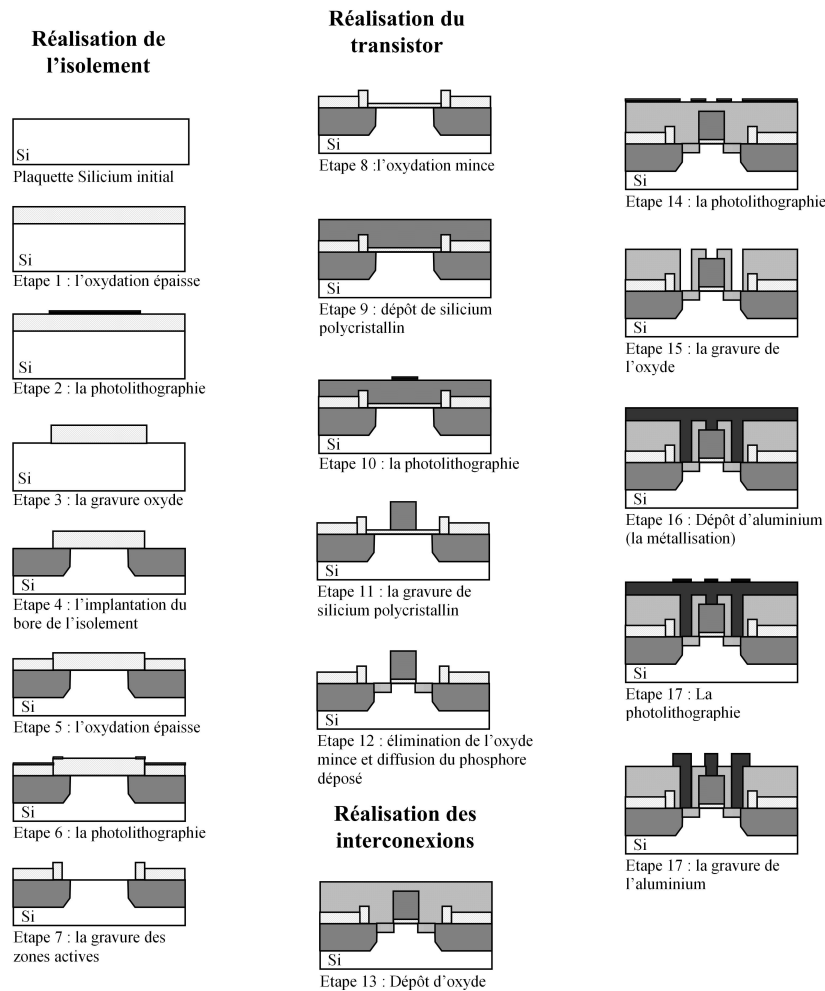


Figure. 1.5 – Le processus de 18 étapes de fabrication d'un transistor

exemple, les Steppers, les machines qui réalisent la photolithographie et fabriquées par AMAT, Canon ou Nikon sont des meilleures du monde et coûtent de 250 mille euros à 1,5 million d'euros ; ou un Alcatel 601 E qui est la nouvelle génération d'équipements de gravure sèche aux performances élevées, tout autant que son prix qui s'élève à 450 mille euros. Ces chiffres veulent dire qu'on ne peut pas multiplier facilement ces machines et que le coût des équipements d'une fab est toujours un problème crucial.

Une gamme réelle de production dans l'industrie consiste normalement en des centaines d'étapes qui sont des opérations élémentaires. Une partie de la fabrication d'une DRAM

de ST Microelectronics que j'ai eu la chance d'étudier comprenait déjà près de 300 étapes. La fabrication des processeurs d'ordinateur en a beaucoup plus. Donc, il est impensable d'envisager la construction d'un système de production comme un Flowshop ou un Jobshop dans lequel les étapes différentes sont traitées par un groupe de machines différent. Parce que dans ce cas le nombre de groupes de machines est égal au nombre d'étapes de fabrication, la dépense pour les équipements d'un tel système devient donc énorme, sans parler de la dépense pour construire l'espace de la fab qui devrait être immense pour disposer toutes ces machines et respecter toutes les conditions d'une salle blanche. C'est la raison pour laquelle on n'organise pas un système de production des semi-conducteurs comme les autres systèmes de production.

A cause de la répétition des opérations dans la fabrication, on peut utiliser une machine pour plusieurs étapes pourvu qu'elles aient besoin de la même opération. C'est-à-dire qu'on place des machines réalisant la même opération dans un groupe, comme le groupe de l'oxydation, le groupe de la gravure, le groupe de dopage. . . et à toutes les étapes pour lesquelles le wafer a besoin de cette opération il doit visiter le groupe correspondant. Par exemple, si le wafer (à une étape quelconque) a besoin d'oxydation, il doit visiter le groupe de l'oxydation. De cette façon on économise une dépense importante de surface et d'équipement pour la fabrication des semi-conducteurs. Cependant, lorsque le problème financier est résolu, le système présente des nouvelles difficultés de gestion des flux. Le caractère le plus important est le bouclage dans le routage des produits.

Le bouclage du système est la conséquence de l'utilisation d'une machine pour plusieurs étapes différentes (qui ont besoin d'un traitement similaire). Au lieu de passer de machine à machine de l'entrée à la sortie du système sans revoir aucune machine le wafer doit visiter une machine plusieurs fois. Dans la réalisation de l'isolation pour notre exemple, au lieu de visiter 7 machines pour 7 étapes, notre wafer doit passer deux fois à la machine d'oxydation, 2 fois à la machine de photolithographie, 2 fois à la machine de gravure et une fois au dopage. Le nombre de machines du système, de 7 machines est réduit à 3 avec les bouclages dans le système. Un système dans lequel il y a des bouclages de ce type est dit *système ré-entrant*.

Les nouveaux problèmes de ce type de système sont engendrés par ces bouclages et on va les aborder de façon détaillée dans le deuxième chapitre.

1.4 Wafer dans la Fab

Avec l'exemple précédent, on a déjà une certaine vue sur le système de production, sur l'organisation et les équipements d'un Fab. Cependant, il y a des choses qu'on n'a pas encore abordées complètement, elles concernent la vie du wafer dans le Fab.

1.4.1 Qu'est ce qu'un FOUP ?

A chaque étape du processus, le wafer doit passer sur une machine spécifique pour la réaliser. Le transport du wafer dans le fab demande toujours la propreté absolue et l'isolement par rapport aux vibrations extérieures. La solution trouvée est l'utilisation de boîtes en plastique sous vide pour stocker et transporter les wafers. Cette boîte est appelée FOUP (Front Open Unit Pod). C'est une boîte spécialement conçue pour maintenir des wafers de silicium sans aucun risque dans un environnement contrôlé. Il permet au wafer d'être enlevé pour le traitement, la mesure ou le transport par un système de transport robotisé.

Les FOUPs apparaissent en même temps que les premiers outils de traitement du wafer 300 mm au milieu des années 90. Pour la taille et la forme spéciale du wafer, les FOUPs ont été conçus avec les contraintes du 300 mm à l'esprit, avec des ailerons dans les FOUP qui tiennent les wafers en place, et la porte d'ouverture avant pour permettre l'accès à des mécanismes de manipulation d'accéder directement aux wafers du FOUP. Dans l'industrie, on utilise souvent les FOUP d'une capacité de 25 wafers mais parfois on peut aussi trouver des FOUPs de capacité une unité. La figure 1.6 illustre les FOUPs de capacité 25 unités.

Chaque FOUP a divers plats, goupilles et trous d'accouplement pour permettre au FOUP d'être bien situé sur un port de chargement de la machine et d'être manoeuvré par le système de transport automatique. Un FOUP peut également contenir des étiquettes de fréquence radio qui lui permettent d'être identifié par des lecteurs.

Lorsque le FOUP est bien placé au port de charge de la machine, la porte d'ouverture du FOUP sera déverrouillée et enlevée automatiquement par la machine. Un ou plusieurs wafers sont ensuite pris pour être traités à l'intérieur de la machine. Quand l'opération est faite, les wafers sont remis dans le FOUP avant de fermer la porte du FOUP. Le fait que le



Figure. 1.6 – FOUP à capacité de 25 wafers dans l'industrie des semi-conducteurs

wafer est remis dans le même FOUP qu'à l'entrée ou dans un nouveau, dépend de chaque machine.

En outre, pour des raisons de propreté tous les FOUPs doivent être nettoyés avant chaque utilisation. Ce nettoyage est pris en charge par des machines spéciales dont le prix est aussi élevé que celui des machines de fabrication.

1.4.2 Transport du wafer dans la Fab

Le transport du wafer dans la Fab entre les machines est un problème intéressant. Actuellement, il y a deux façons de transporter un wafer : l'utilisation des robots spéciaux et le transport manuel.

De nos jours, dans les petites Fabs ou les Fabs dont le produit change souvent les opérateurs prennent en charge le transport du wafer. Les wafers sont placés dans les FOUP et les opérateurs les emportent d'une machine à une autre en suivant la gamme de production [Wal96]. Ce travail demande aux opérateurs de la prudence, de la précision et de la patience car les FOUPs avec les wafers à l'intérieur ne doivent pas tomber ou subir des chocs pendant le transport.

Dans les grandes Fab, certains robots spéciaux remplacent le rôle des opérateurs pour transporter les FOUPs suivant un routage défini. Le robot est une solution de sécurité mais

onéreuse. Le prix dépend de la diversité des fonctions du robot et varie d'une dizaine de milliers d'euros à des centaines de milliers d'euros.

Un paramètre intéressant est le temps de transport qui est la durée de temps pour transporter les wafers entre les machines. Non seulement dans les Fabs mais aussi dans les autres systèmes de production des semi-conducteurs, le temps de transport constitue une partie importante du temps total de fabrication du produit.

RESUME DU CHAPITRE 1

On peut résumer les points importants de ce chapitre de la manière suivante :

- Le système de production des semi-conducteurs est le processus qui convertit la matière première (des disques en silicium appelés wafers) en produit final (des circuits intégrés ou divers systèmes électroniques tels que l'ordinateur, le MP3, le téléphone portable...).

- Le processus de fabrication des semi-conducteur se compose de trois grandes parties : la production du wafer, la fabrication des circuits intégrés sur le wafer et l'assemblage ou packaging. Dans le cadre de la thèse on ne s'intéresse qu'à la deuxième partie.

- Le coeur d'un centre de production de circuits intégrés est une *FAB* où on effectue les opérations spéciales sur le wafer afin d'y implanter les circuits intégrés. Ces opérations spéciales sont principalement : l'oxydation, la lithogravure, le dopage sur silicium et le dépôt.

- On utilise les FOUPs pour transporter et stocker les wafers dans la FAB

Dans ce chapitre on a donné une vue globale sur l'industrie de production des semi-conducteurs, qui est un marché de grande consommation avec sa tendance et le système de production réel avec ses opérations essentielles. Dans le deuxième chapitre, on va aborder à un autre aspect de ce sujet, la modélisation et l'évaluation de performances du système.

Chapitre 2

**MODÉLISATION ET EVALUATION DE PERFORMANCES DES
SYSTÈMES RÉ-ENTRANTS**

Le système de production des semi-conducteurs est du type ré-entrant. L'analyse du système est nécessaire à la production industrielle. Les étapes essentielles de l'analyse sont la modélisation et l'évaluation de la performance. On va consacrer ce deuxième chapitre pour en parler.

Pour commencer, quelques notions générales concernant les système de production seront rappelées. Puis on va parler du contexte de l'étude avant d'entrer dans la partie détaillée du système ré-entrant.

2.1 Quelques définitions

On n'a pas l'ambition de présenter toutes les notions relatives aux systèmes ré-entrants dans cette partie mais quelques notions essentielles qui seront utilisées dans tout ce manuscrit.

Les variables d'un système de production sont généralement divisées en deux grandes catégories : les données et les résultats. Les données sont des paramètres du système qu'on peut parfois modifier, changer lorsque c'est nécessaire (tels que le temps de service, le taux d'arrivée...). Les résultats sont des valeurs que le système nous rend en fonction des paramètres donnés, ce sont le temps de séjour, le débit, l'encours du système...

Les données du système

Le temps de service ou temps de traitement est la durée de réalisation d'une opération par une machine donnée.

Dans un système de production de semi-conducteurs, les produits peuvent visiter plusieurs fois une machine et le temps de service n'est pas toujours le même car le produit n'a

pas besoin de la même opération et donc les paramètres de la fabrication peuvent changer. Le temps de service dépend de la machine qui fournit l'opération. Les machines rapides et les machines qui peuvent traiter plusieurs wafers en parallèle sont évidemment chères.

Le taux d'arrivée est le nombre de produits envoyés dans le système par unité de temps. Pour un système de fabrication de circuits intégrés, le taux d'arrivée est le nombre de wafers vierges arrivant à l'entrée du système chaque unité de temps.

Le temps de transport entre les stations et le temps de préparation

Le temps de transport est le temps qu'il faut au wafer pour être transporté d'une machine à une autre pour des opérations consécutives à des stations différentes.

Avant qu'une machine commence à réaliser une opération elle a parfois besoin d'un temps de préparation. Ce paramètre apparaît souvent dans les systèmes multiproduit où la machine doit changer son réglage pour chaque type de produit.

Ces deux paramètres prennent réellement une partie dans le temps total de réalisation du produit. Cependant, pour tous les systèmes étudiés dans ce manuscrit, on les négligera souvent afin de simplifier l'étude.

Les résultats du système

Le temps de séjour du produit est défini par le temps pour aller de l'entrée jusqu'à la sortie du système. C'est en fait le total de tous les temps de service, des temps de transport et des temps d'attente. Autrement dit, le temps de séjour est le temps de transformation de la matière première en produit final du système. Il est un des facteurs importants pour comparer la performance entre des systèmes de production. L'optimisation de la performance du système revient souvent de nos jours à l'optimisation du temps de séjour [SDZ07]. Tout en suivant la même gamme, les produits peuvent avoir des différences de temps de séjour car le temps d'attente de chaque produit dans le système est différent. En fait c'est la moyenne du temps de séjour qui est la valeur la plus significative lorsqu'on aborde la notion de temps de séjour.

L'écart-type du temps de séjour est le décalage entre le temps de séjour du produit et la valeur moyenne. Comme pour le temps de séjour, on ne s'intéresse qu'à la valeur moyenne de la variabilité du temps de séjour. Cette valeur évalue la régularité de la sortie du système. Un système qui sort les produits régulièrement a un écart-type du temps de

séjour petit.

L'encours du système est le nombre de pièces total dans le système. L'étude de l'encours est aussi un des moyens pour conclure sur la stabilité du système, ce dont on va discuter dans le chapitre 4.

Le débit est la vitesse de sortie des produits du système, il est compté par le nombre de produits sortis par unité de temps. Le débit a un lien avec le taux d'arrivée, le débit est égal au taux d'arrivée si le système ne fonctionne pas dans l'état saturé.

Le retard et l'écart-type du retard, ces notions concernent les pièces qui ont une date de sortie souhaitée. Dans ce cas, toutes les pièces lancées ont une date de sortie souhaitée (la date de fin au plus tard) et le retard est défini par le décalage entre la date de sortie réelle et celle souhaitée. Le fait que les produits possèdent un date de fin est courant, surtout dans les FABs où les produits sont fabriqués selon le demande du client. Ces paramètres sont parfois intéressants dans la pratique, mais dans le cadre de cette thèse on ne les considère pas car nous nous placerons plus dans le cadre de la production de masse que dans celui de la production à la demande.

2.2 Contexte de l'étude

Le but de la thèse est d'optimiser les performance du système, qui sont le débit et le temps de séjour, en utilisant des méthodes de gestion des produits (qui sont les pièces dans le système), dites politiques de pilotage. On étudie le fonctionnement du système sous une certaine politique et on améliore la politique en se basant sur les résultats obtenus. Dans le contexte d'une production de masse ce qui nous intéresse, ce sont les résultats sur le long terme.

En plus, pour simplifier le problème, on suppose que les machines du système ne tombent jamais en panne et que le temps de transport des wafers dans le système et le temps de préparation de la machine sont négligeables.

Hypothèse d'étude à long terme

Lorsque le système travaille à long terme (c'est-à-dire que le temps de fonctionnement tend vers l'infini) le système tombe soit dans l'état de saturation globale, soit dans un état

stationnaire. Concernant l'état saturé, on va en reparler dans la partie sur les performances du système. On ne discute ici que l'état stationnaire où les valeurs moyennes des paramètres de performance ne varient pas beaucoup.

2.3 Modélisation d'un système de production de semi-conducteurs

Tous les systèmes de production doivent passer une étape de conception qui comporte plusieurs phases avant la mise en marche. Dans ce processus on passe par l'étape de modélisation qui nous permet d'analyser et de tester le fonctionnement du système sous les conditions réelles (ou presque réelles). Un modèle nous offre en outre la possibilité d'analyser le fonctionnement du système lorsqu'on a des changements de paramètres comme la gamme de production, le temps de service ou le taux d'arrivée, sans toucher au système réel.

On appelle les produits qui sont encore dans le système les **pièces** et elles constituent l'**en-cours**. C'est-à-dire que les pièces seront les produits qui auront été traités par des stations du système en suivant leur routage.

Un système ré-entrant se compose de une ou plusieurs stations de service qui réalisent des opérations. Chaque station se compose d'un certain nombre de machines identiques qui fonctionnent en parallèle. Les pièces dans ce système peuvent visiter plusieurs fois une même station à différentes étapes de la fabrication.

Un exemple de système ré-entrant est présenté en figure 2.1.

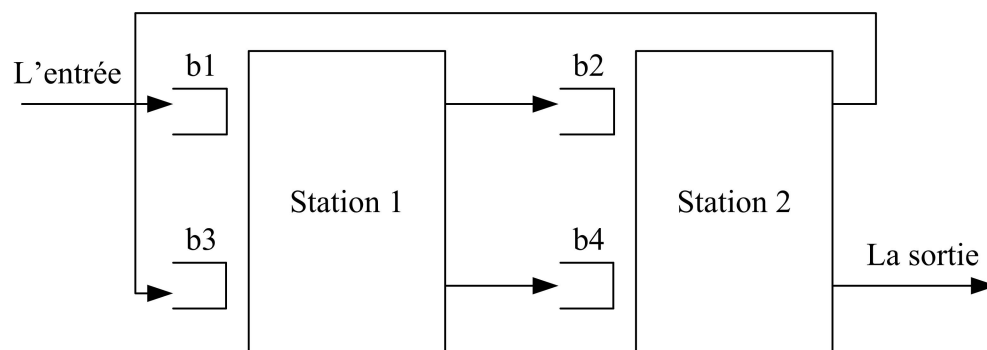


Figure. 2.1 – Un système ré-entrant

Dans la figure 2.1, les stations représentent une machine ou un groupe de machines identiques. Les buffers $b1$, $b2$, $b3$, $b4$ servent à distinguer les produits, à différentes étapes de production, présents devant la machine. Les arcs indiquent le routage de la pièce dans le système qui est le résultat de la gamme de production du produit.

Les buffers sont en fait des files d'attente virtuelles de **capacité infinie** qui servent à stocker temporairement les pièces présentes devant la station. Pour identifier les buffers, on les indexe par le numéro d'opération que les pièces dans le buffer attendent de cette machine. Par exemple le buffer $b1$ stocke les pièces qui attendent la première opération, $b2$ les pièces qui attendent la deuxième opération, etc.

On illustre un système ré-entrant simple en figure 2.1. La pièce entre dans le système par la *Station1*, puis elle continue à la *Station2* et retourne à la *Station1* pour la deuxième fois, puis elle finit sa gamme en visitant la *Station2* pour la deuxième fois.

Le système ci-dessus est un exemple simple de la modélisation d'un système ré-entrant. Le modèle d'un système de production comporte des dizaines de stations et un routage très complexe. De plus, les cycles ne sont pas toujours formés par les mêmes chaînes de machines. Une partie du système de production HDRAM de STMicroelectronics se compose de 32 stations et d'une gamme d'environ 300 opérations, le routage devient enchevêtré par la présence de cycles.

Un autre élément aussi important dans l'étude d'un système ré-entrant est le nombre de types de produits qui sont fabriqués en parallèle. Cet élément peut faire changer la performance des politiques de pilotage et changer aussi la construction du modèle de système. En fonction du nombre de types de produits on parlera de système monoproduit ou de système multiproduit.

2.3.1 Monoproduit

Comme son nom l'indique, ce type de système ne fabrique qu'un seul type de produit et possède un seul routage. L'illustration de la figure 2.1 est un exemple de système monoproduit. Ceci est un système de base qui est assez courant dans l'industrie et souvent utilisé en recherche pour simplifier le problème. Pourtant, le système qui fabrique plusieurs produits

en parallèle est la tendance actuelle de l'industrie de production de semi-conducteurs.

2.3.2 Multiproduit

Un système multiproduit permet de fabriquer plusieurs types de produits en même temps. C'est-à-dire qu'il y a des pièces de plusieurs types en même temps dans le système. Le routage devient beaucoup plus complexe et le système de buffers est également modifié.

Devant la station il y a non seulement les buffers d'un même type de produit aux étapes différentes mais aussi les buffers de types de produits différents. Donc la façon de désigner le buffer a une petite modification. On garde le numéro d'opération de la pièce pour distinguer les pièces du même type aux étapes différentes et on ajoute un symbole afin de distinguer entre les types de produits.

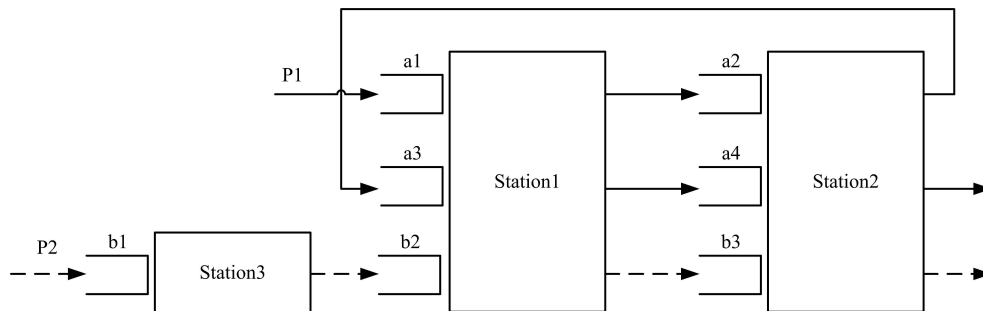


Figure. 2.2 – Un système ré-entrant Multiproduit

La figure 2.2 montre un exemple d'un modèle multiproduit. Ce système consiste en 3 stations, deux systèmes de buffers (a_i et b_i) pour les deux types de produits dont seulement le produit P_1 possède un cycle dans son routage. En principe, la différence fondamentale entre le modèle d'un système multiproduit et le monoproduit est le système de buffers. Cette différence influence profondément le problème de la gestion des produits dans un système ré-entrant.

2.4 Performances du système

A part les problèmes de coût des machines, de gestion des produits dans le FAB, de transport des wafers ... la question posée est : qu'est ce qui nous intéresse le plus dans une FAB ? Ce n'est pas évident de répondre. Si un commerçant s'intéresse au marché de consommation ou à la qualité du produit, un manager s'intéresse à l'infrastructure de la FAB, au salaire des employés, alors qu'un producteur qui étudie le système de production ne s'intéresse qu'à la performance technique du système.

Il y a plusieurs critères pour évaluer la performance d'un système telles que le volume de produit, la qualité du produit,...etc [LPT+05], [KK96], [KK01]. Dans ce manuscrit, les seules performances du système qui seront considérées sont le temps moyen de séjour, le débit du système et l'écart-type du temps de séjour.

2.5 Particularités d'un système ré-entrant

2.5.1 La charge du système et la condition de charge

La charge des machines apparaît dans la plupart des études sur les systèmes de production, elle n'est donc pas une notion nouvelle. Pourtant, la définition de la charge dans un système ré-entrant a des différences par rapport à celle d'un système classique.

La vitesse de traitement de la machine (ou de la station) ou taux de service, est égal à l'inverse du temps de service. Par exemple, la machine a le temps de service de 5h/pièce, alors le taux de service est 0.2 pièce/heure. Cette valeur reflète la vitesse théorique maximale que la machine peut atteindre [Chr06]. Pour une station qui comprend plusieurs machines identiques fonctionnant en parallèle la vitesse de traitement de la station est multipliée par le nombre de machines de la station.

Quand une machine est mise en marche dans un système, on s'intéresse à une autre valeur qui est la charge de la machine [Bis97]. Cette valeur nous donne une vue sur l'utilisation de la machine sous les conditions de fonctionnement du système telles que le nombre de passages à la station et le taux d'arrivée du produit. La machine travaille normalement si la demande du système ne dépasse pas la vitesse de traitement de la machine. La charge

d'une station qui travaille avec N produits, chaque produit p la visitant L_p fois, est donnée par :

$$\rho_S = \frac{1}{M_S} \sum_{p=1}^N \sum_{i=1}^{L_p} \tau_{pi} \lambda_p \quad (2.1)$$

où

- τ_{pi} est le temps de service pour le produit du type p à la visite i
- λ_p est le taux d'arrivée dans le système du type p
- M_S est le nombre de machines de la station S

Pour éclaircir la façon de calculer la charge, on va prendre un exemple. Notre système est celui montré figure 2.2. On va calculer la charge de la *Station1* en supposant que les taux d'arrivée de P1 et P2 sont de 1 pièce/heure et 2 pièces/heure et que cette station se compose de deux machines identiques en parallèle, ce qui donne le temps de service comme illustré figure 2.3.

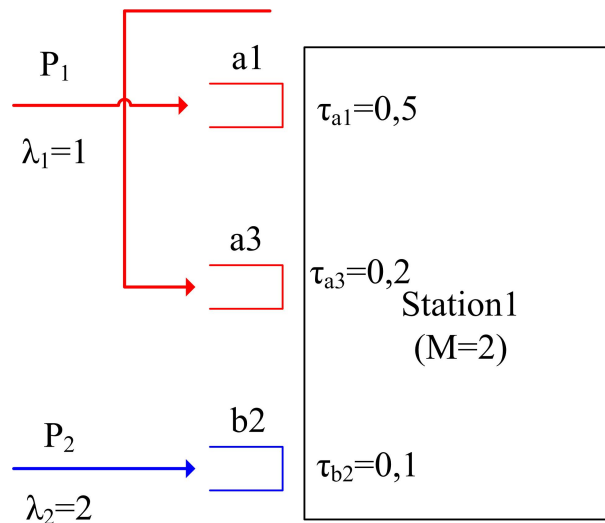


Figure. 2.3 – Exemple de calcul de la charge

La charge de la *Station1* est :

$$\begin{aligned}
\rho_{s1} &= \frac{(\tau_{a1} + \tau_{a3})\lambda_1 + \tau_{b2}\lambda_2}{M_S} \\
&= \frac{(0,5 + 0,2) * 1 + 0,1 * 2}{2} \\
&= 0,45
\end{aligned}$$

Alors, la charge de la *Station1* est 0,45.

La charge reflète le taux d'utilisation de la machine dans le système, ce facteur n'a pas de dimension et varie de zéro à un. Lorsque la charge de la machine est supérieure ou égale à 1, la machine travaillera dans l'état particulier, dit l'état saturé, dans ce cas le débit n'est pas égal au taux d'arrivée et les pièces sont donc accumulées dans le système. Cette situation est évidemment inacceptable sur le long terme.

De la formule (2.1) on trouve que la charge dépend du temps de service, du nombre de machines et du taux d'arrivée. Parmi ces trois paramètres, le temps de service et le nombre de machines de la station sont les paramètres fixes, c'est-à-dire qu'ils sont liés à la conception de la station et ne sont pas changés facilement, en revanche le taux d'arrivée est une valeur très variable. Elle peut être changée plus fréquemment pour suivre la demande du client. Donc, la surcharge de la machine est souvent engendrée par un taux d'arrivée trop élevé. Afin d'assurer le bon fonctionnement du système, on a la condition de la charge dont le but principal est de limiter le taux d'arrivée à une valeur acceptable [LRK93],[Kum94b]. Cette condition est définie par :

$$\rho_{S_i} < 1 \quad \forall S_i \in S \quad (2.2)$$

où

- S est l'ensemble des stations du système
- ρ_{S_i} est la charge de la station S_i

La station dont la charge est la plus importante du système est la station *goulot* du système. La charge du système et la production du système doivent être calculées en se basant sur les paramètres de cette station [SZY⁺07]. La machine goulot fait apparaître le phénomène de bouchon dans le système [PK95].

2.5.2 *Problématique*

La caractéristique d'un système ré-entrant est l'existence de cycles dans la gamme de production, ces cycles sont le résultat de l'économie sur les équipements. Dans cette partie on va analyser ce qui découle de cette caractéristique.

Au long de son routage, la pièce peut visiter plusieurs fois une station, à chaque étape elle est stockée dans un buffer correspondant. Alors, à certain moments il y a des pièces à des étapes différentes qui se trouvent devant la station pour demander un traitement. Et à ce moment là, si le nombre de ces pièces dépasse la capacité de la station (le nombre de machines de la station), la station doit choisir les pièces à traiter en premier. Ce problème est un problème essentiel pour les systèmes ré-entrants.

Pour être plus clair, on retourne à l'exemple de la figure 2.1. La *Station1* prend en charge deux opérations (qui sont la première et la troisième), les pièces qui arrivent à cette station sont stockées soit dans le buffer *b1* soit dans *b3*, cela dépend de l'opération dont elles ont besoin. A un certain moment, il y a des pièces dans les deux buffers *b1* et *b3*. Alors dans ce cas, on doit avoir une politique pour choisir la prochaine pièce à traiter.

En réalité, ce type de problème existe déjà dans un système normal (qui n'est pas cyclique), mais à un niveau beaucoup plus simple. Dans ce cas, la machine doit choisir sa prochaine pièce lorsqu'il y a plusieurs pièces dans la file d'attente. Ce problème est élevé à un autre niveau quand le choix couvre non pas un seul buffer mais un ensemble de buffers devant la station. La complexité de ce problème augmentera encore pour un système multiproduit.

2.5.3 *Importance du choix de la prochaine pièce à traiter*

Maintenant on va évaluer l'importance du choix de la prochaine pièce à traiter. Ce choix influence directement le fonctionnement du système, un bon choix peut augmenter le rendement du système et au contraire un mauvais choix engendre éventuellement des problèmes sur le système. On va étudier un exemple simple pour éclaircir l'importance de cette décision.

Revenons à la *Station2* du système de la figure 2.1. Supposons que la machine n'est pas disponible et qu'il y a des pièces dans les deux buffers *b2*, *b4*. Comme les pièces dans *b4*

sont plus près de la sortie du système que celles dans $b2$, alors en choisissant les pièces dans le buffer $b2$, les pièces dans $b4$ vont sortir du système plus tard. Par contre, si on choisit les pièces dans $b4$, ces pièces peuvent avoir un temps de séjour plus petit. Autrement dit, avec le choix du buffer $b4$ on diminue éventuellement le temps de séjour des pièces dans le système.

Considérons un autre exemple simple [Kum95], celui de la figure 2.4 pour montrer qu'avec un choix particulier on conduit le système à un état de saturation.

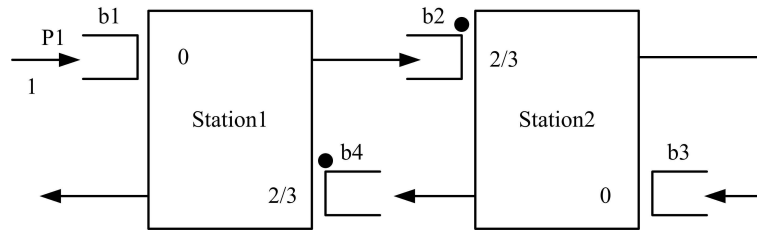


Figure. 2.4 – Un mauvais choix peut saturer le système

La figure 2.4 montre un système de deux Stations et 4 buffers. Le temps de réalisation de chaque opération est noté à côté de chaque buffer. Par exemple, le temps de réalisation de l'opération de la pièce qui se trouve dans le buffer $b2$ est $2/3$ heure/pièce et la pièce dans le buffer $b3$ sera traitée avec le temps 0 heure/pièce (pour le temps de traitement zéro on imagine qu'il est très petit par rapport aux autres et qu'il est donc négligeable). Les pièces brutes arrivent dans le système toutes les heures, c'est à dire qu'il y a une pièce de $P1$ qui arrive au buffer $b1$ toutes les heures. Notons que pour ce système la condition de la charge est vérifiée, en effet $\rho_1 = \rho_2 = 2/3$

Supposons à l'instant initial qu'il y a une pièce dans le buffer $b1$. Alors avec la loi de traitement qui donne priorité aux pièces dans les buffers $b2$ et $b4$ (on ne traite les pièces dans $b1$ ou $b3$ que quand les buffers $b2$ ou $b4$ sont vides) le système sera saturé après un certain temps de fonctionnement. En effet, le tableau ci-dessous montre l'évolution du contenu des 4 buffers de zéro heure à $14/3$ heures, les colonnes correspondent aux instants importants où il y a du changement dans le système, dans chaque case on indique le nombre de pièces du buffer au moment correspondant, l'étoile à côté indique que la pièce de ce buffer est en

cours d'opération. Par exemple, au moment $2/3$ heure, les buffers $b1$ et $b4$ sont vides, le buffer $b2$ a une pièce en cours de traitement et $b3$ a une pièce en attente.

t(h)	init	0	0+	2/3	1	1+	4/3	2	2+	8/3	8/3+	3	10/3	4	14/3
b1	1	2*	0	0	1*	0	0	1*	0	0	0	1	1	2	2
b2	0	0	2*	1*	1*	2*	1*	0	1*	0	0	0	0	0	0
b3	0	0	0	1	1	1	2	3*	0	1*	0	0	0	0	0
b4	0	0	0	0	0	0	0	0	3*	2*	3*	3*	2*	1*	0

Tableau. 2.1 – Une mauvaise politique conduit le système à la saturation

Observons ce qui s'est passé après $14/3$ heures de fonctionnement. Le nombre de pièces dans le système a augmenté d'une unité (le nombre de pièces dans le buffer $b1$ s'accroît de 1 à 2 pièces et les autres buffers sont vides). Cela veut dire que le nombre de pièces dans le système est augmenté après chaque période (dont la première période dure de zéro à $\frac{14}{3}$ heures). Si ce phénomène continue, le nombre de pièces dans le système va exploser, cette situation est nommée l'instabilité (on discutera en détail de la stabilité du système dans le chapitre 4).

Donc, ces deux exemples nous montrent que le choix de la prochaine pièce est un élément très important qui décide du rendement et même du bon fonctionnement du système. Pour la solution de ce problème, des études sur les politiques de pilotage ont été réalisées et ont conduit à certains succès. Le détail des politiques de pilotage sera présenté dans le troisième chapitre.

RESUME DU CHAPITRE 2

Dans ce chapitre, on a introduit les caractéristiques importantes d'un système de production comme : le temps de service, le taux d'arrivée, le débit, le temps de séjour, l'écart-type du temps de séjour. Ces notions seront réutilisées fréquemment dans les chapitres qui suivent.

En plus, on a modélisé un système ré-entrant en modèle de files d'attente consistant de stations et de buffers. La station représente un groupe de machines identiques qui fonctionnent en parallèle et les buffers sont des files d'attente virtuelles de capacité infinie qui stockent temporairement les pièces.

La performance du système est évaluée par le temps de séjour, le débit et l'écart-type du temps de séjour.

La charge d'une machine est un facteur important lorsqu'on évalue les performances ou même la stabilité du système. Elle est définie par la formule (2.1) et la condition nécessaire pour que le système fonctionne est que la charge de toutes les stations soit inférieure à l'unité (formule (2.2)).

Le problème de base du système ré-entrant est la gestion des pièces dans le système. Ce problème est engendré par le fait que les pièces peuvent visiter plusieurs fois une station ou qu'il y a des bouclages dans le routage. Maintenant, on va étudier les politiques de pilotage pour le résoudre.

Chapitre 3

POLITIQUES DE PILOTAGE

Le problème de pilotage de flux dans les systèmes ré-entrants revient au problème de choix du produit à traiter parmi les produits présents devant la machine au moment où la machine devient libre. L'impact sur les performances du système est très important : un mauvais choix de la politique de pilotage de flux peut rendre le système instable. Différents choix de politiques ont été étudiés [Bis97],[KM95] afin d'améliorer certaines performances telles que : le débit, le temps de séjour moyen, l'écart-type du temps de séjour .

3.1 Introduction

Pour résoudre le problème de gestion des produits dans le système, on attribue une priorité de traitement aux pièces qui se trouvent devant la station afin de former un ordre de traitement. Une fois que chaque pièce a sa priorité, la station peut facilement choisir. Cette méthodologie de distribution est appelée la politique de pilotage.

Il y a environ trente ans depuis les premières études sur les politiques de pilotage [PI77], le nombre de politiques atteint des centaines et elle sont très diverses [Wei88], [DF03], [WWQ07] . Pourtant, dans le cadre de la thèse on ne s'intéresse qu'à une partie qui correspond aux *politiques de pilotage locales*.

Vu la complexité du système, le grand nombre de machines, de produits et d'opérations, une optimisation globale n'est pas envisageable. On utilise plutôt des politiques locales, c'est-à-dire que le choix des priorités de pièces se fait au niveau de chaque machine. Le choix de priorité des pièces sera fait exclusivement en fonction des données disponibles à la machine et des informations portées par les pièces en attente. On peut prendre en compte, par exemple, le temps passé par la pièce dans le système mais on ne peut pas considérer la longueur de la file d'attente d'une autre machine.

En se basant sur ce type de distribution de la priorité, on peut diviser les politiques de

pilotage en trois groupes principaux : les politiques de priorité des buffers, qui donnent la priorité à la pièce en fonction de son buffer, les politiques de priorité de l'entité qui utilisent les propriétés propres à la pièce pour définir sa priorité, et les politiques mixtes qui sont des combinaisons de deux groupes ci-dessus.

Dans ce chapitre, on va présenter ces trois groupes avec des politiques de pilotage représentatives de chaque groupe dont la plupart est créée pour répondre au système mono-produit. On discutera aussi l'extension des politiques dans le cas multiproduit.

3.2 Politiques avec priorité au buffer

Les politiques avec priorité au buffer utilisent l'index du buffer devant la station afin de définir la priorité de la pièce. Cet index est le numéro d'opération de la pièce.

En outre, l'indexation du buffer est établie depuis la construction du système et en même temps que la définition de la gamme de production. La gamme de fabrication ne change jamais pendant que le système fonctionne et le numéro d'index du buffer ne change pas non plus. Donc, la priorité du buffer qui est basée sur le numéro d'opération (ou sur le numéro d'index du buffer) est fixée. Alors, on peut dire que les politiques de priorité au buffer donnent une *priorité statique*

Dans cette partie, on va présenter deux exemples de ce type de politique, ce sont FBFS et LBFS afin de mieux comprendre comment on utilise le numéro d'index du buffer pour définir la priorité de la pièce.

3.2.1 FBFS (First Buffer First Serve)

La première politique présentée de ce groupe est FBFS, sa définition est très simple.

Définition

Les pièces dans le buffer qui ont le numéro d'index le plus petit sont les plus prioritaires.

Explication

Au long de la gamme de production, le numéro d'opération augmente et la priorité du buffer va donc diminuer. Autrement dit, le buffer qui se situe le plus près de l'entrée du système de fabrication a la plus grande priorité.

La priorité du buffer est définie, comment va-t-elle se traduire sur les pièces? Toutes les pièces à différentes étapes qui se trouvent devant une station doivent attendre dans des buffers différents. Ce sont ces buffers qui décident de la priorité de la pièce.

Sur l'ensemble des buffers devant une station, toutes les pièces dans un même buffer ont la même priorité, et dans un buffer, les pièces respectent la loi FIFO (celles qui arrivent en premier sont traités en premier).

Exemple

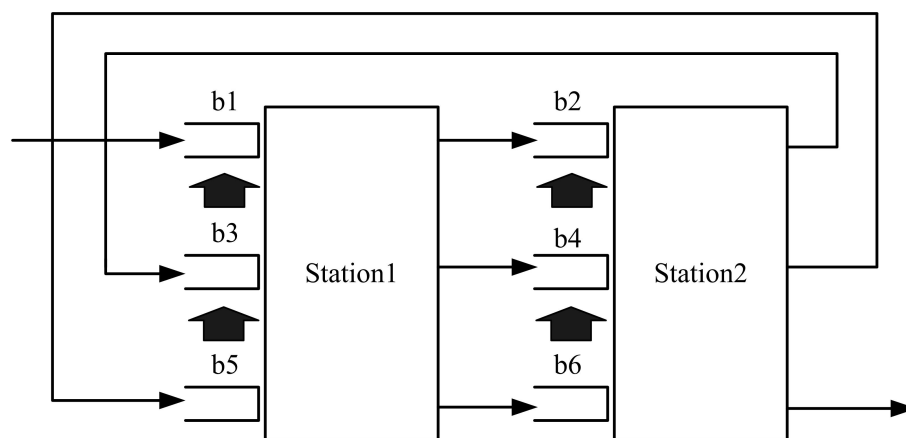


Figure. 3.1 – Illustration de la politique FBFS

La figure 3.1 montre un exemple de l'utilisation de FBFS. Le système se compose de deux stations avec une gamme de six opérations qui sont partagées par deux stations. Les buffers dans le système sont $b1$, $b2$, $b3$, $b4$, $b5$, $b6$ qui sont indexés par le numéro d'opération (de la même façon que dans le chapitre deux). On applique la politique FBFS pour ce système.

Comme déjà précisé, toutes les politiques de pilotage étudiées sont locales. Donc pour observer le fonctionnement de la politique, il suffit d'observer le fonctionnement de la station.

Par simplicité on ne considère que la *Station1*.

Devant la *Station1*, il y a trois buffers $b1$, $b3$, $b5$ qui correspondent à la première, troisième et cinquième opération dans la gamme de production. Sous le régime FBFS, le buffer $b1$ est plus prioritaire que $b3$ et $b3$ est plus prioritaire que $b5$. Donc les pièces qui se trouvent dans $b1$ sont les plus prioritaires parmi les pièces qui attendent à la *Station1*. Alors, l'ordre de traitement est $b1$, $b3$, $b5$, les grandes flèches noires indiquent la priorité des buffers (en sens croissant).

Avec l'exemple ci-dessus, on trouve que FBFS donne la priorité au buffer au début du système [Kum93]. Donc, FBFS a tendance à accueillir les pièces dans le système mais ne s'intéresse pas beaucoup à leur sortie. Donc, cette distribution de la priorité engendre éventuellement l'accumulation de pièces dans le système notamment quand la charge de la machine devient importante et la conséquence est souvent l'augmentation de l'encours.

Maintenant, on considère une autre politique de ce groupe, plus efficace, c'est LBFS.

3.2.2 LBFS (*Last Buffer First Serve*)

Définition

Les pièces dans le buffer qui a le numéro d'index le **plus grand** sont prioritaires.

Explication

LBFS utilise aussi la priorité du buffer pour définir la priorité des pièces. Le critère LBFS donne la priorité au buffer qui a le numéro d'index le plus important.

En ce qui concerne la priorité de la pièce, le principe est analogue à FBFS. C'est-à-dire que les pièces qui se trouvent dans un buffer portent la priorité du buffer, et on utilise la loi FIFO pour les pièces dans le même buffer.

Exemple

Pour l'exemple, on reprend le système de l'exemple précédant en remplaçant la politique FBFS par LBFS afin d'observer le fonctionnement du système sous le régime de LBFS et également comprendre la différence entre les deux politiques.

Considérons la *Station1* sous le régime de LBFS, d'après le critère montré ci-dessus $b5$ qui a le numéro d'opération le plus grand est plus prioritaire que le buffer $b3$ et le buffer $b3$ est pareillement plus prioritaire que le buffer $b1$. Cela veut dire que s'il y a des pièces dans les trois buffers $b1$, $b3$, $b5$, la *Station1* traitera d'abord toutes les pièces dans $b5$ (jusqu'à ce que le buffer $b5$ soit vide) puis elle continuera avec les pièces de $b3$ et lorsque $b5$ et $b3$ sont vides, elle s'occupe des pièces dans $b1$. Les grandes flèches noires dans la figure 3.2 indiquent la priorité des buffers sous le régime de LBFS.

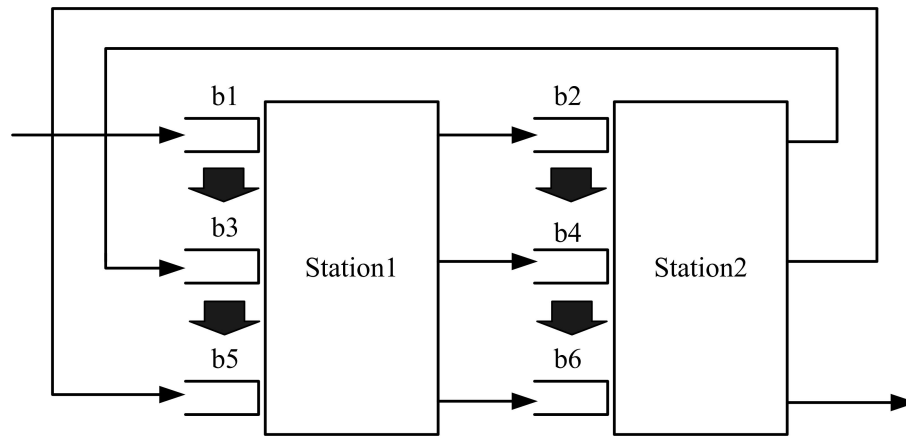


Figure. 3.2 – Illustration de la politique LBFS

Maintenant, on fait une analyse de LBFS. Supposons que les pièces entrent dans le système au *buffer b1* en respectant la condition de la charge (2.1) du système.

Alors, on trouve dans la liste globale montrée ci-dessus que les pièces ont tendance à sortir du système. En effet, LBFS vide d'abord le buffer $b6$ (pour la *Station2*) et $b5$ (pour la *Station1*) puis elle continue à vider $b3$, $b4$. Pendant le traitement des $b3$, $b4$ les machines sont toujours prêtes à s'occuper des buffers $b5$, $b6$ quand il y a des pièces dans ces deux buffers. Ainsi, les pièces qui sont près de la sortie sont poussées à sortir, les pièces au milieu du routage sont poussées vers la fin. LBFS a vraiment tendance à pousser les pièces vers la sortie du système[Kum94a], [PK95]. En fait, cette tendance est le caractère "flux tiré" de LBFS. On connaît une autre politique qui favorise également ce caractère, c'est *Shortest remaining processing time (SRPT)*[LRK94].

On a étudié des politiques de pilotage avec priorité des buffers avec les exemples FBFS et LBFS. Le principe de ce groupe est basé sur le numéro d'index des buffers (donc le numéro d'opération). Cette priorité est définie depuis la construction de la gamme de production et n'est pas influencée par les pièces dans le système, pour cette raison, ce groupe est connu comme les politiques qui donnent une *priorité statique*.

Maintenant on va continuer avec les politiques de pilotage avec priorité aux pièces, dont la priorité est définie en se basant sur les paramètres des pièces dans le système.

3.3 Politiques avec priorité à la pièce

Les politiques de ce groupe distribuent la priorité de la pièce en se basant sur ses propres paramètres tels que l'instant d'arrivée dans le système, l'instant d'arrivée à la station, le temps résiduel dans le système... Le choix du paramètres de la pièce définit la priorité de la pièce.

Pour avoir une vue sur les politiques de pilotage qui utilisent les propriétés des pièces, on va présenter deux politiques de ce type qui sont FIFO et EA (Earliest Arrival).

Concernant l'exemple illustrant le fonctionnement des politiques FIFO et EA qui seront présentées dans cette section, on précise le système utilisé et les conditions initiales de l'exemple.

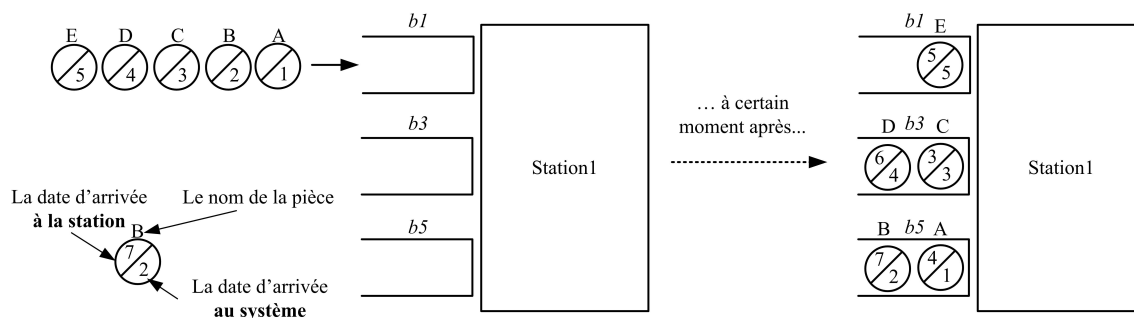


Figure. 3.3 – La Station1 avec 5 pièces données

On utilise le même système que dans la section précédente, la figure 3.3 est la reprise de la Station1 du système qui est montré dans la figure 3.1. Dans cette partie on ne s'intéresse

qu'à cette station. Sur chaque pièce qui arrive dans le système à travers le buffer $b1$, on marque une paire de valeurs qui correspondent à sa date d'arrivée à la station (en haut) et à sa date de lancement (qui est également la date d'arrivée dans le système)(en bas). Comme le buffer $b1$ est l'entrée du système, le temps d'arrivée dans le système de la pièce est aussi le temps d'arrivée au buffer $b1$. Dans la figure 3.3 à gauche, on a une chaîne de 5 pièces qui vont entrer dans le système, sur chaque pièce on marquera (en bas) sa date d'arrivée dans le système de 1 à 5 et pour les distinguer on les appelle les pièces A,C,B,C,D. Supposons que ces cinq pièces sont entrées dans le système et à un certain moment, elles se rencontrent à la *Station1* dans des buffers différents comme l'illustre la figure 3.3 à droite. A la date d'arrivée dans le système, on a maintenant ajouté sa date d'arrivée à la *Station1*, par exemple la pièce D dans le buffer $b3$ qui est arrivée dans le système au moment 4 arrive à la station $b3$ au moment 6. Voilà l'état du système qu'on va étudier dans cette partie.

3.3.1 FIFO (*First In First Out*)

FIFO est certainement la politique de pilotage de flux la plus connue. On peut la considérer comme étant la politique "naturelle" de pilotage et c'est certainement la politique la plus facile à implémenter. La priorité de la pièce est donnée en fonction de sa date d'arrivée avec la définition :

Définition

La pièce qui arrive en premier **à la station** est traitée en premier.

Explication

FIFO est sans doute la politique la plus simple et on n'a pas besoin d'expliquer le fonctionnement de cette politique car il est évident. Il faut cependant noter une particularité qui découle du caractère distribué de nos politiques de pilotage : on entend par "date d'arrivée", la date d'arrivée de la pièce à une station donnée et non la date de lancement dans le système.

Exemple

Bien que FIFO soit une politique simple, on propose ici un exemple afin d'abord de revoir le fonctionnement de FIFO et d'avoir une référence pour la comparer avec les autres politiques.

Pour trouver la réponse de la question posée au début de la section, on retourne à notre *Station1* avec le régime de la politique FIFO. En se basant sur l'ordre des dates d'arrivée à la station, on a le résultat qui est l'ordre des pièces sorties de la *Station1*. La pièce C arrive au buffer *b3* au moment 3, elle est donc la première pièce (parmi ces 5 pièces) qui arrivent à la *Station1*. D'après le critère FIFO, la pièce C doit être traitée en premier. Avec le même argument, pour les autres pièces, on a l'ordre de priorité des pièces qui est C,A,E,D,B. La figure 3.4 à droite montre cet ordre de traitement.

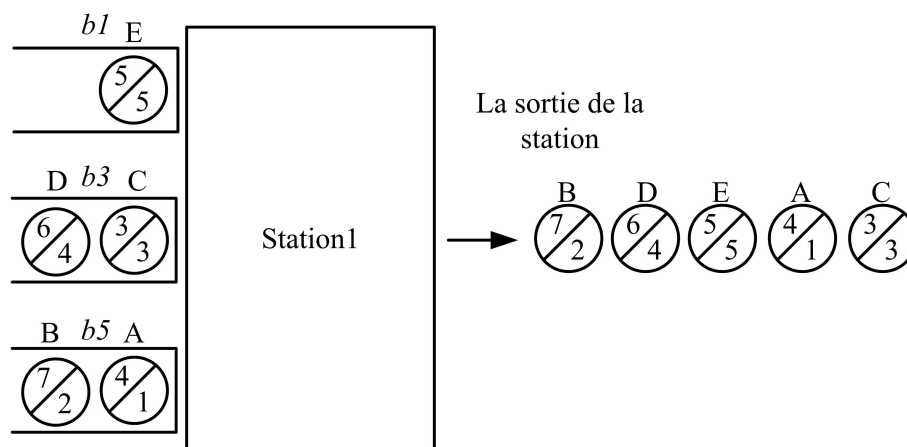


Figure. 3.4 – La sortie de la station sous le régime FIFO

3.3.2 EA (Earliest Arrival)

La priorité de la pièce est définie en fonction de la date de lancement (ou la date d'arrivée dans le système) de la pièce.

Définition

Les pièces qui arrivent **dans le système** en premier sont traitées en premier.

Explication

Lors de l'arrivée dans le système, la pièce est affectée d'une valeur qui correspond à sa date d'arrivée (ou la date de lancement). Lorsqu'il y a plusieurs pièces en attente, on compare leurs valeurs afin de choisir la pièce à traiter. Sous EA, la pièce qui a la date d'arrivée la plus petite sera traitée en premier. Il ne faut pas confondre la date d'arrivée dans système (la date de lancement) avec la date d'arrivée à la station.

Exemple

Pour l'exemple, on retourne au système précédent. Si on y applique la politique de pilotage EA, les cinq pièces devant la *Station1* seront sorties en fonction de leurs date d'arrivée dans le système, l'ordre de traitement sera A, B, C, D, E comme illustré dans la figure 3.5.

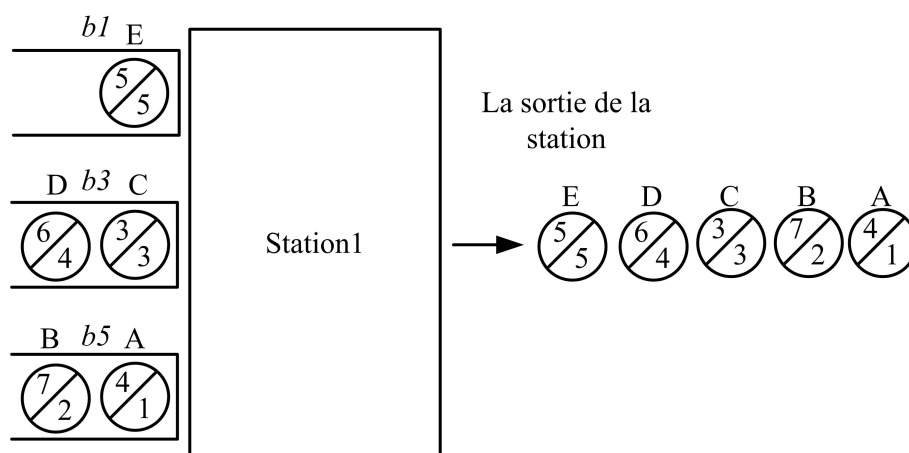


Figure. 3.5 – *La sortie de la station sous le régime EA*

On peut remarquer qu'il y a des similarités entre EA et LBFS. En effet, on peut prouver qu'elles donnent le même résultat lorsqu'on les applique à un système monoproduit. La

différence n'apparaît que quand le système devient multiproduct. Nous allons observer cette différence dans la partie d'extension des politiques pour les systèmes multiproduct.

On continue maintenant avec un autre groupe de politiques plus général.

3.4 Politiques mixtes - Classe LS (Least Slack)

On considère maintenant une classe de politiques de pilotage plus générale qui utilise en même temps les paramètres de la pièce et ceux du buffer pour définir la priorité de la pièce.

3.4.1 Définition

Cette classe est basée sur la définition d'une marge (*slack*) qui caractérise chaque pièce à chaque instant. La pièce qui a la marge la plus petite sera la plus prioritaire [Kum93].

La marge de la pièce π qui se trouve dans le buffer b_i est déterminée par :

$$s(\pi) = \beta(\pi) + \gamma_i$$

où $\beta(\pi)$ est un paramètre de la pièce et γ_i est un paramètre du buffer.

En fonction du choix des paramètres $\beta(\pi)$ et γ_i on peut obtenir plusieurs politiques. Les études menées ont montré qu'avec un choix adéquat des paramètres on peut obtenir des politiques qui améliorent des performances telles que l'écart-type du temps de séjour, le temps moyen de séjour ou l'écart-type du retard [LRK93], [LRK94]. Dans la suite de cette section, on va présenter quelques politiques qui appartiennent à la classe LS.

3.4.2 FSVL-Fluctuation Smoothing for Variance of Lateness : politique réduisant l'écart-type du retard

Supposons que la pièce π qui arrive à l'entrée du système a une *date de fin au plus tard* $\delta(\pi)$ et que la date estimée de sortie du système est $q(\pi)$.

Alors, le retard de la pièce π est :

$$r(\pi) = q(\pi) - \delta(\pi)$$

A l'instant t , $\delta(\pi) - t$ est le temps restant à la pièce π pour sortir du système sans retard.

Supposons que ζ_i est le temps restant estimé de b_i jusqu'à la sortie du système. C'est-à-dire, une pièce qui se trouve dans le b_i doit passer encore ζ_i unités de temps pour sortir du système.

Alors, on évalue l'urgence de chaque pièce par $\delta(\pi) - t - \zeta_i$. Les pièces qui ont la valeur de l'urgence la plus petite doivent être traitées avant parce qu'elles n'ont pas beaucoup de temps pour sortir du système. L'instant actuel t est commun pour toutes les pièces, alors on définit la marge de la pièce π par :

$$s(\pi) = \delta(\pi) - \zeta_i$$

On retrouve ici la formule de la politique LS

$$s(\pi) = \beta(\pi) + \gamma_i$$

avec $\beta(\pi) = \delta(\pi)$ = la date de fin au plus tard de la pièce π et $\gamma_i = -\zeta_i$ = - le temps restant de b_i jusqu'à la sortie du système. Avec ce choix de valeurs des paramètres, cette politique essaie d'équilibrer le retard de toutes les pièces et de cette façon elle réduit l'écart-type du retard.

3.4.3 FSVCT-Fluctuation Smoothing for Variance of Cycle Time : politique réduisant l'écart-type du temps de séjour

Soit $\alpha(\pi)$ = l'instant d'arrivée à l'entrée du système de la pièce π et $q(\pi)$ la date estimée de sortie du système. Le temps de séjour de la pièce π est

$$q(\pi) - \alpha(\pi)$$

On définit la marge de la pièce π qui se trouve dans le buffer b_i

$$s(\pi) = \alpha(\pi) - \zeta_i$$

donc, avec $\beta(\pi) =$ temps d'arrivée de la pièce π et $\gamma_i = \zeta_i =$ temps restant de b_i jusqu'à la sortie du système, LS équilibre le temps de séjour de toutes les pièces, elle réduit donc l'écart-type du temps de séjour.

3.4.4 FSMCT-Fluctuation Smoothing of Mean Cycle Time : politique réduisant les fluctuations du temps de séjour

On considère maintenant la capacité de régulariser le temps moyen de séjour de LS. La politique FSMCT va réduire les fluctuations du temps de séjour dues à l'irrégularité des arrivées [SK95]. Ainsi, par rapport à une arrivée régulière (déterministe) on va favoriser les pièces qui arrivent en retard et pénaliser celles qui arrivent en avance. Si π est la nième pièce qui arrive dans le système, on lui donne une date de fin au plus tard $\delta(\pi) = \frac{n}{\lambda}$

En respectant la politique FSMCT pour ce sous système, on a la marge de la pièce π qui se trouve dans le buffer b_i :

$$s(\pi) = \frac{n}{\lambda} + \zeta_i$$

avec ζ_i = temps restant du buffer b_i jusqu'à la sortie du système.

3.4.5 Autres Politiques de type LS

Dans les parties précédentes, on a présenté trois politiques de type LS : FSVL, FSVCT, FSMCT. En fait, LS est une classe de politiques très générale car, par différents choix de paramètres on peut obtenir un large spectre de politiques. D'autres politiques de pilotage de type de LS sont :

- Earliest Due Date (EDD) : $\beta(\pi) =$ Date de fin au plus tard, $\gamma_i = 0$
- Earliest Arrival (EA) : $\beta(\pi) =$ Date d'arrivée au système, $\gamma_i = 0$
- Shortest Remaining Processing Time (SRPT) : $\beta(\pi) = 0$, $\gamma_i = -$ (Temps d'opération du buffer b_i à la sortie du système)
- ...

En outre, on peut aussi retrouver les politiques FBFS et LBFS en choisissant

- FBFS : $\beta(\pi) = 0$, $\gamma_i = -$ (numéro d'opération)
- LBFS : $\beta(\pi) = 0$, $\gamma_i =$ numéro d'opération

La méthode itérative de calcul en simulation du temps restant estimé de b_i jusqu'à la sortie du système est présentée en détail par Wein dans [Wei88].

On vient d'observer les politiques de trois groupes principaux. A part ces politiques, il existe des politiques particulières qui sont aussi étudiées dans la littérature telles que

Zero-Inventory Policies [BK88], *Clear Policies(CP)*[PK89], [KS90], *Clear a Fraction(CaF)* [PHK94], [BP97], [CR89], [CT94], *Realease Policy Governor (RPG)* [Rod97], ou les politiques stochatiques [SL03].... Elles sont toutes très intéressantes mais dans la cadre de la thèse, on ne s'intéressera qu'aux politiques des trois groupes ci-dessus.

3.5 Extension au cas multiproduit

Les systèmes multiproduit sont de plus en plus fréquents dans l'industrie des semi-conducteurs et il devient nécessaire d'étudier les politiques de pilotage dans ce contexte.

Jusqu'à présent, la plupart des politiques étudiées sont limitées aux systèmes mono-produit et très peu s'intéressent au cas multiproduit. En fait, l'application de ces politiques aux systèmes multiproduit n'est pas toujours évidente [KKSKJ98]. Certaines politiques gardent leur fonctionnement et leurs points forts, par exemple FIFO et EA, mais il y a aussi des politiques dont la définition doit être modifiée afin de s'adapter au système multiproduit, LBFS en est un exemple. Pour le cas multiproduit on va présenter ici trois politiques : deux qui sont des extensions des politiques de pilotage monoproduit et une dernière qui constitue notre proposition de politique de pilotage multiproduit.

3.5.1 LBFS multiproduit

Vu les bonnes performances des systèmes monoproduit gérés en LBFS (un bon temps moyen de séjour, la stabilité...) on a la tentation d'étendre cette politique afin de prendre en compte les systèmes multiproduit.

Définition

Il existe plusieurs manières de définir l'extension multiproduit de LBFS. Par exemple dans [LK91] les auteurs définissent des priorités fixes entre les types de pièces et ensuite appliquent LBFS mono-produit pour chaque type de pièce. Cette extension présente l'inconvénient de privilégier certains types de pièces. Une des autres possibilités d'étendre LBFS est d'utiliser le numéro d'opération comme critère de priorité quel que soit le type de pièce. Si les buffers sont indexés selon le numéro de l'opération dans la gamme, la priorité de la

pièce est donnée par le numéro du buffer.

Exemple

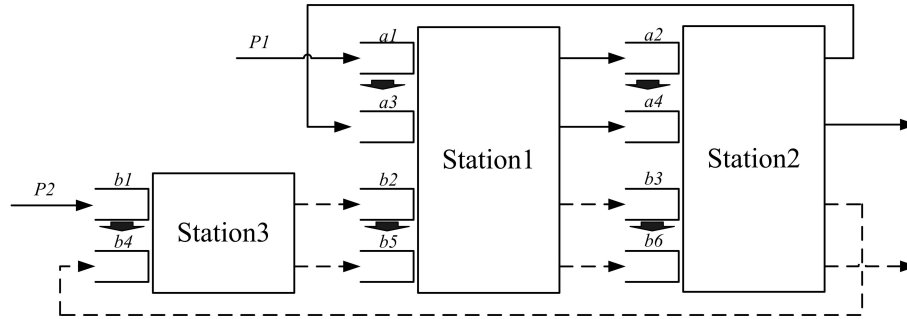


Figure. 3.6 – La priorité des buffers sous le régime LBFS Multiproduit

Ainsi, dans l'exemple présenté en Figure 3.6, si on applique cette version multi-produit de LBFS, l'ordre croissant de la priorité des buffers à la *Station1* est : $a1, b2, a3, b5$, car les pièces de type P2 dans le buffer $b5$ attendent la cinquième opération donc sont plus prioritaires que les pièces dans le buffer $a3$ qui attendent la troisième opération, etc.

D'après nos expériences numériques, cette extension de LBFS ne donne pas toujours de bonnes performances. Le tableau [3.1] est le résultat d'une de ces simulations avec la politique LBFS-multiproduit. Dans ce tableau la colonne Tc montre le temps moyen de séjour, $Encours$ montre le nombre de pièces dans le système au moment de la fin de simulation. En comparant avec la politique FIFO, on constate que pour LBFS le temps de réalisation d'une pièce est beaucoup plus long et que l'on stocke plus de pièces dans le système que pour FIFO. Cela veut dire que la performance de LBFS- multiproduit est plus mauvaise que celle du FIFO.

Ce résultat peut être expliqué par le déséquilibre dans les gammes de production. En effet, chaque produit a sa propre gamme de production dont le nombre d'opérations est différent. Notre LBFS multiproduit dont le critère est basé sur le numéro d'opération ne peut pas distribuer la priorité en équilibre pour tous les types de produits. Les buffers du type de produit qui a le nombre d'opérations le plus important est plus prioritaire que les

	Données		FIFO			LBFS-multiproduit		
	Taux d'arrivée	Nombre d'opérations	Nombre de Sorties	Encours	Tc	Nombre de Sorties	Encours	Tc
Produit1	0.5	100	17912	80	217.72	14605	3387	3514.45
Produit2	0.5	20	18028	21	56.91	15054	2995	2439.99
Produit3	0.5	30	17795	30	78.08	14258	3567	3062.67
Produit4	0.5	40	17847	37	113.6	15632	2252	3231.69
Produit5	0.5	60	17751	51	202.37	14997	2775	2711.17

Tableau. 3.1 – Etude de LBFS dans le cas multiproduit

autres car ce type possède de plus nombreux buffers et ceux plus près de la sortie du système sont toujours les plus prioritaires. Dans un système, tous les types de produit partagent les équipements, la priorité absolue pour un certain type de produit peut engendrer les bouchons indésirables pour les autres types de produit.

3.5.2 LBFS Local

En se basant sur la priorité des buffers on propose la politique LBFS Local, une autre extension de LBFS au système multiproduit. Si LBFS-Multiproduit crée probablement un déséquilibre de la priorité entre les types de produits devant une station lorsque leur nombres d'opérations sont très différents, LBFS Local permet d'équilibrer relativement la priorité entre des produits.

Définition

La priorité des pièces du type p qui se trouvent dans le buffer b_i à la station S est défini par

$$Prio(b_i/S) = \frac{\text{Numéro de visites de la pièces à la station } S}{\text{Numéro de visites total du type } p \text{ à la station } S}$$

Plus cette valeur est grande, plus la pièce est prioritaire.

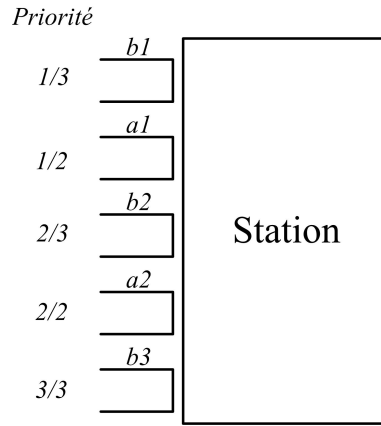


Figure. 3.7 – L'exemple de LBFS Local

Exemple

Observons la station montrée dans la figure 3.7. Devant cette station, on a 5 buffers des deux types de produits a et b . Le type a visite 2 fois et le type b visite 3 fois la station S . Avec la façon de calculer ci-dessus, on a la priorité de chaque buffer montrée dans la figure (à gauche de chaque buffer).

On trouve qu'il y a toujours des buffers (des types différents et devant une même station) qui ont la même priorité, les buffers a_2 et b_3 sont exemple. Pour ces buffers, la station doit traiter les pièces en utilisant FIFO.

La façon de compter le nombre de visite a une influence sur la politique. Le fait de commencer par 0 ou par 1 donne une priorité différente aux buffers surtout aux buffers en premier et en dernier (pour des types différents). Par exemple, si on commence par zero, l'ordre de priorité est $\{(a_1=b_1) < b_2 < a_2 < b_3\}$ mais si on commence par 1, l'ordre de priorité devient $\{b_1 < a_1 < b_2 < (a_2 = b_3)\}$. LBFS Locale est basée sur LBFS, elle hérite donc la caractéristique de flux tiré de LBFS. Ce changement de la priorité (à cause de la façon de compter le nombre de visites) influence la performance du système sous LBFS Local.

3.5.3 FIFO(LBFS)

On propose finalement une combinaison de politiques spécifique pour les systèmes multiproduit. Le but de cette politique est de conserver les bonnes propriétés de LBFS tout en assurant un équilibre entre les produits. Chaque politique intervient à un niveau différent dans le calcul de la priorité. On utilise FIFO afin d'établir l'ordre de priorité entre les types de pièces et LBFS entre les pièces de même type.

Définition

L'algorithme FIFO (LBFS) se réalise en deux étapes :

1. En utilisant les dates d'arrivée à la station des pièces de chaque type on réserve des places pour chaque type de pièce
2. On range les pièces de même type sur les places réservées en utilisant LBFS

Exemple

Considérons la *Station2* du système présenté en figure 2.2

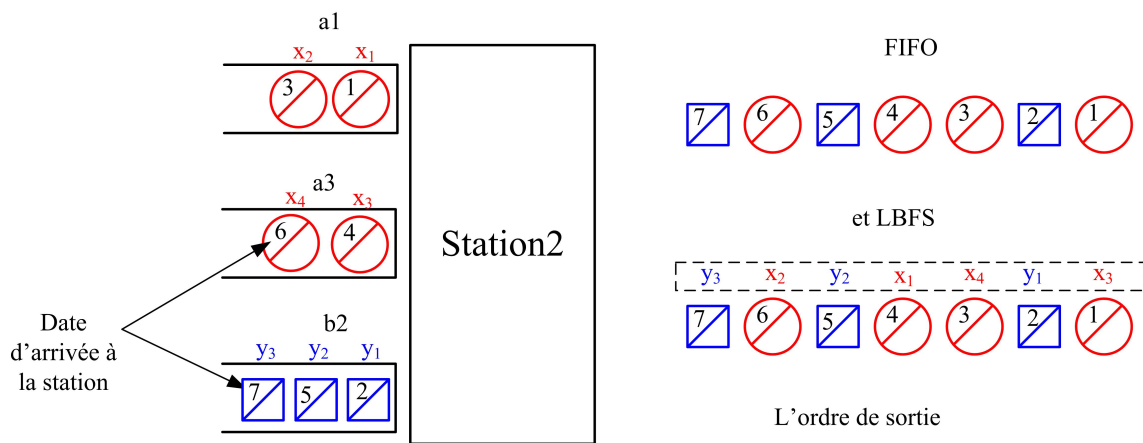


Figure. 3.8 – L'exemple de FIFO(LBFS)

Supposons que, à un moment donné, il y a 4 pièces du type a x_1, x_2, x_3, x_4 dont x_1, x_2 dans le buffer a1 et x_3, x_4 dans le buffer a3, et 3 pièces du type b y_1, y_2, y_3 dans le buffer b2

(comme dans l'illustration de la figure 3.8. Supposons que l'ordre d'arrivée des pièces à la station 2 est $x_1, y_1, x_2, x_3, y_2, x_4, y_3$ (du plus ancien au plus récent). On applique la première étape de l'algorithme FIFO (LBFS) et on obtient la réservation de places suivante (basée sur FIFO) : x, y, x, x, y, x, y . On sait maintenant que les pièces en 1ère, 3ème, 4ème et 6ème position seront de type a. En utilisant LBFS on range les pièces de type a sur ces positions et on obtient : $x_3, y, x_4, x_1, y, x_2, y$ (l'ordre des priorités entre x_3 - x_4 et x_1 - x_2 est indifférent car elles se trouvent dans les mêmes buffers virtuels a_3 , respectivement a_1). Finalement on range les pièces de type b sur leurs places réservées en utilisant LBFS et on obtient l'ordre de priorité final : $x_3, y_1, x_4, x_1, y_2, x_2, y_3$ (de la même manière l'ordre entre y_1 , y_2 et y_3 est indifférent car elles se trouvent dans le même buffer b_1). Les études en simulation montrent que cette combinaison de politiques fournit pour notre exemple la meilleure performance en termes de temps de séjour et encours, parmi les politiques étudiées [Ngu07].

RESUME DU CHAPITRE 3

Dans ce chapitre, on a présenté les politiques de pilotage. En se basant sur la priorité, les politiques peuvent être divisées en trois groupes : les politiques avec priorité au buffer, les politiques avec priorité à la pièce et les politiques mixtes avec l'exemple de la classe LS.

Le tableau [3.2] résume les points importants des politiques présentées

Politique	Description	Remarques
LBFS	Max(Numéro d'opération)	Diminue le temps de séjour
FIFO	Ce qui arrive à la station en premier est traité en premier	Simple
EA	Choisir la pièce la plus ancienne dans le système	Efficace en temps de séjour
FSVL	Minimum de marge : (date de fin au plus tard) - (temps restant estimé jusqu'à la sortie)	Diminue l'écart-type du retard
FSVCT	Minimum de marge : (date d'arrivée) - (temps restant estimé jusqu'à la sortie)	Diminue l'écart-type du temps de séjour
FSMCT	Minimum de marge : (n/λ) - (temps restant estimé jusqu'à la sortie)	Diminue les fluctuations du temps de séjour
FIFO(LBFS)	FIFO pour les types de produit et LBFS pour les pièces dans le même type	Meilleure performance que LBFS-Multiproduit

Tableau. 3.2 – Résumé des caractéristiques de quelques politiques de pilotage

Chapitre 4

STABILITÉ

La stabilité est une caractéristique des politiques de pilotage des systèmes de production. Cette notion prend une importance particulière pour les systèmes ré-entrants. Dans ce chapitre on va définir et analyser la stabilité d'une politique de pilotage. Dans la dernière partie de ce chapitre nous ferons le point sur les résultats connus de stabilité pour quelques politiques présentées dans le chapitre précédent.

Concernant le problème de la stabilité des systèmes de production, on trouve dans la littérature des études de stabilité sur les systèmes stochastiques [Kel79],[Kum94b], [KK96], [SL03], et sur les systèmes "Adversarial Queueing Model (AQM)" [BKP⁺96], [And00], [BGL04], [WK96], [Tsa00].

4.1 Définition

L'équilibre entre le débit de sortie et le taux d'arrivée de tous les types de produits du système, l'absence d'augmentation continue de l'encours et du temps de séjour, pas de machine saturée en permanence, sont des éléments qui caractérisent la stabilité du système. Tous ces éléments doivent être observés sur le système à très long terme.

Dans un système de production les temps de service, temps de préparation... sont des valeurs fixées qui ne dépendent que de la machine et ne varient pas pendant tout le fonctionnement. La charge de la station (qui dépend de la loi de lancement) et la politique de pilotage sont des éléments qui causent éventuellement l'instabilité du système.

Pour une définition formelle de la stabilité des politiques, on considérera : la loi de lancement, la stabilité du système et la condition de charge de la machine.

4.1.1 Le lancement

On constate que les pièces arrivent dans le système selon une certaine loi. Cette loi peut être modélisée par une distribution aléatoire (par exemple un loi de Poisson) ou une séquence déterministe. Quelle que soit la loi de lancement, il y a deux facteurs auxquels on doit s'intéresser : l'intervalle entre deux arrivées consécutives et le nombre de pièces dans chaque arrivée (lot).

Pour les arrivées déterministes l'intervalle est une constante. Pour les distributions aléatoires cet intervalle varie autour d'une valeur moyenne. On utilise cette valeur moyenne pour calculer la charge de la machine.

Le taux d'arrivée λ est calculé par

$$\lambda = \frac{\text{nombre de pièces arrivées}}{\text{durée de l'intervalle}}$$

On se base sur l'intervalle et la taille du lot pour calculer le taux d'arrivée du produit. Dans un système multiproduit, un type de produit a son propre taux d'arrivée.

Soit $u_i(t)$ le nombre de pièces du type i arrivées au système pendant $[0, t]$ et λ_i est le taux d'arrivée du type i . On a :

$$u_i(t) = \lambda_i t$$

La loi d'arrivée dans un système réel peut éventuellement causer de nombreuses arrivées pendant un temps très court et puis aucune arrivée pendant un long temps après. Ce phénomène est appelé "gigue". La gigue peut faire accumuler un nombre assez important de pièces devant le système. Pour limiter les gignes, on s'imposera une loi du lancement qui doit satisfaire :

$$u_i(t) - u_i(s) \leq \lambda_i(t - s) + \gamma \quad \left\{ \begin{array}{l} \forall s, 0 \leq s \leq t \\ \forall i \\ \gamma \geq 0 \end{array} \right. \quad (4.1)$$

où γ est le paramètre qui borne la gigue de la séquence d'arrivée et λ_i est homogène à un taux d'arrivée.

Maintenant, on va analyser la stabilité d'un système.

4.1.2 Stabilité d'un système

Soit $x(t)$ le nombre total de pièces dans le système à l'instant t ou l'encours du système à instant t , on a la définition suivante de la stabilité du système :

Définition : Avec un loi d'arrivée donnée qui respecte (4.1) et une politique de pilotage donnée, un système de production est stable s'il existe un constante $M(M > 0)$ telle que

$$x(t) \leq M, \forall t > 0 \quad (4.2)$$

Du point vue du système, la loi d'arrivée et la politique de pilotage sont des paramètres.

On continue avec l'analyse de l'influence de la loi de lancement sur la stabilité du système.

4.1.3 La charge de machine

La charge a été définie dans (2.5.1) et on ne répétera pas tout ici. On récapitulera des points importants de la charge de la machine afin d'éclairer l'influence du lancement sur la stabilité du système.

Soit B l'ensemble des stations du système. La charge de la station S ($S \in B$) qui travaille avec N types de produits, chaque produit du type p la visitant L_p fois, est donnée par :

$$\rho_S = \frac{1}{M_S} \sum_{p=1}^N \sum_{i=1}^{L_p} \tau_{pi} \lambda_p \quad (4.3)$$

où

- τ_{pi} est le temps de service pour le produit du type p à la visite i
- λ_p est le taux d'arrivée dans le système du type p
- M_S est le nombre de machines de la station S

Selon la formule 4.3, la charge de la station dépend des propriétés du système (les temps de service) et de la loi d'arrivée (le taux d'arrivée). Les propriétés du système sont fixées, le lancement est le seul paramètre extérieur qui influence directement la charge.

En théorie, la charge peut être imposée à n'importe quelle valeur positive. Pourtant, l'utilisation de la machine est toujours inférieure ou égale à l'unité. Lorsque la charge d'une station est supérieure à une unité, cette station est saturée et son utilisation est égale à une unité.

Une charge supérieure à l'unité conduit la machine à la situation de saturation avec pour conséquence un encours tendant vers l'infini. Avec au moins une machine qui est dans cette situation, le système n'est pas stable. Donc une condition nécessaire de la stabilité du système est que la charge de toutes les machines soit inférieure à l'unité.

Alors, la condition nécessaire pour la stabilité du système (condition de la charge) est :

$$\max_{\forall S \in B} \rho_S < 1 \quad (4.4)$$

Maintenant, on a tous les éléments nécessaires pour considérer la stabilité des politiques de pilotage.

4.1.4 Stabilité d'une Politique

Définition : Une politique de pilotage est **stable** si pour tous les systèmes utilisant cette politique et qui satisfont la condition

$$\max_{\forall S} \rho_S < 1$$

il existe une constante $M > 0$ telle que

$$x(t) \leq M, \forall t > 0$$

où $x(t)$ est l'encours total du système à l'instant t

Le problème de la stabilité d'une politique est très important tant en théorie qu'en pratique. A part des preuves de la stabilité de certaines politiques, on a aussi trouvé des contre-exemples pour démontrer l'instabilité d'autres politiques. La preuve de la stabilité est difficile dans le cas général et souvent le problème de la stabilité reste ouvert.

4.2 Analyse de la stabilité

La preuve de stabilité d'une politique demande la preuve de la stabilité pour tous les systèmes qui l'appliquent.

Une politique est stable ou instable. Donc, on a deux approches possibles : soit prouver sa stabilité soit trouver la preuve de son instabilité. Pour la preuve de la stabilité, il faut une

démonstration complète pour n'importe quel système. Pour la preuve de l'instabilité, il suffit de trouver un contre-exemple dans lequel on montre l'instabilité du système (l'accumulation continue de l'encours ou l'augmentation du temps de séjour...).

En ce qui concerne la technique, on a deux chemins pour approcher la stabilité : la simulation et le calcul théorique. Avec la simulation on peut vérifier la stabilité d'un système, mais elle ne suffit pas pour conclure sur la stabilité d'une politique. Donc la simulation est limitée à la recherche de contre-exemples. Par le chemin de calcul théorique, on peut prouver la stabilité ou un contre-exemple de la stabilité d'une politique mais cette voie est souvent difficile.

Dans cette section, on va présenter la preuve de la stabilité de la politique LBFS dans le cas monoproduit. Puis on observera deux contre-exemples : l'un de FIFO et l'autre de LBFS-multiproduit.

4.2.1 Preuve de la stabilité

La stabilité pour un système acyclique

Avant d'aborder les systèmes ré-entrants il est intéressant de considérer les systèmes acycliques (pour lesquels le graphe des routages ne comporte pas de circuit). L'étude de la stabilité de ce type de système est nettement plus simple mais est une bonne introduction aux problèmes d'analyse de stabilité.

Définition : Avec une loi d'arrivée de type (4.1) une politique stable pour une machine donnée est dite **stable en isolation**.

Maintenant, on considère le système acyclique avec plusieurs machines.

Théorème [PK89] : Une politique est stable dans un système acyclique multi machines si elle est stable en isolation pour toutes les machines du système et si le lancement vérifie la condition d'arrivée (4.1).

Preuve :

La preuve de ce théorème est effectuée par induction. On divise le système en plusieurs niveaux dont le nombre correspond à la gamme de production la plus longue. Considérons l'exemple du système de la figure 4.1

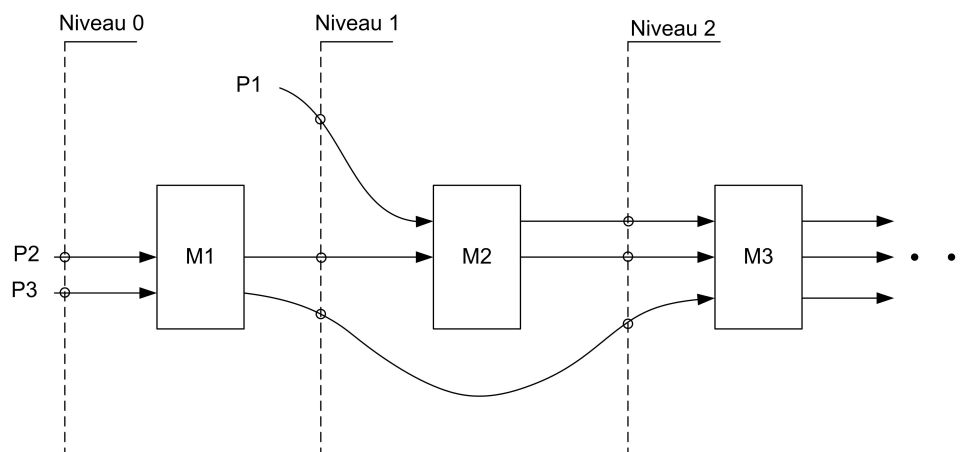


Figure. 4.1 – Exemple de système acyclique

Hypothèses :

- La politique est stable en isolation pour toutes les machines du système
- Le lancement vérifie la condition (4.1) pour chaque produit.

On considère le niveau zéro :

- Toutes les arrivées viennent de l'extérieur du système, le lancement de cette machine satisfait la condition (4.1) grâce de la deuxième hypothèse.
- La politique est stable en isolation elle est donc stable pour la machine $M1$.

Alors le niveau zéro est stable. On peut montrer que les flux de sortie respectent la condition (4.1).

Considérons le niveau 1 :

- Les arrivées viennent soit du premier niveau soit de l'extérieur mais ces deux sources vérifient la condition (4.1). Le lancement de ce niveau vérifie donc la condition du lancement.
- La politique est stable en isolation elle est donc stable pour la machine $M2$.

Alors ce niveau est stable. Le flux de sortie respecte (4.1).

On continue avec le même argument jusqu'au dernier niveau du système, on obtient la stabilité de toutes les machines du système. Le système est donc stable et le théorème est prouvé.

Un système acyclique est donc stable pour toutes les politiques **stables en isolation**,

on peut en trouver la démonstration détaillée dans [PHK94] [PK89]. Parmi les politiques concernées par ce résultat il y a la classe très importante des politiques de gestion "non-idling". L'aspect non idling est la caractéristique d'une politique qui demande à une machine de travailler lorsqu'il y a des pièces en attente de traitement. Autrement dit, avec une politique "non-idling", la machine n'est libre que si il n'y a aucune pièce devant la machine. Toutes les politiques considérées dans ce manuscrit depuis le début sont non-idling. Il est facile de montrer que les politiques non idling sont stables en isolation et, d'après le Théorème, stables pour tout système acyclique.

Maintenant, on retourne à la stabilité d'un système ré-entrant avec la politique de pilotage LBFS.

La stabilité de LBFS

La démonstration de la stabilité LBFS est assez complexe et valable pour un système mono produit. On n'a pas l'ambition de présenter toutes les étapes de la démonstration en détail (pour cela on peut voir [LRK94]). On résume simplement les points importants de cette preuve.

Le système utilisé comporte plusieurs stations, chaque station se compose d'un nombre de machines identiques qui fonctionnent en parallèle. Les arrivées respectent la condition de lancement (4.1) et la condition de la charge (4.4). Toutes les machines traitent des pièces en discipline LBFS sans préemption.

La remarque importante pour un système de production géré en LBFS est que les pièces qui arrivent ultérieurement ne retardent pas les pièces qui sont entrées antérieurement (sauf éventuellement l'attente de la fin d'une pièce pour cause de non préemption). C'est-à-dire que les pièces dans le système ne peuvent pas se doubler.

Dans une première étape, on se base sur la remarque ci-dessus pour établir une estimation du temps de présence de la pièce dans le système. L'estimation est une façon de borner le temps résiduel de la pièce dans le système. On dit que si une pièce est au début du système, alors son temps résiduel dans le système est borné par une formule en fonction de l'encours. Une pièce est au début du système si tous les buffers d'entrée jusqu'à sa position sont vides,

autrement dit elle est la dernière pièce arrivée dans le système.

Deuxième étape, on utilise la formule de l'estimée afin de démontrer la stabilité de LBFS. En fait, on construit deux bornes pour l'encours du système : l'une est la borne transitoire et l'autre est la borne asymptotique. La construction de ces deux bornes est donnée en détail dans [LRK94]. La borne transitoire est valide pour tout instant, la borne asymptotique dépend du nombre de pièces initial et ne borne que le processus asymptotique.

Avec les deux bornes proposées, l'encours du système est borné et LBFS est donc une politique stable.

4.2.2 Des politiques instables

Contre exemple de FIFO

On considère le contre-exemple de la politique FIFO dont le système est montré figure 4.2.

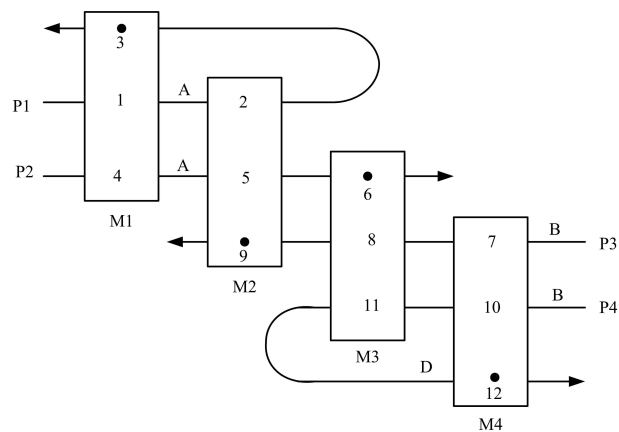


Figure. 4.2 – Système du contre-exemple pour FIFO

Les opérations du système sont numérotées comme dans la figure. Les buffers sont numérotés par le chiffre de l'opération. Les temps de traitement des opérations 3, 6, 9, 12 sont $\tau_3 = \bar{\sigma}$, $\tau_6 = \sigma$, $\tau_9 = \tau$, $\tau_{12} = \bar{\tau}$, les autres opérations ont un temps de service très petit. Les pièces arrivent au système de manière continue à la vitesse d'une pièce par unité

de temps. Les valeurs des temps de service et les taux d'arrivée respectent la condition de la charge (4.4).

Le déroulement des situations de l'encours est exactement symétrique entre les produits P1, P2 sur les machine M1, M2 et P3, P4 sur M4, M3 (on peut trouver le détail dans [Sei94]). Autrement dit, les opérations qui auront la même situation sont

$$1 \leftrightarrow 10 \quad 2 \leftrightarrow 11 \quad 3 \leftrightarrow 12 \quad 4 \leftrightarrow 7 \quad 8 \leftrightarrow 5 \quad 6 \leftrightarrow 9$$

Le fonctionnement du système

Supposons que au début il y a A pièces P1 dans le buffer 2, A pièces P2 dans le buffer 5, B pièces P3 dans le buffer 7, B pièces P4 dans le buffer 10, D pièces P4 dans le buffer 12 et que les autres buffers sont vides. Les pièces dans le buffer 2 sont arrivées avant celles du buffer 5 pour la machine M2. Pour la machine M4, les pièces sont dans l'ordre de 12,10,7.

On suppose que

$$0 < \sigma < \bar{\sigma} < 1, 0 < \tau < \bar{\tau} < 1 \quad (4.5)$$

$$(\bar{\sigma} - \sigma) < \sigma\tau, (\bar{\tau} - \tau) < \sigma\tau, \tau < \sigma \quad (4.6)$$

Et

$$0 < \bar{\tau}D < \sigma A \quad (4.7)$$

Alors

Étape 1 : $t_0 < t < t_1$, ($t_1 = t_0^+$)

Les pièces de b2 et b5 passent instantanément à b3 et b6. Tout de suite après (instant t_0^+) la machine M4 commence à traiter les pièces de b12.

Étape 2 : $t_1 < t < t_2$, ($t_2 = t_0 + \bar{\tau}D$)

Toutes les pièces de b12 sont sorties. Il y a des nouvelles pièces qui arrivent à b1, b4, b7, b10.

Étape 3 : $t_2 < t < t_3$, ($t_3 = t_2^+$)

Les pièces de b7 et b10 passent à b8 et b11.

Étape 4 : $t_3 < t < t_4$, ($t_4 = t_0 + \sigma A$)

Il y a A' pièces ($A' = \sigma A + B$) dans b8 et b11, B' pièces ($B' = \sigma A$) dans b1 et b4, D' pièces dans b3 ($D' = (1 - \sigma/\bar{\sigma})A$), et zéro pièces dans les autres buffers.

Correspondant à la condition (4.7), on verifie que

$$0 < \bar{\sigma}D' < \tau A' \quad (4.8)$$

pour tous les $\gamma \geq 0$ grâce à (4.5),(4.6). Donc, le système (à la fin de l'étape 4) est dans une situation exactement symétrique de la situation initiale. Continuons de la même façon de l'étape 5 à l'étape 8, on a enfin :

Étape 8 : $t_8 = t_4 + \tau A'$

Il y a A'' pièces ($A'' = \tau A' + B'$) dans b2 et b5, B'' pièces ($B'' = \tau A'$) dans b7 et b10, D'' pièces dans b12 ($D'' = (1 - \tau/\bar{\tau})A'$), et zéro pièce dans les autres buffers.

Alors, on retrouve la situation initiale sauf que l'encours du système est différent.

L'augmentation de l'encours du système

Maintenant, on va prouver l'augmentation de l'encours du système afin de montrer l'instabilité.

Soit $\gamma = \frac{B}{A} \Rightarrow \gamma'' = \frac{B''}{A''}$

Avec $A'' = \tau A' + B' = \tau(\sigma A + B) + \sigma A$ et $B'' = \tau A' = \tau(\sigma A + B)$

On a

$$\Rightarrow \gamma'' = \frac{B''}{A''} = \frac{\tau(\sigma A + B)}{\tau(\sigma A + B) + \sigma A} = \frac{\sigma + \gamma}{\frac{\sigma}{\tau} + \sigma + \gamma}$$

Le phénomène d'augmentation de l'encours de buffers est périodique. Donc, on analyse la série

$$\gamma_n = \Gamma(\gamma_{n-1}) \text{ avec } \Gamma(\gamma) = 1 - \frac{\frac{\sigma}{\tau}}{\frac{\sigma}{\tau} + \sigma + \gamma}$$

On a

$$\Gamma' = \frac{d\Gamma}{d\gamma} = \frac{\frac{\sigma}{\tau}}{(\frac{\sigma}{\tau} + \sigma + \gamma)^2}$$

On constate que

$$\begin{aligned} 0 &< \Gamma'(\gamma) < \frac{\frac{\sigma}{\tau}}{(\frac{\sigma}{\tau} + \sigma)^2}, \quad (0 < \gamma) \\ \Leftrightarrow \Gamma'(\gamma) &< \frac{\frac{\sigma}{\tau}}{(\frac{\sigma}{\tau} + \sigma) (\frac{\sigma}{\tau} + \sigma)} \\ \Rightarrow \Gamma'(\gamma) &< \frac{1}{(\frac{\sigma}{\tau} + \sigma)} \quad (\sigma > \tau \Rightarrow \frac{\sigma}{\tau} < 1) \end{aligned}$$

Alors, $0 < \Gamma'(\gamma) < \frac{1}{\sigma + \frac{\sigma}{\tau}} < 1$ (car $\sigma > \tau$), alors la fonction $\Gamma(\gamma)$ est contractive dans R^+ . Donc la série $\{\gamma_n\}$ converge vers un point fixe $\bar{\gamma} = \Gamma(\bar{\gamma})$ qui est la racine de l'équation

quadratique

$$\Rightarrow \bar{\gamma}^2 + \left(\sigma + \frac{\sigma}{\tau} - 1\right)\bar{\gamma} - \sigma = 0 \quad (4.9)$$

Soit $\lambda = \frac{A''}{A} = \sigma + \tau(\sigma + \gamma)$, on a $\lambda_n = \sigma + \tau(\sigma + \gamma_n) \Rightarrow \bar{\lambda} = \sigma + \tau(\sigma + \bar{\gamma})$

On a

$$\Rightarrow \begin{cases} (\bar{\lambda} - \tau)B = \sigma\tau A \\ (\bar{\lambda} - \sigma - \sigma\tau)A = \tau B \end{cases}$$

Donc on a :

$$\bar{\lambda}^2 - (\tau + \sigma + \sigma\tau)\bar{\lambda} - \sigma\tau^2 = 0 \quad (4.10)$$

Réolvons l'équation (4.10) on trouve que $\bar{\lambda} > 1$ si et seulement si $\sigma + \tau > 1$.

Avec $\sigma + \tau > 1 \Rightarrow \bar{\lambda} > 1$. Cela veut dire que $A'' > A$ et $B'' > B$, pour D par calcul on trouve que D ne varie pas d'une étape à l'autre.

Donc, le résultat du calcul nous montre qu'il y a accumulation de pièces dans le système et ce phénomène est périodique. On peut conclure sur l'instabilité de FIFO pour ce système.

L'instabilité de FIFO a aussi été prouvée dans le cas monoproduit. En effet, en plus du contre-exemple présenté ci-dessus, Seidman a donné un contre-exemple de FIFO dans le cas monoproduit dans lequel le phénomène et la démonstration de l'instabilité sont similaires au cas multiproduit. Cet exemple est présenté en détail dans [Sei94].

Pour continuer, on analyse un autre contre-exemple qui montre l'instabilité de LBFS-multiproduit.

4.2.3 Contre-exemple de la stabilité de LBFS-multiproduit

Le système avec les buffers et les temps de service est montré Figure 4.3. Le taux d'arrivée est de une pièce toutes les unités de temps et on effectue le premier lancement au moment $0 \leq \delta_0 < 1$. Ce système est sous le régime LBFS-multiproduit.

On suppose que $\tau + \epsilon < 1$ (pour satisfaire la condition de la charge) et que $\epsilon \ll \tau$.

On suppose qu'au temps initial, il y a N pièces de P2 dans le buffer b_{22} et que les autres buffers sont vides.

Le déroulement du temps avec les points importants est illustré dans la figure 4.4.

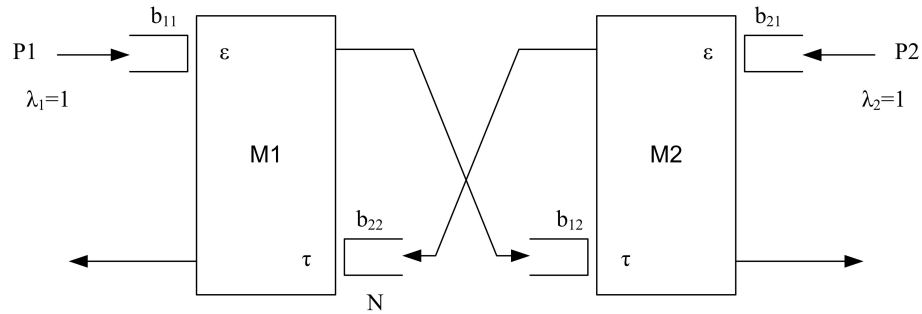


Figure. 4.3 – Un système cyclique simple

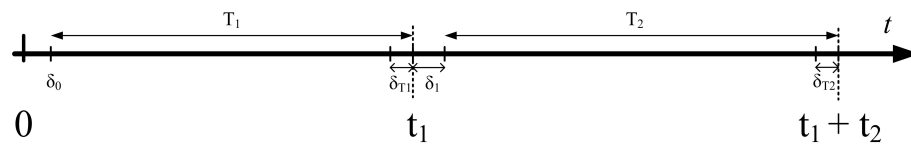


Figure. 4.4 – Le déroulement du système

Étape 1 : $0 < t \leq t_1$, avec $t_1 = T_1 + \delta_0$, T_1 est le temps depuis δ_0 jusqu'au moment où le buffer b_{22} est vide et M1 est libre.

Pendant ce temps, les pièces P1 qui arrivent au système sont bloquées au buffer b_{11} . Les pièces P2 entrées en b_{21} passent *rapidement* à b_{22} pour obtenir leur service car ϵ est très petit.

Soit $T_1 = \lfloor T_1 \rfloor + \delta_{T_1}$ où $\lfloor T_1 \rfloor$ est la partie entière de T_1 et δ_{T_1} est sa partie décimale.

Alors, on a :

$$t_1 = N\tau + \lfloor T_1 \rfloor \tau \quad (4.11)$$

Cette équation exprime le fait que l'instant où M1 devient libre est le temp nécessaire pour traiter toutes les pièces (celles qui étaient présentes au début et celles qui sont arrivées ensuite).

Remplaçons $t_1 = T_1 + \delta_0$ dans (4.11), on a :

$$\begin{aligned} T_1 + \delta_0 &= N\tau + \lfloor T_1 \rfloor \tau \\ \Leftrightarrow \lfloor T_1 \rfloor + \delta_{T_1} + \delta_0 &= N\tau + \lfloor T_1 \rfloor \tau \end{aligned}$$

Après calcul on obtient :

$$\lfloor T_1 \rfloor = \frac{N\tau - \delta_{T_1} - \delta_0}{1 - \tau} \quad (4.12)$$

On trouve que l'équation (4.12), $\lfloor T_1 \rfloor = f(\delta_{T_1})$, ($0 \leq \delta_{T_1} < 1$) nous donne plusieurs solutions pour $\lfloor T_1 \rfloor$. Dans ce cas on va prendre la solution avec la valeur minimale de $\lfloor T_1 \rfloor$ (correspondant au premier instant où M_1 est libre).

Après cette étape on trouve qu'il ne reste que $\lfloor T_1 \rfloor$ pièces de P1 dans le système (qui sont dans le buffer b_{21}) et le prochain lancement sera au moment $t_1 + \delta_1$ avec $\delta_1 = 1 - \delta_{T_1}$.

Étape 2 : $t = t_1^+$

Toutes les pièces de b_{11} passent immédiatement à b_{12} .

Étape 3 : $t_1 < t \leq t_2 + t_1$, avec $t_2 = T_2 + \delta_1$, T_2 est le temps depuis $t_1 + \delta_1$ jusqu'au moment où le buffer b_{12} est vide et M2 est libre.

Soit $T_2 = \lfloor T_2 \rfloor + \delta_{T_2}$ où $\lfloor T_2 \rfloor$ est la partie entière de T_2 et δ_{T_2} est sa partie décimale.

Avec les mêmes arguments que dans l'étape 1 on obtient :

$$\lfloor T_2 \rfloor = \frac{\lfloor T_1 \rfloor \tau - \delta_{T_2} - \delta_1}{1 - \tau} \quad (4.13)$$

On remplace $\lfloor T_1 \rfloor$ dans (4.13), on obtient :

$$\lfloor T_2 \rfloor = \frac{N\tau^2}{(1 - \tau)^2} - \frac{(\delta_{T_1} + \delta_0)\tau + (\delta_{T_2} + \delta_1)(1 - \tau)}{(1 - \tau)^2} \quad (4.14)$$

Et $\lfloor T_2 \rfloor$ est aussi le nombre de P2 qui sont arrivées au système et bloquées au buffer b_{21} .

Et le prochain lancement sera au moment $t_1 + t_2 + \delta_2$ avec $\delta_2 = 1 - \delta_{T_2}$.

Étape 4 : $t = (t_1 + t_2)^+$

Toutes les pièces de b_{21} passent immédiatement à b_{22} .

Ici, on trouve que le système retrouve sa situation initiale avec un encours initial différent et le moment de lancement différent. En effet, $N' = \lfloor T_2 \rfloor$ et $\delta'_0 = 1 - \delta_{T_2}$.

Analyse de l'instabilité du système

En comparant N' et N , on a :

$$\Delta = N' - N = \frac{N(2\tau - 1)}{(1 - \tau)^2} - \frac{(\delta_{T_1} + \delta_0)\tau + (\delta_{T_2} + \delta_1)(1 - \tau)}{(1 - \tau)^2}$$

Alors pour Δ positif, il suffit que la signe de son numérateur soit positif.

Donc

$$\begin{aligned}
 & N(2\tau - 1) - [(\delta_{T_1} + \delta_0)\tau + (\delta_{T_2} + \delta_1)(1 - \tau)] > 0 \\
 \Leftrightarrow & \quad N(2\tau - 1) - 2 > 0 \quad , (0 \leq \delta_0, \delta_{T_2}, \delta_{T_1}, \tau < 1) \\
 \Leftrightarrow & \quad \begin{cases} 0,5 < \tau < 1 \\ N > \frac{2}{2\tau-1} \end{cases}
 \end{aligned} \tag{4.15}$$

Alors avec τ et N satisfaisant (4.15) l'encours du système est augmenté périodiquement et le système devient instable.

Un autre contre-exemple de la stabilité de LBFS-multiproduit

Avec le même phénomène et le même mode de calcul, on considère un autre contre-exemple de LBFS-multiproduit mais pour un système qui est vraiment réentrant et de flux plus complexe. Le détail de cet exemple est montré dans [NCM05], on présentera ici ses principes. Le système considéré est montré en figure 4.5 et consiste en deux machines principales ($M1, M2$). Les trois autres stations sont des parties du système qui ont un temps de service très petit par rapport à ceux de $M1$ et $M2$, dans ce cas ces stations ne jouent que le rôle d'augmenter le numéro d'opération des pièces dans la gamme de production. Sous LBFS-multiproduit, l'ordre des priorités des buffers devant les machines est aussi montré dans la figure.

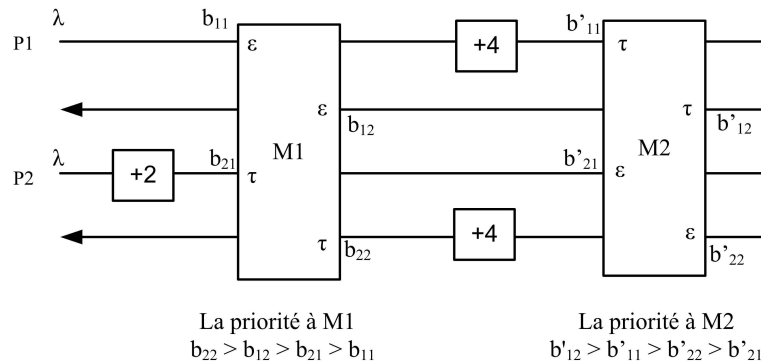


Figure. 4.5 – *Système du contre-exemple de LBFS-multiproduit*

Les temps de service et le taux d'arrivée sont choisis en respectant la condition de charge (4.4) et la condition du lancement (4.1). On suppose que ϵ est très petit par rapport à τ .

On ne présente pas tout le détail du contre-exemple car le déroulement est le même que dans l'exemple ci-dessus. Avec la même façon de calculer, on peut montrer que l'encours de ce système augmente périodiquement. Observons l'encours des buffers du système, qui sont montrés dans la Figure 4.6, afin de comprendre ce qui s'est passé.

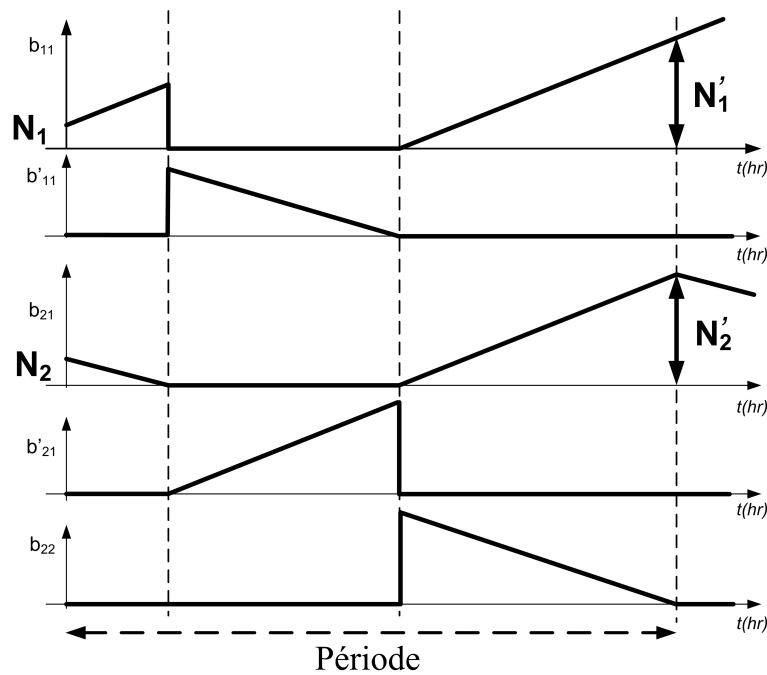


Figure. 4.6 – L'encours des buffers dans le système

Supposons qu'il y a N_1 pièces de P_1 en b_{11} et N_2 pièces de P_2 en b_{21} . Comme b_{21} est plus prioritaire que b_{11} , ces pièces et les pièces de P_2 qui arrivent dans la suite, engendrent le blocage des pièces P_1 à l'entrée du système au buffer b_{11} . C'est pourquoi, l'encours du b_{21} diminue et b_{11} augmente pendant cette période. Les pièces accumulées dans le buffer b_{11} ne sont libérées que lorsqu'il n'y a plus de P_2 à la machine M_1 . Après cette période, les pièces de P_1 commencent leur traitement à la machine M_2 en bloquant les pièces de P_2 au buffer b'_{21} . En effet, pendant cette période, l'encours de b'_{21} augmente et celui de b'_{11} diminue. Lorsque les pièces P_1 sont toutes sorties de la machine M_2 , les pièces P_2 reprennent

la priorité et passent au buffer b_{22} . Avec la priorité la plus importante, les pièces P_2 dans b_{22} bloquent toutes les entrées du système (les P_1 en b_{11} et les P_2 en b_{21}). Le moment où le buffer b_{22} se vide est aussi le moment quand les pièces P_2 du buffer b_{21} deviennent les plus prioritaires. Une nouvelle période commence avec les nombres initiaux de P_1 et P_2 dans b_{11} et b_{21} différents de ceux du début. Avec le même argument, on peut prouver que $N'_1 > N_1$ et $N'_2 > N_2$, ce qui montre l'instabilité de LBFS-multiproduit pour cet exemple.

On constate que pendant qu'un type de produit sort du système l'autre entre dans le système et ce phénomène se répète ce qui conduit à l'augmentation continue de l'encours.

On vient d'observer et d'analyser les démonstrations de stabilité et d'instabilité de certaines politiques de pilotage. Il y a encore plusieurs contre-exemples et démonstrations dans la littérature [YS92].

Dans la partie qui reste de ce chapitre on va donner les résultats de stabilité connus pour les politiques qu'on a présentées dans le deuxième chapitre.

4.3 Stabilité des politiques de pilotage classiques

FIFO

L'instabilité de FIFO est prouvée dans le contre-exemple de la partie précédente. A part ce contre-exemple, d'autres ont été trouvés dans [BGL04],[And00]. L'instabilité de FIFO est prouvée non seulement dans le cas multiproduit mais encore dans le cas monoproduit [Sei94]. Malgré ces preuves de l'instabilité qui sont trouvées pour plusieurs systèmes, FIFO est une politique très utilisée pour les systèmes de production à cause de sa simplicité.

LBFS

On a montré sa stabilité avec l'idée de la preuve présentée dans la partie précédente. En se basant sur le critère LBFS on a plusieurs possibilités d'extension de LBFS pour les systèmes multiproduits : EA, LBFS-multi... Pourtant certaines extensions ne gardent pas la stabilité comme dans le cas monoproduit, la preuve de l'instabilité de LBFS-multiproduit en est un exemple.

FBFS

Kumar, dans son article [Kum93], a prouvé que FBFS peut être stable à condition que

le système fonctionne sous la discipline de préemption. La discipline de préemption permet à la machine d'arrêter son travail en cours pour traiter une autre pièce plus prioritaire, la démonstration détaillée est présentée dans [Kum93].

LS

Comme LS est très générale, on peut y retrouver des politiques comme : LBFS, FBFS, EA, FIFO ... La démonstration générale de stabilité est impossible puisque certaines des politiques précédentes sont stables (par exemple LBFS) et d'autres instables (par exemple FIFO).

4.4 *La stabilité des autres types de systèmes*

En se basant sur le modèle de système ré-entrant, Reveliotis dans [Rev98] et [Rev00] a étudié un exemple dans lequel le système utilise des buffers à capacité finie. Le système comprend deux stations : S_1 et S_2 , devant la station S_1 on a un buffer de capacité 2 pièces et 4 pièces pour le buffer devant S_2 . Les pièces arrivent au système avec le taux d'arrivée λ et sont stockées dans un buffer à capacité infinie (qui se trouve devant le système). La gamme de production est S_1, S_2, S_1 correspondant au temps de service de τ_1, τ_2, τ_3 . Reveliotis a démontré que avec $\tau_1 = \tau_3 = 1.0$, $\tau_2 = 5$ et $\lambda = 1$, le système est instable sous la politique LBFS (monoproduit). Cet exemple montre que LBFS peut déstabiliser un système monoproduit (qui est configuré avec les buffers à capacité fini).

Des études de stabilité de FIFO ont été réalisées sur d'autres systèmes tels que système multiproduit dans [CZ97], système à deux stations dans [DHV04].

RESUME DU CHAPITRE 4

Dans ce chapitre on a abordé la stabilité d'une politique de pilotage. Une politique est stable si l'encours de tout système qui est géré avec cette politique est borné quand on satisfait les conditions de la charge et du lancement.

On a aussi analysé la stabilité de certaines politiques de pilotage : un système acyclique est stable avec toute politique "*stable en isolation*"; l'encours d'un système sous le régime de LBFS est borné transitoirement et asymptotiquement ; les contre-exemples de FIFO et de LBFS-multiproduit démontrent l'instabilité de ces deux politiques bien que FIFO reste une politique efficace.

En plus des analyses de stabilité, on a donné les résultats de stabilité connus pour quelques politiques qui ont été présentées dans le chapitre précédent telles que FBFS, LS, ...

Dans le chapitre suivant, on va discuter de la simulation et de l'évaluation des politiques par la simulation.

Chapitre 5

SIMULATION

Après la définition des politiques, l'étude de leurs propriétés et de la stabilité, la simulation est une étape nécessaire pour expérimenter leurs performances avant de les appliquer dans un système réel.

Dans ce chapitre, on va observer les politiques en simulation. D'abord on construira le modèle, on l'implantera dans le simulateur et on évaluera les performances des politiques en les comparant.

5.1 Le logiciel utilisé

Le simulateur système événement discret est en fait un logiciel qui permet de simuler le fonctionnement du système réel de la façon la plus réaliste possible.

Dans le domaine de la production, on connaît plusieurs simulateurs, par exemple Arena, Quest, Promodel,... chacun possède des avantages et des restrictions. Dans le cadre de la thèse on a utilisé Promodel pour expérimenter les politiques de pilotage.

Le simulateur Promodel est un produit de Coporation Promodel, il est très connu dans les secteurs universitaire, de la défense, services financiers, santé, fabrication, pharmaceutique. Plusieurs versions sont disponibles, la plus récente est Promodel 7.0. Les simulations dans cette partie sont réalisées avec le Promodel 2000.

5.2 Modèles

Le but est d'avoir une vue sur les performances de chaque politique. On expérimentera, d'une part, le fonctionnement d'une politique dans plusieurs systèmes, d'autre part, on analysera la performance des politiques différentes appliquées sur un même système de production.

Comme la modélisation, l'intégration de la politique et la simulation prennent beaucoup de temps, pour économiser le temps d'implantation du modèle tous les systèmes qui seront présentés auront la même structure (c'est-à-dire qu'ils ont le même nombre de stations, même nombre de machines, même nombre de types des produits...).

Le système se compose de 12 stations, chaque station possède plusieurs machines identiques qui fonctionnent en parallèle. Le système traite 5 types de produits. Le nombre de machines de chaque station est montré dans le tableau 5.1. Même s'il n'atteint pas la complexité de certains systèmes de production de semi-conducteurs, on peut considérer que le système étudié a une certaine représentativité dans ce domaine.

Station	S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07	S08	S09	S10	S11	S12
Nombre de machines	4	3	10	1	1	2	2	4	3	9	2	5

Tableau. 5.1 – Nombre de machines par station

Le temps de service, les taux d'arrivée et les gammes de production changeront pour chaque modèle. Et pour chaque cas on va présenter le modèle et ses données de façon plus complète.

En plus, comme depuis le début, pour simplifier le problème on néglige le temps de transport, le temps de préparation et les pannes des machines.

5.3 Simulations & Résultats

Dans cette partie, on va aborder le système plus en détail et analyser les résultats obtenus. Quatre modèles seront présentés avec des données différentes pour les temps de service, les gammes de production, les taux d'arrivée. Les politiques observées sont : FIFO, LBFS-Multi, EA et FIFO(LBFS). Tous les résultats de ces quatre modèles sont obtenus avec un temps de service et un taux d'arrivée déterministes. On consacra une partie du chapitre pour examiner les résultats avec des données aléatoires.

5.3.1 Modèle 1

Pour chaque exemple qui sera présenté dans les parties suivantes, on doit réaliser certains calculs afin de connaître les conditions de simulation du système et les résultats attendus. Pour la présentation, on va observer ici un exemple de ces calculs pour le Modèle 1. Dans les prochains modèles, on ne présentera que les tableaux des résultats de calcul.

Comme le nombre d'opérations de chaque gamme de production est important, on ne présentera pas toute la gamme et le routage en détail mais on le résume par le nombre de visites à chaque station.

Exemple de calculs

Le modèle 1 qui a la structure ci-dessus, possède les temps de service montrés dans le tableau 5.2. Un type de produit sera traité avec le temps de service qui correspond à la station, par exemple une pièce du type P_1 sera traitée par la station 5 avec le temps de service de 0.085 heure. Les temps de service sont les mêmes pour tous les passages du même type de pièce à la même station.

	S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07	S08	S09	S10	S11	S12
P1	0.064	0.089	0.74	0.048	0.085	0.006	0.057	0.058	0.35	2.28	0.055	0.15
P2	0.035	0.26	2.93	0.004	0.043	0.055	0.077	0.092	0.083	0.29	0.052	0.008
P3	0.39	0.024	0.16	0.063	0.095	0.055	0.089	0.009	0.071	0.48	0.007	0.13
P4	0.3	0.25	1.66	0.032	0.012	0.077	0.081	0.093	0.007	0.59	0.071	0.16
P5	1.002	0.092	0.17	0.096	0.14	0.36	0.059	0.14	0.005	0.18	0.078	0.069

Tableau. 5.2 – Temps de service des stations du Modèle 1

La gamme de production de ce modèle est montrée dans le tableau 5.3, dans lequel la première colonne donne le taux d'arrivée de chaque type de produit. Les colonnes de 3 à 13 donnent le nombre de visites du type de produit à la station, par exemple les produits de type P_5 passent 12 fois à la station 3.

Calcul de la charge :

Avec le temps de service et le taux d'arrivée ci-dessus, on réalise le calcul de la charge

Station	λ	S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07	S08	S09	S10	S11	S12	Total
P1	0.5	11	7	12	5	9	2	1	16	12	2	12	11	100
P2	0.5	4	11	2	10	8	6	15	12	5	14	6	7	100
P3	0.5	3	14	5	12	2	6	9	8	15	3	8	15	100
P4	0.5	5	3	1	12	11	9	5	8	5	1	21	19	100
P5	0.5	3	10	12	6	1	7	9	10	9	5	10	18	100

Tableau. 5.3 – Nombre de visites par station pour le Modèle 1

théorique de chaque station en appliquant la formule (4.3). Par exemple la charge de la station 1 sera calculée par

$$\begin{aligned} \rho_{S_1} &= \frac{1}{M_{S_1}} \sum_{p=1}^5 \sum_{i=1}^{L_p} \tau_{pi} \lambda_p \\ \Leftrightarrow \rho_{S_1} &= \frac{1}{M_{S_1}} (\tau_{S_1 P_1} N_{S_1 P_1} \lambda_{P_1} + \tau_{S_1 P_2} N_{S_1 P_2} \lambda_{P_2} + \tau_{S_1 P_3} N_{S_1 P_3} \lambda_{P_3} \\ &\quad + \tau_{S_1 P_4} N_{S_1 P_4} \lambda_{P_4} + \tau_{S_1 P_5} N_{S_1 P_5} \lambda_{P_5}) \end{aligned}$$

Remplaçons les valeurs :

$$\begin{aligned} \Rightarrow \rho_{S_1} &= \frac{1}{4} (0.064 * 11 * 0.5 + 0.035 * 4 * 0.5 + 0.39 * 3 * 0.5 \\ &\quad + 0.30 * 5 * 0.5 + 1.002 * 3 * 0.5) \\ \Rightarrow \rho_{S_1} &= 0.81 \end{aligned}$$

De la même façon on obtient la charge de toutes les stations du système qui est montrée dans le tableau 5.4

Station	S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07	S08	S09	S10	S11	S12
ρ	0.81	0.91	0.96	0.99	0.79	0.97	0.74	0.53	0.97	0.64	0.82	0.8

Tableau. 5.4 – La charge du Modèle 1

La construction du Modèle 1 en Promodel est assez complexe à cause du nombre de machines, des routages, du nombre de buffers... La figure 5.1 est l'illustration du Modèle 1 dans Promodel. On peut voir le routage complexe du système qui est indiqué par les flèches.

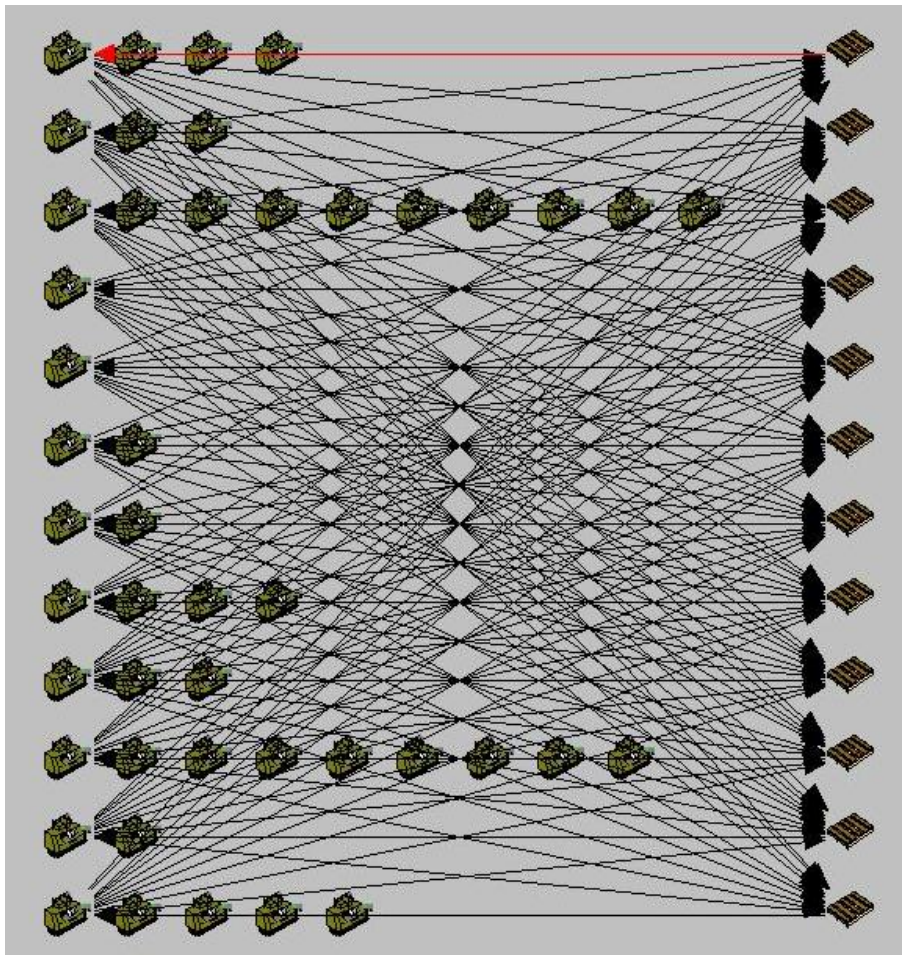


Figure. 5.1 – *Modèle 1*

Comme on a déjà précisé dans le chapitre 2, la performance du système est évaluée par le temps de séjour, l'encours du système et l'écart-type du temps de séjour.

Avec ces données, la simulation de 36000 heures de travail nous donne les résultats montrés dans les tableaux 5.5 et 5.6.

Le tableau 5.5 montre l'utilisation moyenne de la station, la première ligne indique l'utilisation théorique (ou la charge théorique qui est calculée au-dessus), les autres indiquent l'utilisation effective des stations sous une politique donnée. Le tableau 5.6 montre les éléments d'évaluation de la performance d'une politique. Dans ce tableau, les colonnes 2, 5, 8, 11 indiquent l'encours moyen du système ; les colonnes 3, 6, 9, 12 indiquent le temps de

Modèle01	S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07	S08	S09	S10	S11	S12
ρ	0.81	0.91	0.96	0.99	0.79	0.98	0.74	0.53	0.97	0.64	0.82	0.8
EA	0.8	0.9	0.96	0.99	0.78	0.96	0.73	0.53	0.96	0.64	0.82	0.79
FIFO	0.8	0.91	0.96	0.99	0.78	0.96	0.73	0.53	0.96	0.64	0.82	0.79
LBFS-Multi	0.71	0.75	0.82	0.81	0.64	0.79	0.59	0.44	0.78	0.55	0.7	0.67
FIFO(LBFS)	0.8	0.91	0.96	0.99	0.78	0.96	0.73	0.53	0.96	0.64	0.82	0.79

Tableau. 5.5 – La charge théorique (ρ) et l'utilisation de la station observée pour chaque politique

M1	EA			FIFO			LBFS-Multi			FIFO(LBFS)		
	N_{en}	Tc	Vtc	N_{en}	Tc	Vtc	N_{en}	Tc	Vtc	N_{en}	Tc	Vtc
P1	19.89	39.8	1.91	16.05	32.11	0.77	2428.58	4545.74	2.54	43.73	87.55	27.12
P2	14.84	29.64	1.25	13.16	26.34	0.92	1931.57	4055.89	2.33	38.59	77.25	24.39
P3	13.7	27.41	1.38	10.78	21.56	0.92	2850.54	6158.92	2.85	45.39	90.88	32.91
P4	14.48	28.97	1.35	11.27	22.54	0.87	1385.94	2577.34	1.86	41.64	83.36	29.65
P5	16.03	32.08	1.48	11.93	23.88	0.79	2248.26	4809.06	2.28	41.36	82.81	28.60

Tableau. 5.6 – Résultats du Modèle 1 : Encours moyen du système (N_{en}), temps de séjour (Tc) et l'écart-type du temps de séjour (Vtc)

séjour moyen de chaque type de produit ; et les colonnes 4, 7, 10, 13 indiquent l'écart-type du temps de séjour qui exprime la régularité de la sortie de chaque type de produit.

Avec des données respectant les conditions de la charge et de l'arrivée, EA, FIFO, FIFO(LBFS) nous donnent une charge réelle de la station comparable à la charge théorique. En revanche LBFS-Multi montre un problème car la charge de toutes les stations est nettement inférieure à la valeur prévue, ce fait ne s'explique que par l'instabilité de LBFS-Multi pour ce système.

Observons le tableau 5.6, on constate que le temps de séjour et l'encours moyen du système sous LBFS-Multi sont beaucoup plus élevés que pour les autres politiques, cela

signifie une accumulation continue des pièces dans le système. Des bouchons dans le système augmentent le temps moyen de séjour (de 100 à 150 fois par rapport à FIFO). Dans ce même tableau, avec le temps de séjour le plus petit, FIFO est la politique la plus performante pour ce système. Bien que FIFO(LBFS) ne soit pas la politique qui donne la meilleure performance pour ce système, le système est stable.

En bref, le Modèle 1 a pour but de tester la stabilité, la performance pour les quatre politiques considérées. Les résultats de la simulation montrent que EA, FIFO, FIFO(LBFS) sont stables mais pas LBFS-Multi. FIFO donne le temps de séjour le plus petit et la plus petite variabilité du temps de séjour.

Maintenant, on va tester ces quatre politiques sur un autre système dont les gammes de production ne sont pas de la même longueur.

5.3.2 *Modèle 2*

On cherche à tester les politiques dans des conditions où les types de produits ont des fortes différences en nombre d'opérations. La différence de la longueur de gamme de production entre les types peut influencer la performance, surtout pour les politiques qui utilisent la priorité du buffer comme LBFS-Multi et FIFO(LBFS).

	S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07	S08	S09	S10	S11	S12
P1	0.34	0.002	0.35	0.043	0.074	0.068	0.027	0.007	0.002	0.29	0.095	0.27
P2	2.39	1.19	0.06	0.017	0.17	0.045	0.18	1.13	0.23	0.5	0.004	1.2
P3	0.013	0.55	1.76	0.42	0.3	0.24	0.4	0.67	0.019	0.66	0.021	0.12
P4	0.33	0.086	2.49	0.012	0.14	0.64	0.64	0.053	0.24	0.18	0.19	0.89
P5	0.13	0.84	0.72	0.13	0.024	0.014	0.12	0.002	0.51	1.63	0.55	0.3

Tableau. 5.7 – Temps de service des stations du modèle 2

Le taux d'arrivée de tous les types est identique. Les données du Modèle 2 sont montrées dans le tableau 5.7 et le tableau 5.8. Le nombre d'opérations varie de 20 à 100, les temps de service sont choisis convenablement par rapport aux taux d'arrivée de 0.5 pièce/heure afin

Station	λ	S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07	S08	S09	S10	S11	S12	Total
P1	0.5	4	7	14	8	7	7	2	8	14	4	4	21	100
P2	0.5	2	1	2	3	2	1	1	3	2	1	2	0	20
P3	0.5	1	1	3	1	1	3	2	2	3	1	4	8	30
P4	0.5	3	5	3	2	5	4	3	4	4	4	1	2	40
P5	0.5	6	3	2	4	4	8	8	8	6	3	3	5	60
ρ		0.99	0.78	0.96	0.68	0.97	0.98	0.97	0.63	0.76	0.44	0.58	0.98	

Tableau. 5.8 – Nombre de visites à la station, taux d'arrivée et charge de la station du Modèle 2

de respecter la condition de la charge. La charge théorique des stations varie de 44% (à la station 10) à 99% (à la station 01).

On réalise la même simulation sur le Modèle 2 que sur le Modèle 1, c'est-à-dire qu'on effectue la simulation de 36000 heures de travail du système avec des d'arrivées déterministes, les pannes de machines sont négligées, les temps de transport ignorés. Les résultats obtenus en simulation sont montrés dans le tableau 5.9 et le tableau 5.10 (la composition de ces deux tableaux est exactement comme pour ceux du Modèle 1).

Modèle02	S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07	S08	S09	S10	S11	S12
ρ	0.99	0.78	0.96	0.68	0.97	0.98	0.97	0.63	0.76	0.44	0.58	0.98
EA	0.99	0.78	0.95	0.67	0.97	0.97	0.97	0.63	0.75	0.44	0.57	0.98
FIFO	0.99	0.78	0.95	0.67	0.97	0.97	0.97	0.63	0.75	0.44	0.57	0.98
LBFS-Multi	0.91	0.68	0.81	0.56	0.83	0.84	0.84	0.57	0.64	0.38	0.49	0.82
FIFO(LBFS)	0.98	0.77	0.95	0.67	0.96	0.96	0.96	0.63	0.74	0.43	0.57	0.97

Tableau. 5.9 – La charge théorique (ρ) et l'utilisation de la station observée pour chaque politique

Sur ces résultats, on trouve que LBFS-Multi présente le même phénomène que dans le Modèle 1, la charge réelle de chaque station est très inférieure à la valeur théorique pendant

M2	EA			FIFO			LBFS-Multi			FIFO(LBFS)		
	N_{en}	Tc	Vtc	N_{en}	Tc	Vtc	N_{en}	Tc	Vtc	N_{en}	Tc	Vtc
P1	18.25	36.52	1.80	18.10	36.22	1.91	1989.12	4143.98	2.33	39.03	78.15	11.72
P2	9.99	20.00	1.83	7.41	14.82	0.97	1225.37	2539.48	1.42	11.41	22.84	3.35
P3	12.64	25.3	1.65	8.88	17.78	1.14	1680.74	3445.81	1.92	15.38	30.78	4.22
P4	15.92	31.86	1.75	13.01	25.04	1.08	1581.8	3262.67	1.77	20.96	41.94	4.99
P5	17.94	35.9	1.82	16.68	33.39	1.51	1501.05	2666.36	1.68	29.99	60.03	8.11

Tableau. 5.10 – Résultats du Modèle 2 : l'encours moyen du système (N_{en}), Le temps de séjour (Tc) et l'écart-type du temps de séjour (Vtc)

que l'encours moyen du système et le temps de séjour des pièces augmentent. Ce fait conduit le système à l'instabilité.

Les trois politiques EA, FIFO et FIFO(LBFS) sont stables et performantes pour ce système. Parmi les trois politiques stables de ce système, FIFO montre les meilleures performances avec les temps moyens de séjour les plus petits.

Dans le prochain modèle, on va analyser le fonctionnement de ces politiques dans un autre système dans lequel les types de produits ont la même longueur de gamme de production mais des taux d'arrivée différents.

5.3.3 Modèle 3

Maintenant, on analyse le fonctionnement de ces quatre politiques avec un autre système où le lancement des types de produits est nettement différent et les gammes de production ont la même longueur. Le but de cet exemple est d'observer la performance des politiques lorsque le nombre de pièces de chaque type qui arrivent au système est nettement différent.

Les temps de service des stations sont montrés dans le tableau 5.11, la gamme de production et la charge des stations sont présentées dans le tableau 5.12. Ces temps de service et ces taux d'arrivée assurent que le système satisfait les condition de la charge et de l'arrivée. La charge de la station varie de 33% à 99% et la station 06 est la station goulot.

Avec ces données, les résultats qui sortent de la simulation de 36000 heures de travail

	S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07	S08	S09	S10	S11	S12
P1	0.34	0.002	0.35	0.043	0.074	0.068	0.027	0.007	0.002	0.29	0.095	0.27
P2	2.39	1.19	0.06	0.017	0.17	0.045	0.18	1.13	0.23	0.5	0.004	1.2
P3	0.013	0.55	1.76	0.42	0.3	0.24	0.4	0.67	0.019	0.66	0.021	0.12
P4	0.33	0.086	2.49	0.012	0.14	0.64	0.64	0.053	0.24	0.18	0.19	0.89
P5	0.13	0.84	0.72	0.13	0.024	0.014	0.12	0.002	0.51	1.63	0.55	0.3

Tableau. 5.11 – Le temps de service des stations du modèle 3

Station	λ	S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07	S08	S09	S10	S11	S12	Total
P1	0.6	4	7	14	8	7	7	2	8	14	4	4	21	100
P2	0.1	2	1	2	3	2	1	1	3	2	1	2	0	100
P3	0.1	1	1	3	1	1	3	2	2	3	1	4	8	100
P4	0.1	3	5	3	2	5	4	3	4	4	4	1	2	100
P5	0.725	6	3	2	4	4	8	8	8	6	3	3	5	100
ρ		0.72	0.48	0.76	0.68	0.63	0.99	0.33	0.44	0.91	0.44	0.57	0.48	

Tableau. 5.12 – Le nombre de visites à la station, le taux d'arrivée et la charge de la station du modèle 3

de ce système sont montrés dans les tableaux 5.13 et 5.14

On a quelques remarques sur les résultats obtenus :

Premièrement, LBFS-Multi ne peut toujours pas assurer la stabilité du système à cause de l'augmentation continue des certains types de produit (P1, P5) et la sous-charge de la plupart des stations. La performance de LBFS-Multi est donc toujours la plus mauvaise parmi les quatre politiques.

Deuxièmement, les trois politiques restantes sont stables et performantes pour les valeurs calculées.

Modèle03	S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07	S08	S09	S10	S11	S12
ρ	0.72	0.48	0.76	0.68	0.63	0.99	0.33	0.44	0.91	0.44	0.57	0.48
EA	0.72	0.47	0.76	0.68	0.62	0.99	0.33	0.44	0.9	0.44	0.57	0.48
FIFO	0.72	0.48	0.76	0.68	0.62	0.99	0.33	0.44	0.9	0.44	0.57	0.48
LBFS-Multi	0.62	0.36	0.3	0.56	0.19	0.97	0.31	0.32	0.17	0.15	0.38	0.29
FIFO(LBFS)	0.72	0.48	0.76	0.68	0.62	0.99	0.33	0.44	0.9	0.44	0.57	0.48

Tableau. 5.13 – La charge théorique (ρ) et l'utilisation de la station observée pour chaque politique

M3	EA			FIFO			LBFS-Multi			FIFO(LBFS)		
	N_{en}	Tc	Vtc	N_{en}	Tc	Vtc	N_{en}	Tc	Vtc	N_{en}	Tc	Vtc
P1	21.22	35.39	2.90	16.18	26.99	0.88	10059.7	780.94	149.35	17.5	29.19	1.33
P2	2.34	23.46	1.72	2.12	21.23	0.91	3.05	30.56	30.37	2.55	25.5	1.77
P3	2.07	20.79	2.13	1.48	14.83	1.03	2.59	25.95	32.20	1.96	19.66	1.96
P4	2.49	24.9	1.88	1.74	17.44	1.01	2.45	24.54	16.92	2.29	22.93	1.93
P5	19.78	27.29	2.02	13.44	18.53	0.95	338.36	468.87	178.20	16.24	22.4	1.73

Tableau. 5.14 – Les résultats obtenus du Modèle 3 : L'encours moyen du système (N_{en}), Le temps de séjour (Tc) et L'écart-type du temps de séjour (Vtc)

5.3.4 Modèle 4

On va analyser le dernier exemple où les taux d'arrivée et la longueur des gammes sont différents pour chaque type de produit.

Les données de ce système sont montrées dans les tableaux 5.15 et 5.16. Il faut préciser que ces données satisfaisaient toujours le condition de la charge (2.2). La charge de la station varie de 31% à 99% et la station goulot est le numéro 03.

Les tableaux 5.17 et 5.18 montrent les résultats obtenus pour la simulation de 36000 heures de travail de ce système.

Dans ces résultats, on constate que les quatre politiques ont donné de bonnes perfor-

	S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07	S08	S09	S10	S11	S12
P1	0.34	0.002	0.35	0.043	0.074	0.068	0.027	0.007	0.002	0.29	0.095	0.27
P2	2.39	1.19	0.06	0.017	0.17	0.045	0.18	1.13	0.23	0.5	0.004	1.2
P3	0.013	0.55	1.76	0.42	0.3	0.24	0.4	0.67	0.019	0.66	0.021	0.12
P4	0.33	0.086	2.49	0.012	0.14	0.64	0.64	0.053	0.24	0.18	0.19	0.89
P5	0.13	0.84	0.72	0.13	0.024	0.014	0.12	0.002	0.51	1.63	0.55	0.3

Tableau. 5.15 – Le temps de service des stations du modèle 4

Station	λ	S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07	S08	S09	S10	S11	S12	Total
P1	0.1	4	7	14	8	7	7	2	8	14	4	4	21	100
P2	0.6	2	1	2	3	2	1	1	3	2	1	2	0	20
P3	0.5	1	1	3	1	1	3	2	2	3	1	4	8	30
P4	0.1	3	5	3	2	5	4	3	4	4	4	1	2	40
P5	0.25	6	3	2	4	4	8	8	8	6	3	3	5	60
ρ		0.31	0.77	0.99	0.6	0.71	0.17	0.97	0.61	0.91	0.58	0.62	0.36	

Tableau. 5.16 – Le nombre de visites à la station, le taux d'arrivée et la charge de la station du modèle 4

mance (pendant la durée de 36000 heures de travail). Pendant cette durée de simulation, le phénomène d'instabilité de la politique LBFS-Multi apparaît encore dans cet exemple mais avec un effet plus faible. En effet, les temps de séjour de P1 à P5 sous le régime de LBFS-Multi sont beaucoup plus importants que ceux des autres politiques, l'encours moyen du système est aussi plus élevé.

Les trois autres politiques donnent presque la même performance en temps de séjour et écart-type du temps de séjours.

Après quatre exemples, on constate que LBFS-Multi a souvent tendance à déstabiliser le système. Dans la partie suivante, on va analyser l'instabilité de LBFS-Multi afin d'observer le seuil de l'instabilité.

Modèle04	S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07	S08	S09	S10	S11	S12
ρ	0.31	0.77	0.99	0.6	0.71	0.17	0.97	0.61	0.91	0.58	0.62	0.36
EA	0.3	0.77	0.98	0.6	0.7	0.17	0.96	0.6	0.91	0.57	0.61	0.36
FIFO	0.3	0.77	0.98	0.6	0.7	0.17	0.96	0.6	0.91	0.57	0.61	0.36
LBFS	0.3	0.74	0.96	0.59	0.68	0.16	0.94	0.59	0.88	0.56	0.59	0.32
FIFO(LBFS)	0.3	0.77	0.98	0.7	0.7	0.17	0.96	0.6	0.91	0.57	0.61	0.36

Tableau. 5.17 – La charge théorique (ρ) et l'utilisation de la station observée pour chaque politique

M04	EA			FIFO			LBFS-Multi			FIFO(LBFS)		
	N_{en}	Tc	Vtc	N_{en}	Tc	Vtc	N_{en}	Tc	Vtc	N_{en}	Tc	Vtc
P1	2.88	28.81	1.42	3.22	32.27	1.34	162.32	1380.12	1.05	3.37	33.76	1.62
P2	19.39	12.12	0.57	18.06	11.29	0.32	863.44	542.71	388.90	18.19	11.37	0.37
P3	8.37	16.76	0.66	8.49	16.98	0.66	75.65	151.36	178.47	8.71	17.43	0.74
P4	2.38	23.87	1.29	2.2	22.03	0.69	53.20	535.95	498.94	2.28	22.87	0.98
P5	5.73	22.96	1.28	5.48	21.94	1.13	207.03	802.19	559.41	5.68	22.74	1.30

Tableau. 5.18 – Les résultats obtenus du Modèle 4 : L'encours du système (N_{en}), Le temps de séjour (Tc) et L'écart-type du temps de séjour (Vtc)

5.3.5 Problème de l'instabilité de LBFS-Multiproduit

On a prouvé l'instabilité de LBFS-Multi avec le contre-exemple montré dans le chapitre 4. Dans ce chapitre, on a vu l'effet de l'instabilité du LBFS-Multi dans les quatre derniers exemples de simulation. Maintenant on va analyser par la simulation les conditions dans lesquelles LBFS-Multi peut assurer la stabilité du système.

A travers 6 exemples, dont 2 contre-exemples simples et 4 simulations, on constate que LBFS-Multi est instable même quand toutes les conditions nécessaires de stabilité sont satisfaites (la condition de la charge (2.2) et la condition de l'arrivée (4.1)). Dans les exemples de simulation, le système possède toujours au moins une station goulot qui est chargée à

99%. D'autre part, il est clair que toutes les politiques (raisonnables) donnent la même performance pour n'importe quel système si la charge du système est très faible (de 10% à 20% par exemple). Pour cette raison, dans cette partie, on va analyser l'influence de la charge des stations sur la stabilité du système afin de chercher le seuil de stabilité du système sous LBFS-Multi.

Taux		S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07	S08	S09	S10	S11	S12
0.3	C	0.49	0.55	0.58	0.6	0.47	0.59	0.44	0.32	0.58	0.38	0.49	0.48
	S	0.49	0.55	0.58	0.6	0.47	0.58	0.44	0.32	0.58	0.39	0.49	0.48
0.4	C	0.65	0.73	0.77	0.8	0.63	0.78	0.59	0.43	0.77	0.51	0.66	0.64
	S	0.65	0.73	0.77	0.8	0.63	0.78	0.59	0.43	0.77	0.51	0.66	0.64
0.45	C	0.73	0.82	0.87	0.9	0.71	0.88	0.66	0.48	0.87	0.58	0.74	0.72
	S	0.73	0.82	0.87	0.9	0.71	0.88	0.66	0.48	0.87	0.58	0.74	0.72
0.46	C	0.75	0.84	0.89	0.92	0.72	0.9	0.68	0.49	0.89	0.59	0.76	0.74
	S	0.69	0.77	0.8	0.83	0.64	0.8	0.62	0.44	0.78	0.54	0.69	0.67
0.48	C	0.78	0.87	0.92	0.96	0.76	0.94	0.71	0.51	0.93	0.62	0.79	0.77
	S	0.69	0.76	0.83	0.81	0.66	0.78	0.59	0.44	0.81	0.55	0.7	0.67
0.5	C	0.81	0.91	0.96	1	0.79	0.98	0.74	0.53	0.96	0.64	0.82	0.8
	S	0.71	0.78	0.78	0.82	0.61	0.82	0.62	0.44	0.72	0.53	0.68	0.64

Tableau. 5.19 – Les résultats

On utilise le système du Modèle 1 pour chercher le seuil de stabilité de LBFS-Multi. La charge du système dépend du taux d'arrivée, des temps de service et des gammes de production. On ne modifiera que la valeur du taux d'arrivée. Pour simplifier le système, on suppose que tous les types de produit ont le même taux d'arrivée.

Après plusieurs simulations en faisant varier le taux d'arrivée, on obtient les résultats montrés dans le tableau 5.19. Dans le tableau, la première colonne représente le taux d'arrivée de tous les types de produits, pour chaque taux d'arrivée, on a une ligne pour la charge calculée ("C") et une ligne pour la charge obtenue de simulation ("S"). Par exemple, avec

le taux d'arrivée de 0.46, la station 02 a la charge théorique de 0.84 et la charge réelle de 0.77.

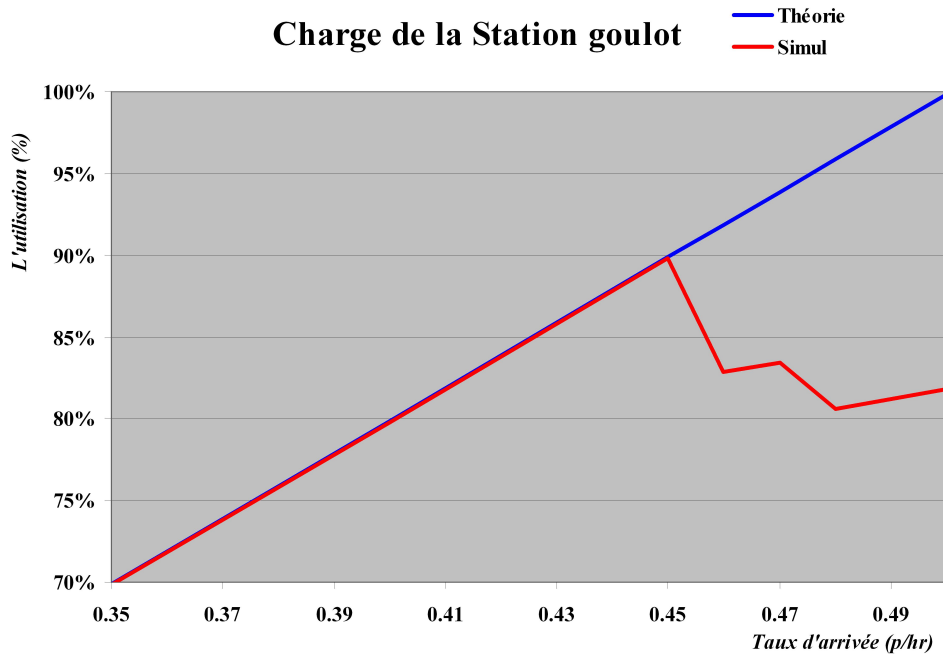


Figure. 5.2 – Charge théorique et en simulation

Ici, le taux d'arrivée varie de 0.3 à 0.5 car

- avec un taux inférieur à 0.3 p/hr, la charge calculée et celle obtenue pour toutes les stations sont exactement égales (la charge trop faible)

- le taux de 0.501 p/hr est la limite de saturation de la station 04 dont la charge est alors de 100%

Si on considère que la différence entre la charge théorique et la charge réelle comme un signal qui annonce l'instabilité, alors à partir de la valeur 0.45 le système commence à entrer dans la zone d'instabilité. En effet, la valeur réelle de la charge de toutes les stations est inférieure à celle calculée.

La figure 5.2 présente les courbes de charge théorique et pratique de la station goulot en fonction du taux d'arrivée. Les deux courbes de charge ne se séparent qu'à partir du taux d'arrivée de 0.45, où la charge de la station goulot est de 90%. De la même manière,

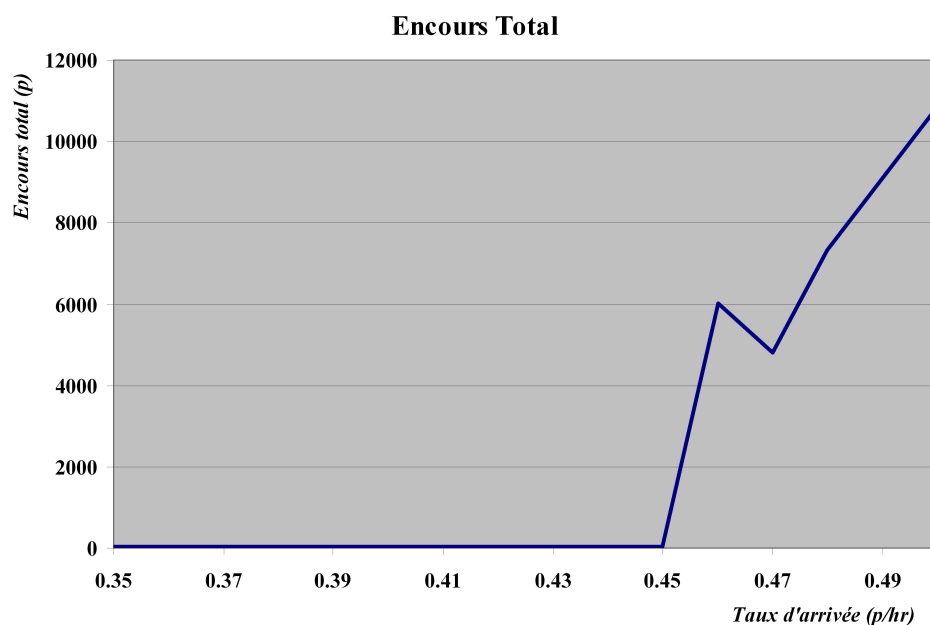


Figure. 5.3 – *Encours total du système en fonction du taux d'arrivée*

l'encours total du système qui est montré dans la figure 5.3 confirme le seuil de la stabilité de LBFS-Multi. L'encours du système (après 36000 heures de travail) augmente brusquement lorsque le taux passe la valeur de 0.45 p/hr.

Bien que le seuil trouvé sera plus précis si on observe un grand nombre d'échantillons, ces résultats nous permettent de conclure que le seuil de la charge de la station goulot où le système est encore stable sous le régime de LBFS-Multi est de l'ordre de 90%.

5.3.6 Quelques résultats avec les arrivées aléatoires

Les résultats obtenus dans les exemples ci-dessus sont effectués avec des arrivées déterministes. On a aussi réalisé des simulations sur ces quatre modèle avec des arrivées aléatoires (dans notre cas une loi exponentielle). Les résultats obtenus présentent certaines différences sur la valeur du temps de séjour, de l'encours moyen et de l'écart-type du temps de séjour. Mais, l'ordre relatif de la performance entre les politiques ne change pas. Les tableaux 5.20 et 5.21 montrent les résultats de la simulation du Modèle 1 en utilisant les arrivées aléatoires.

Modèle01	S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07	S08	S09	S10	S11	S12
ρ	0.81	0.91	0.96	0.99	0.79	0.98	0.74	0.53	0.97	0.64	0.82	0.8
EA	0.8	0.9	0.96	0.99	0.78	0.96	0.73	0.53	0.96	0.64	0.82	0.79
FIFO	0.8	0.91	0.96	0.99	0.78	0.96	0.73	0.53	0.96	0.64	0.82	0.79
LBFS	0.71	0.75	0.82	0.81	0.64	0.79	0.59	0.44	0.78	0.55	0.7	0.67
FIFO(LBFS)	0.8	0.91	0.96	0.99	0.78	0.96	0.73	0.53	0.96	0.64	0.82	0.79

Tableau. 5.20 – La charge théorique (ρ) et l'utilisation de la station observée pour chaque politique

M1	EA			FIFO			LBFS-Multi			FIFO(LBFS)		
	N_{en}	Tc	Vtc	N_{en}	Tc	Vtc	N_{en}	Tc	Vtc	N_{en}	Tc	Vtc
P1	79.94	160.38	36.27	52.76	105.76	38.65	2332.2	4930.99	2.54	92.59	185.76	54.61
P2	74.3	148.51	35.81	54.81	109.5	47.25	2112.5	4220.27	2.32	78.9	157.7	48.92
P3	72.87	147.46	35.97	68.34	138.24	60.05	3029.5	6505.11	2.85	100.01	202.47	64.49
P4	73.13	147.51	35.89	59.16	119.27	57.36	1226	2474.52	1.86	87.24	176.02	61.21
P5	75.68	153.59	36.26	53.5	108.53	41.19	1863.5	3842.23	2.28	90.12	182.97	58.22

Tableau. 5.21 – Les résultats obtenus du Modèle 1 avec les arrivées aléatoires

Dans ces deux tableaux, on trouve que l'utilisation de la station dans le système est toujours la même (par rapport à celle du cas déterministe), toutes les autres performances (le temps de séjour, l'encours moyen, l'écart-type du temps de séjour) sont plus importantes. En comparant les paramètres de performance, on constate que FIFO et EA sont les meilleures politiques, LBFS-Multi est instable. La différence de la performance entre les politiques lors des arrivées aléatoires et celle lors des arrivées déterministes ne sont pas différents.

On ne présentera pas ici les résultats pour les autres modèles car il nous donnent le même type de conclusion.

5.3.7 Synthèse des résultats

D'après les résultats obtenus, on a quelques remarques globales.

- Les politiques basées sur la date d'arrivée sont très performantes, FIFO et EA sont des exemples. Elles donnent la meilleure performance pour les quatre modèles
- LBFS-Multiproduit est établi avec le but de transférer les avantages de LBFS du système monoproduit au multiproduit. Pourtant, cette extension n'est pas une bonne solution, LBFS ne peut pas garder la stabilité du système lorsque la charge est importante. Les analyses sur le seuil de la stabilité de LBFS-Multiproduit nous montrent, sur notre exemple, que lorsque la charge de la machine goulot passe la valeur de 90%, alors LBFS-Multiproduit déstabilise le système.
- En profitant des points forts de FIFO et LBFS, on a proposé la politique FIFO(LBFS). Si ces résultats ne montrent pas sa supériorité, ils montrent la stabilité de FIFO(LBFS) pour ces systèmes. On a aussi trouvé des autres exemples où FIFO(LBFS) est la meilleure politique et donne le temps de séjour et l'écart-type du temps de séjour plus petit que ceux des autres politiques (EA, FIFO, et LBFS), le détail est montré dans [NCM06], [Ngu07].

RESUME DU CHAPITRE 5

Dans ce chapitre, on a analysé les politiques en simulation. Les points principaux abordés dans ce chapitre sont :

- La simulation est une étape très nécessaire en recherche et aussi dans l'industrie. Les résultats obtenus par les simulations nous permettent d'évaluer la performance des politiques de pilotage afin de trouver une bonne politique pour un système donné ou d'améliorer une politique.

- Quatre exemples sont présentés, ils représentent quatre types courants de systèmes de production. Avec les résultats obtenus, on trouve que EA, FIFO, FIFO(LBFS) sont des politiques très performantes et stables même à proximité de la saturation.

- LBFS-Multi n'est stable qu'avec un système à charge relativement faible.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les systèmes ré-entrants, dont les plus représentatifs sont les systèmes de production des semi-conducteurs, ont créé de nouveaux problèmes de gestion des produits. Avec l'existence des cycles dans le routage, les machines ont des difficultés pour bien choisir le produit à traiter, cette difficulté concerne la priorité de traitement du produit lorsqu'il attend le service de la machine. La pratique nous a convaincu que l'utilisation des politiques de pilotage (la manière de distribuer la priorité aux produits) peut non seulement résoudre ce problème mais encore améliorer les performances du système.

Depuis les trente dernières années, les politiques de pilotage ont été beaucoup étudiées et de nombreuses politiques ont été proposées (LBFS, LS, CaF, . . .). Pourtant, la plupart des études sont spécifiques au cas monoproduit et très peu encore sont consacrées au cas multiproduit .

Notre étude sur les systèmes ré-entrants multiproduit (le système produit plusieurs types de produits en parallèle), nous avons montré que le problème de gestion des produits devient plus complexe et que l'application d'anciennes politiques sur ce type de système n'est pas toujours évidente.

En étendant les politiques monoproduit au cas multiproduit, on a prouvé que l'extension de LBFS, dite LBFS-Multiproduit, est instable bien que LBFS soit stable. L'explication de ce comportement est le fait que les flux des types de produits différents se croisent plusieurs fois, les pièces des types différents à des étapes différentes de production peuvent interférer et se bloquer mutuellement.

On a proposé la politique FIFO(LBFS), une politique combinée entre FIFO et LBFS. Cette politique a pour but de profiter les avantages de FIFO (utilisation simple, efficace dans la plupart des systèmes, la priorité du produit ne dépend pas du buffer) et de LBFS (flux tiré, stable dans le cas monoproduit) et d'éliminer le problème de LBFS dans le cas multiproduit. Les résultats numériques nous montrent que FIFO(LBFS) est nettement meilleure

que LBFS-Multiproduit et que dans certains modèles elle peut donner une performance meilleure que FIFO. Dans cette thèse, on n'a pas pu donner une preuve formelle de la stabilité de FIFO(LBFS) mais on conjecture que FIFO(LBFS) est stable dans le cas où FIFO est stable.

Quant aux perspectives, il y a au moins quatre aspects qui pourraient être abordés :

- L'étude de la stabilité des politiques de pilotage : plusieurs politiques sont disponibles mais il y a très peu de résultats de stabilité. La preuve de la stabilité est difficile à faire dans le cas général, et dans certains cas des contre-exemples peuvent être trouvés mais souvent le problème de la stabilité reste ouvert.

- Le développement de politiques de pilotage multiproduit : La plupart des politiques étudiées sont spécifiques au cas monoproduit, et leur application au cas multiproduit n'est pas évidente. A part des politiques qui sont identiques dans le cas monoproduit et multiproduit comme FIFO et EA, on ne peut pas étendre directement une politique monoproduit au cas multiproduit.

- L'étude des performances pratiques des politiques de pilotage : L'intégration des politiques dans des systèmes de production réels est vraiment intéressante. On a vu qu'une politique peut être instable dans la théorie mais fonctionner efficacement pour de nombreux systèmes réels. FIFO en est un exemple. Bien que FIFO soit instable (pour un système particulier) elle est souvent très efficace et reste de loin la plus utilisée dans les systèmes de production réels.

- La levée de certaines hypothèses de modélisation : dans le cadre de cette thèse on a étudié les performances des politiques avec des hypothèses telles que la capacité du buffer est infinie, le temps de préparation et le temps de transport entre les stations sont négligés. Les performances des politiques sans ces conditions, parfois peu réalistes, serait intéressante à étudier.

[ZND⁺07]

BIBLIOGRAPHIE

- [And00] M. Andrews. Instability of FIFO in session-oriented networks. *Journal of Algorithms*, 50 :232–245, 2000.
- [BDPM06] M. Bureau, S. Dauzère-Perès, and Y. Mati. Scheduling challenges and approaches in semiconductor manufacturing. In A. Dolgui, G. Morel, and C. E. Pereira, editors, *INCOM2006*, volume 2, pages 739–744, Saint-Etienne France, May 2006.
- [Ben03] B. Benhabib. *Manufacturing Design, Production, Automation, and Integration*. Marcel Dekker, 2003.
- [BGL04] R. Bhattacharjee, A. Goel, and Z. Lotker. Instability of FIFO at arbitrarily low rates in the adversarial queueing model. *SIAM Journal on Computing*, 34(2) :318–332, 2004.
- [Bis97] C. G. Bispo. *Re-Entrant Flow Lines*. PhD thesis, Graduate School of Industrial Administration and the Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA 15213, September 1997.
- [BK88] T. Bielecki and P. R. Kumar. Optimality of zero-inventory policies for unreliable manufacturing systems. *Operations Research*, 36(4) :532–541, August 1988.
- [BKP⁺96] A. Borodin, J Kleinberg, P. Raghavan, M. Sudan, and D. P. Williamson. Adversarial queueing theory. In *28th ACM Symposium on Theory of Computing*, pages 376–385, 1996.
- [BP97] K. Burgess and K. M. Passino. Stable scheduling policies for flexible manufacturing systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 42(3) :420–426, March 1997.
- [Chr06] G. Chryssolouris. *Manufacturing Systems : Theory and Practice*. Springer Science+Business Media, 2006.

- [CR89] C. J. Chase and P. J. Ramadge. On the real-time control of flexible manufacturing systems. In *IEEE Conference of Decision and Control*, Tampa, Florida, December 1989.
- [CT94] H. F. Chen and Q. Y. Tang. Stability analysis for manufacturing systems with unreliable machines and random inputs. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 39(3) :681–687, March 1994.
- [CZ97] H. Chen and H. Zhang. Stability of multiclass queueing networks under FIFO service discipline. *Mathematics of Operations Research*, 22(3) :691–725, August 1997.
- [DF03] R. M. Dabbas and J. W. Fowler. A new scheduling approach using combined dispatching criteria in wafer fabs. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 16(3) :501–510, August 2003.
- [DHV04] J. G. Dai, J. Hasenbein, and J. V. Vate. Stability and instability of a two-station queueing network. *The Annals of Applied Probability*, 14(1) :326–377, 2004.
- [Jae02] R. C. Jaeger. *Introduction to Microelectronic Fabrication*. Prentice Hall, 2002.
- [J.T03] J. Turley. *The Essential Guide to Semiconductors*. Prentice Hall, New Jersey, 2003.
- [Kel79] F. P. Kelly. *Reversibility and Stochastic Networks*. John Wiley and Sons, Chichester, 1979.
- [KK96] S. Kumar and P. R. Kumar. *Stochastic Networks : Stability and Rare Events (Lecture Notes in Statistics)*, volume 117, chapter Closed queueing networks in heavy traffic : Fluid limits and efficiency, pages 41–64. Springer-Verlag, New York, 1996.
- [KK01] S. Kumar and P. R. Kumar. Queueing network models in the design and analysis of semiconductor wafer fabs. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 17(5) :548–561, October 2001.
- [KKSKJ98] Y.-D. Kim, J.-U. Kim, S.-K. Lim, and H.-B. Jun. Due-date based scheduling and control policies in a multiproduct semiconductor wafer fabrication facility.

- IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 11 :155–164, February 1998.
- [KM95] P. R. Kumar and S. P. Meyn. Stability of queueing networks and scheduling policies. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 40(2) :251–260, February 1995.
- [KS90] P. R. Kumar and T. I. Seidman. Dynamic instabilities and stabilization methods in distributed real-time scheduling of manufacturing systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 35(3) :289–298, March 1990.
- [Kum93] P. R. Kumar. Re-entrant lines. *Queueing Systems : Theory and Applications Special Issue on Queueing Networks*, 13 :87–110, 1993.
- [Kum94a] P. R. Kumar. Scheduling semiconductor manufacturing plants. *IEEE Control Systems Magazine*, 14 :30–40, 1994.
- [Kum94b] P. R. Kumar. *Stochastic Modeling and Analysis of Manufacturing Systems*, chapter Scheduling Manufacturing Systems of Re-Entrant Lines, pages 325–360. Springer Verlag, 1994.
- [Kum95] P. R. Kumar. A tutorial on some new methods for performance evaluation of queueing networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 13(6) :970–981, August 1995.
- [LK91] S. H. Lu and P. R. Kumar. Distributed scheduling based on due dates and buffer priorities. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 31(12) :1406–1416, December 1991.
- [LPT⁺05] G. Liberopoulos, C. T. Papadopoulos, B. Tan, J. M. Smith, and S. B. Gershwin. *Stochastic Modeling of Manufacturing Systems : Advances in Design, Performance Evaluation, and Control Issues*. Springer, September 2005.
- [LRK93] S. H. Lu, D. Ramaswamy, and P. R. Kumar. Scheduling semiconductor manufacturing plants to reduce mean and variance of cycle-time. In *Advanced Semiconductor Manufacturing Conference and Workshop*, pages 83–85, October 1993.

- [LRK94] S. H. Lu, D. Ramaswamy, and P. R. Kumar. Efficient scheduling policies to reduce mean and variance of cycle-time in semiconductor manufacturing plants. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 7 :374–388, 1994.
- [MS04] G. May and S. Sze. *Fundamentals of Semiconductor Fabrication*. Wiley, 2004.
- [MS06] Gary S. May and Costas J. Spanos. *Fundamentals of Semiconductor Manufacturing and Process Control*. J. Wiley & Sons, 2006.
- [NCM05] H. B. Nguyen, C. Commault, and S. Mocanu. On the stability of the last buffer first serve scheduling rule for multi product reentrant systems. Technical report, LAG, 2005.
- [NCM06] H.B. Nguyen, C. Commault, and S. Mocanu. Etude en simulation de politiques de pilotage multiproduit dans l’industrie des semi-conducteurs. In *Colloque IPI : "Comprendre et piloter la mutation des systèmes de production"*, 2006.
- [Ngu07] H.B. Nguyen. Politiques de pilotage de systemes a flux complexe. In *JD-JN-MACS*, 2007.
- [PHK94] J. R. Perkins, C. Humes, and P. R. Kumar. Distributed scheduling of flexible manufacturing systems : Stability and performance. *IEEE Transactions On Robotics And Automation*, 10 :133–141, 1994.
- [PI77] S. S. Panwalker and A. Iskarder. A survey of scheduling rules. *Operations Research*, 25 :45–61, 1977.
- [PK89] J. R. Perkins and P. R. Kumar. Stable, distributed, real-time scheduling of flexible manufacturing/assembly/disassembly system. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 34 :139–148, 1989.
- [PK95] J. R. Perkins and P. R. Kumar. Optimal control of pull manufacturing systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 40(12) :2040–2051, December 1995.
- [Rev98] S. A. Reveliotis. The instability of last-buffer-first-serve scheduling policy for capacitated re-entrant lines. In *Proceedings of American Control Conference*, 1998.
- [Rev00] S. A. Reveliotis. The destabilizing effect of blocking due to buffering capacity

- in multi-class queueing networks. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 45(3) :585–588, March 2000.
- [Rod97] A. A. Rodriguez. Release policy governor(rpg) for re-entrant semiconductor fabrication lines. In *IEEE Conference on Decision and Control*, San Diego, California USA, December 1997.
- [SDZ07] J. G. Shanthikumar, S. Ding, and M. T. Zhang. Queueing theory for semiconductor manufacturing systems : A survey and open problems. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 4(4) :513–521, October 2007.
- [Sei94] T. I. Seidman. "First Come First Serve" can be unstable! *IEEE Transactions on Automatic Control*, 39(10) :2166–2171, October 1994.
- [SK95] D. L. Sohl and P. R. Kumar. Fluctuation smoothing scheduling policies for multiple process flow fabrication plants. In *Electronics Manufacturing Technology Symposium, 1995. 'Manufacturing Technologies - Present and Future', Seventeenth IEEE/CPMT International*, pages 190–198, Austin, TX, USA, 1995.
- [SL03] Y. Shen and R. C. Leachman. Stochastic wafer fabrication scheduling. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 16 :2–14, 2003.
- [SZY⁺07] Y. Song, M.T. Zhang, J. Yi, L. Zhang, and L. Zheng. Bottleneck station scheduling in semiconductor assembly and test manufacturing using ant colony optimization. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 4(4) :569–577, October 2007.
- [Tsa00] P. Tsaparas. Stability of open multiclass networks in adversarial queueing theory. 2000.
- [UUS06] A. A. Upasani, R. Uzsoy, and K. Sourirajan. A problem reduction approach for scheduling semiconductor wafer fabrication facilities. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 19 :216–226, May 2006.
- [Wal96] J. M. Walker. *Handbook of Manufacturing Engineering*. Marcel Dekker, 1996.
- [Wei88] L. M. Wein. Scheduling semiconductor wafer fabrication. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 1 :115–130, 1988.

- [WK96] G. I. Winograd and P. R. Kumar. The FCFS service discipline : Stable network topologies, bounds on traffic burstiness and delay, and control by regulators,. *Mathematical and Computer Modelling*, 23(11/12) :115–129, 1996.
- [WT00] S Wolf and R. N. Tauber. *Silicon Processing for the VLSI Era*, volume 1. Sunset Beach, 2000.
- [WWQ07] Z. Wang, Q. Wu, and F. Qiao. A lot dispatching strategy integrating wip management and wafer start control. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 4(4) :579–583, October 2007.
- [YS92] Z. B. Yang and L. Y. Shi. Note on "Distributed Scheduling Based on Due Dates and Buffer Priorities" by S.H. Lu and P.R. Kumar. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 36 :1416–1418, 1992.
- [ZND⁺07] M. T. Zhang, S. Niu, S. Deng, Z. Zhang, Q. Li, and L. Zheng. Hierarchical capacity planning with reconfigurable kits in global semiconductor assembly and test manufacturing. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 4(4) :543–551, October 2007.