

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان
Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

En : Génie industriel

Spécialité : Ingénierie de la production et Chaîne logistique

Par : FELLAH Rima & SAFI Loumia

Intitulé

Evaluation des performances d'un atelier « job-shop » basé sur des concepts de la physique des usines

Soutenu publiquement, le 22 / 06 / 2022, devant le jury composé de :

M. Khalid MEKAMCHA	MCB	Université de Tlemcen	Président
M ^{me} Amaria OUIS	MCB	Université de Tlemcen	Examinateur
M. Abdelkader HADRI	MAA	Université de Tlemcen	Examinateur
M. Amine Hakim GUEZZEN	MCB	Université de Tlemcen	Encadrant
M ^{me} OUHOUD Amina	MCB	Université de Tlemcen	Co-Encadrant

Année universitaire : 2021 /2022

Remerciement

On remercie Dieu le tout puissant de nous avoir accordé la force, la santé et la volonté pour faire aboutir à ce travail.

*Au terme de notre cursus et les efforts engagés, nous avons pu surpasser toutes les difficultés grâce à la contribution des personnes qui ont pris part dans l'aboutissement de ce projet, au premier lieu, nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à notre respectueux encadrant **M. Amine Hakim GUEZZEN**, nous avons pu profiter de ses connaissances scientifiques, de ses orientations, de ses conseils précieux et du soutien moral et intellectuel qu'elle nous a apporté. Nous le remercions aussi de sa constante disponibilité et son grande qualité humaine tout au long de ce travail.*

*Nous remercions chaleureusement notre Co-encadrante **M^{me} Amina OUHOUD** pour son soutien et son encouragement prodigué tout au long de ce semestre.*

*Nos respectueux remerciements sont dédiés aux membres du jury, **M^{me} Amaria OUIS**, **M. Khalid MEKAMCHA** et **M. Abdelkader HADRI**, d'avoir accepté d'examiner et de porter leur jugement sur ce modeste travail.*

Ces remerciements ne seraient pas complets sans une pensée pour nos parents, nos sœurs et nos frères. Merci de nous avoir encouragées et soutenues tout au long de ces années et de nous avoir permis de mener à bien nos études.

Et enfin, nous présentons nos vifs remerciements à tous ceux et celles qui nous ont aidées de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Dédicaces

A mes parents et ma petite famille

A vous chers lecteurs

Safi Loumia

Dédicaces

*Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail à **mes chers parents** qui sacrifient éternellement pour m'offrir le meilleur d'éducation et de soutien, qui n'ont épargné aucun effort à faire pour arriver à ce stade.*

*A mes sœurs **Djamila** et **Marwa** et à mes frères **Mohamed**, **Moustafa** et **Abdel Ali** pour l'amour et la confiance qui m'ont toujours accordée.*

*A mes précieuses amies **Souhila**, **Rania** et **Chaima** pour leurs conseils, leur aide et leur merveilleuse présence à mes côtés et leur compréhension en les souhaitant toute la joie et la prospérité.*

*A mon cher fiancé **Abdel Latif** et toute ma **belle-famille** pour leur soutien et leur encouragement.*

*A mon binôme **Loumia** pour son partage de connaissances et ses efforts pour la réalisation de ce travail, je la souhaite mes meilleurs vœux de succès.*

A tous mes enseignants, mes amis et tous ceux et celles qui m'ont encouragée et aidée durant tout mon cursus.

Fellah Rima

SOMMAIRE

Introduction Générale	1
CHAPITRE 01 : Généralités sur les systèmes de production	3
1.1. Introduction	3
1.2. Définitions	3
1.2.1. Système de production	3
1.2.2. Station de travail	3
1.2.3. Produit fini	3
1.2.4. Consommables	3
1.2.5. Routage	3
1.2.6. Commande	4
1.2.7. Job (Tâche)	4
1.2.8. Ressource	4
1.2.9. Utilisation	4
1.2.10. Temps d'attente	4
1.2.11. Temps de déplacement	4
1.2.12. Flexibilité	4
1.2.13. Capacité (Cp)	5
1.2.14. Stock matière première (RMI)	5
1.2.15. Stock des produits finis (Finished Goods Inventory - FGI)	5
1.2.16. Stock de fin de chaine (Crib Inventory)	5
1.2.17. Stock Total	5
1.2.18. Encours Critiques constants (Constant Work In Process - CONWIP)	5
1.2.19. Inventaire	5
1.2.20. Rotation des stocks / taux de rotation	5
1.3. Classification des ateliers de production	5
1.3.1. Atelier Flow shop	5
1.3.2. Atelier Job-shop	6
1.3.2.1. Types d'atelier	6
1.3.2.1.1. Job shop classique	6
1.3.2.1.2. Job shop flexible	7
1.3.3. Atelier Open Shop	7

1.3.4.	Atelier a ressource parallèle.....	8
1.4.	Avantage et inconvénient de chaque type	9
1.5.	Mesure des performances	10
1.5.1.	Taux de production (débit)	10
1.5.2.	Temps de cycle (CT)	11
1.6.	Conclusion	11
CHAPITRE 02 : Principe de la Physique des Usines		12
2.1.	Introduction.....	12
2.1.1.	Physique des usines	12
2.2.	Etat de l'art.....	12
2.3.	Paramètres.....	14
2.3.1.	Taux de production de la machine goulot : r_b (Débit goulot)	14
2.3.2.	Temps de traitement brut (T_0).....	14
2.4.	Coefficient de congestion.....	14
2.5.	Loi de Little	14
2.6.	Formulation mathématique	15
2.6.1.	Performance du meilleur cas « Best Case ».....	15
2.6.2.	Performance du pire cas possible « Worst Case »	16
2.6.3.	Performance du pire cas pratique « Pratical Worst Case (PWC) ».....	17
2.7.	Evaluation interne	19
2.7.1.	Meilleurs cas :	19
2.7.2.	Le pire cas possible	23
2.7.3.	Le pire cas pratique « PWC »	26
2.8.	Variabilité d'un système flow shop.....	30
2.8.1.	Définition.....	30
2.8.2.	Sources de variabilité	30
2.8.3.	Types de variabilité	31
2.8.4.	Mesures de la variabilité.....	31
2.8.5.	Classes de variabilité	31
2.8.6.	Relation avec les cas de performance.....	32
2.9.	Conclusion	32
Chapitre 3 : Evaluation des performances d'un système Job Shop		33
3.1.	Introduction.....	33
3.2.	Description du système étudié	33

3.3.	Notations et Hypothèses	35
3.3.1.	Notations.....	35
3.3.2.	Hypothèses.....	35
3.4.	Formulation mathématique	36
3.4.1.	Variabes de décision.....	36
3.4.2.	Calcul du temps de cycle	37
3.4.3.	Algorithme de calcul :	37
3.4.4.	Organigramme de l'algorithme proposé :.....	38
3.4.5.	Caractéristique du système	39
3.4.6.	Loi de Little	40
3.5.	Modélisation	40
3.5.1.	Modélisation graphique	41
3.5.2.	Modélisation mathématique.....	43
3.5.2.1.	Règle du meilleur cas « Best Case Performance ».....	44
3.5.2.2.	Règle du Pire cas possible « Worst Case Performance »	46
3.5.2.3.	Règle du pire cas pratique « Pratical Worst Case Performance ».....	49
3.6.	Comparaison des résultats trouvés par LEKIN.....	52
3.7.	Conclusion	54
Chapitre 04 :	Simulation et validation des résultats	55
4.1.	Introduction.....	55
4.2.	Représentation du système simulé	55
4.3.	Résultat de simulation	59
4.3.2.	Taux de production.....	60
4.3.3.	Temps de cycle.....	61
4.4.	Temps d'achèvement de chaque Job :	61
4.5.	Comparaison des Résultats	63
4.5.1.	Propositions d'amélioration.....	64
4.6.	Conclusion	67
	Conclusion générale.....	69
	ANNEXE.....	70
	Bibliographies.....	72

Liste des figures

Figure 1.1 : Atelier à Cheminement Unique (flow-shop)	6
Figure 1.2 : Atelier à Cheminement Multiple (job-shop).....	6
Figure 1.3 : Schéma d'un atelier Job-shop flexible à deux étages	7
Figure 1.4 : Modèle Open shop	8
Figure 1.5 : Problèmes à machines parallèles.....	8
Figure 2.1 : Graphe TH en fonction de WIP (Best Case).....	15
Figure 2.2 : Graphe CT en fonction de WIP (Best Case).....	16
Figure 2.3 : Graphe CT en fonction de WIP (Worst Case)	17
Figure 2.4 : Graphe TH en fonction de WIP (Worst Case)	17
Figure 2.5 : Graphe TH en fonction de WIP (Practical Worst Case)	18
Figure 2.6 : Graphe CT en fonction de WIP (Practical Worst Case).....	18
Figure 2.7 : Cas WIP= 1.....	19
Figure 2.8 : Cas WIP= 2.....	20
Figure 2.9 : Cas WIP= 3.....	20
Figure 2.10 : Cas WIP= 4.....	21
Figure 2.11 : Cas WIP= 5.....	21
Figure 2.12 : Meilleur Cas de performance pour CT vous WIP.....	23
Figure 2.13 : Meilleur Cas de Performance pour TH vous WIP	23
Figure 2.14 : Evolution des performances de pire cas pratique d'un flow shop	24
Figure 2.15 : Pire Cas Pratique de Performance pour TH en fonction de WIP	26
Figure 2.16 : Pire Cas Pratique de Performance pour CT en fonction WIP	26
Figure 2.17 : Pire Cas Possible de Performance pour TH en fonction de WIP	28
Figure 2.18 : Pire Cas Possible de Performance pour CT en fonction de WIP	28
Figure 2.19 : Etats étalés dans le pire des cas possible (PWC), ligne à quatre machines et à trois tâches	30
Figure 2.20 : États regroupés dans le pire des cas possible (PWC), ligne à quatre machines et à trois tâches.	30
Figure 2.21 : Classes de variabilité [1].....	31
Figure 3.1: Organisation du système étudié	34
Figure 3.2 : Organigramme proposé	38
Figure 3.3 : Graphe CT en fonction de WIP pour les trois jobs (Best Case)	46
Figure 3.4 : Graphe TH en fonction de WIP pour les trois jobs (Best Case)	46
Figure 3.5 : Graphe CT en fonction de WIP pour les trois jobs (Worst Case)	48
Figure 3.6 : Graphe TH en fonction de WIP pour les trois jobs (Worst Case)	49
Figure 3.7 : Graphe CT en fonction de WIP pour les trois jobs (Practical Worst Case (PWC)).....	51
Figure 3.8 : Graphe TH en fonction de WIP pour les trois jobs (Practical Worst Case)	52
Figure 3.9 : Diagramme de Gantt trouvé utilisent la règle SPT	53
Figure 3.10 :Diagramme de Gantt trouvé utilisent la règle EDD	53
Figure 3.11 : Critères de performance trouvée par chaque règle.	54
Figure 3.12 : Temps de cycle obtenus par chaque règle	54
Figure 4.1 : Configuration du système Job -shop	56
Figure 4.2 : Modèle de simulation	56
Figure 4.3 : Configuration du module Set.....	57
Figure 4.4 : Routages suivies par chaque job.	57

Figure 4.5 : Configuration du module Variable.....	57
Figure 4.6 : Configuration du module Record 1	58
Figure 4.7 : Configuration du Module Assign.....	58
Figure 4.8 : Record Time Between	58
Figure 4.9 : Configuration du module Statistic	59
Figure 4.10 : Résultats de la simulation de système	59
Figure 4.11 : Taux d'utilisation des machines	60
Figure 4.12 : Variation des temps de cycle CTi en fonction des encours critique WIPi.....	62
Figure 4.13 : Algorithmes proposée.....	65
Figure 4.14 : Résultat de la simulation des nouveaux routages	66
Figure 4.15 : taux d'utilisation de nouveau routage.....	66

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Avantages et inconvénients de chaque atelier	9
Tableau 2.1 : Coefficient de congestion.....	14
Tableau 2.2 : Résultats TH et CT en fonction de WIP (Best Case Performance).....	22
Tableau 2.3 : Résultats TH et CT en fonction de WIP (Worst Case Performance)	25
Tableau 2.4 : Résultats TH et CT en fonction de WIP (Practical Worst Case Performance (PWC)).....	27
Tableau 2.5 : États possibles pour un système avec quatre machines et trois tâches [1]	29
Tableau 3.1 : Table d'affectation pour l'étude	34
Tableau 3.2 : Notations	35
Tableau 3.3 : Tableau récapitulatif de l'analyse des performances de notre système.....	41
Tableau 3.4 : Résultats TH_i et CT_i en fonction de WIP_i (Best Case Performance)	45
Tableau 3.5 : Résultat de CT_i et TH_i en fonction de WIP_i (Worst Cas Performance)	48
Tableau 3.6 : Résultat de CT_i et TH en fonction de WIP_i (Practical Worst Case Performance)	51

Abréviations

Abréviations	Signification
CT	Temps de cycle
WIP (W₀)	Encours critiques (Work in process)
CONWIP	Travail constant en cours
TH	Taux de production (Débit)
T₀	Temps de traitement brut
r_b	Taux de goulot d'étranglement d'une ligne
FIFO	Premier entre, premier sorti
RMI	Inventaire des matières premières
FGI	Stock des produits finis
t	La moyenne
σ²	La variance
C ou CV et C² ou SCV	Coefficient de variation
m	Nombre des machines
n	Nombre total de Job i.
J_i	L'ensemble des jobs J = {J ₁ , J ₂ , ..., J _n }
O_{il}	Opérations numéro l appartenant au job i
P_{ilk}	Temps de traitement de l'opération O _{il} sur la machine k
T_{0ilk}	Temps de traitement brut (temps cycle minimum
TA_{ik}	Temps d'attente dans la file d'attente de la machine k.
TQ_{J_i}	Temps d'attente du job i dans le système.
CT_{J_i}	Temps de Cycle du job i
CT_{J_ir}	Temps de cycle du job i du routage r
CT	Temps de Cycle du système
Y_{ir}	Routage r du job i, r = 1, 2, ..., R
TH_i	Taux de production du job i

Abréviations

X_{ilk}	Variable de décision liée à l'affectation de l'opération O_{il}
W_{0ilk}	Les encours critique de tous les jobs i.
Z_{ik}	Variable de décision liée à la disponibilité de la machine k
Y_i	L'ensemble de routage de chaque job i
SPT	Shortest processing time
EDD	Earliest due date.
LPT	Longest processing time
WSPT	Weighted shortest processing time
FIFO	First in first out
CR	Critical ratio
i	Indice des jobs, $i = 1, 2, \dots, n$.
l	Indice des opérations, $l = 1, 2, \dots, L_i$
r	Indice de routages, $r=1, 2, \dots, R$
k	Indice des machines, $k = 1, 2, \dots, m$.

Introduction Générale

Actuellement, l'économie se repose sur l'industrie qui signifie la transformation de matières premières en produit fini vendable en exploitant des ressources matérielles (machines, produits chimiques, matériaux ...) et des ressources immatérielles (ressources humaines, logiciels ...). Le système de production englobe ces ressources ainsi que le processus suivi afin d'atteindre l'objectif. Les entreprises doivent maîtriser la complexité de leurs systèmes de production et s'adapter avec l'évolution industrielle pour assurer leur compétitivité dans le marché.

Les systèmes de production sont le problème le plus complexe de l'environnement industriel. Si bien que la situation actuelle des entreprises manufacturières ont connu des changements importants en termes de qualité et de prix dans des délais de plus en plus courts.

Ce n'est plus un atout pour réussir si l'on ne s'intéresse qu'à la production, comme c'était le cas par le passé. L'objectif principal de toute entreprise existante n'est pas seulement la productivité, mais aussi et surtout la compétitivité à travers les nouvelles idées que l'entreprise présente et non l'imitation afin d'avoir une solide compréhension de leurs systèmes pour leur permettre d'identifier des points d'influence. Ainsi, l'amélioration de la gestion de la production est un développement de compétences qui sera de plus en plus précieux dans l'industrie. Le système Job Shop vise à mieux organiser le travail du système de production et à gérer ses différentes opérations.

Du point de vue opérations, il existe des tendances comportementales communes à presque toutes les entreprises manufacturières. Nous estimons qu'il peut être organisé dans un ensemble de connaissances pour servir de base de connaissances au responsable de la fabrication. Dans ce projet, nous utilisons les concepts de base de la Factory physics, en citant des principes de base tels que les « lois de fabrication » et en identifiant des idées générales à partir de pratiques spécifiques. Notre objectif principal est de développer de nouvelles et meilleures méthodologies dans le pilotage, la gestion et dans la conception des systèmes de fabrication.

Nous utilisons le terme physique des usines comme une discipline basée sur la méthode scientifique et ayant de nombreux points communs avec le domaine de la physique :

La physique des usines fournit un contexte pour comprendre les processus de fabrication qui permet à un responsable de fabrication ou à un ingénieur de poser et de résoudre les bons problèmes.

La physique est généralement considérée comme une matière technique exigeante.

Les physiciens ont généralement une intuition bien développée dans le monde de la physique. Avant même d'écrire des équations mathématiques pour représenter un système, un physicien donne un sens qualitatif aux paramètres importants et à leurs relations

Notre problème étudié dans ce travail c'est l'évaluation des performances d'un système job-shop en utilisant les concepts et principes de base énoncés comme "Lois de fabrication", pour obtenir une description systématique du comportement de base d'un système (Best Cas, Worst Cas and Pratical Worst Cas).

L'objectif principal d'étudier un tel système est de trouver les meilleurs routages de chaque job lié au critère d'augmentation de la capacité de production tout en réduisant le temps total de production.

Ce mémoire est organisé de la manière suivante :

Dans le premier chapitre, nous allons dans un premier lieu définir quelques concepts fondamentaux en relation avec la physique des usines des systèmes de production que nous allons expliquer minutieusement.

Quant au chapitre 2, il se compose de deux parties :

Partie I : cette partie donne un aperçu des lois de la physique des usines, qui est une étude récente utilisée pour améliorer les performances du système en étudiant son comportement appuyé par des exemples dans ses trois états (Best Case, Worst Case, Pratical Worst Case (PWC)) pendant le fonctionnement. La deuxième partie étudie la variance considérée comme un écart par rapport à l'uniformité en analysant plusieurs équations du système de production.

Dans le chapitre 3, nous commençons à étudier les systèmes job shop avec les concepts de la physique des usines pour maîtriser les règles de base de ces systèmes. Notre objectif ici n'est pas de définir ou d'améliorer les systèmes de fabrication, mais simplement de décrire comment ils peuvent agir et comment ils se comportent.

Dans ce chapitre, notre but est de faciliter l'étude d'un système complexe. Autrement dit, nous réduirons la complexité des systèmes de fabrication à un niveau gérable en limitant notre attention à des composants et des comportements spécifiques, nous mettrons en évidence l'idée principale de notre travail en étudiant les relations entre le temps de cycle, les encours (Niveau WIP) et la productivité du système pour tous les jobs, en modélisant et en extrayant les équations de la physique des usines pour notre système proposé.

Enfin dans le chapitre 4, nous allons mettre en avant l'idée principale de notre travail. Nous allons utiliser le simulateur Arena pour modéliser et simuler le système « Job shop » en utilisant des concepts de la physique des usines.

Nous proposons d'abord de concevoir un système Job Shop composé de trois jobs et de six machines pour obtenir le temps de cycle et le taux de production maximum parmi les trois jobs afin de comparer ces résultats avec les résultats du chapitre précédent qui sont calculés manuellement en utilisant les règles de la physique des usines.

Ce mémoire se terminera par une conclusion générale et une bibliographie répertoriant tous les documents cités au cours de ce travail.

CHAPITRE 01 : Généralités sur les systèmes de production

1.1. Introduction

Ce chapitre introduit plusieurs concepts pour concevoir des systèmes de production, dans lesquels les lignes de production sont équilibrées et des méthodes de gestion des tâches et des projets sont définies.

Dans l'industrie manufacturière, un système de production regroupe tous les moyens pour donner de la valeur ajoutée à des produits ou services qui respectent un ensemble de contraintes afin d'atteindre des objectifs précis afin que les systèmes de production puissent être classés selon la nature et la taille des produits fabriqués.

1.2. Définitions

Dans cette section, les termes suivants sont définis pour avoir une signification plus large lorsqu'ils sont appliqués aux chapitres suivants :

1.2.1. Système de production

Un système de production représente l'ensemble des ressources (hommes, machines, méthodes et processus) dont la synergie est organisée pour transformer de la matière première (ou composants) dans le but de créer un produit ou un service. [1]

1.2.2. Station de travail

Une station de production est un ensemble d'une ou plusieurs stations identiques qui exécutent des fonctions où chaque station de travail se compose d'un ou plusieurs serveurs qui exécutent une certaine étape de l'ensemble du processus de production.

1.2.3. Produit fini

Un produit fini est un produit qui, après transformation, fabrication ou construction, est prêt à être distribué.

1.2.4. Consommables

Les consommables sont des matériaux tels que des pièces, des produits chimiques, des gaz et des lubrifiants qui sont utilisés dans les stations de travail, une entreprise, un système ou un processus (dans le domaine de la gestion de la qualité) mais qui ne font pas partie du produit vendu.

1.2.5. Routage

Le routage est une suite donnée de ressources que doit visiter le produit durant sa fabrication pour réaliser sa gamme de fabrication.

1.2.6. Commande

Il s'agit d'une demande d'un client pour un numéro de pièce pour un produit spécifique, dans une certaine quantité, à livrer à une date spécifique.

1.2.7. Job (Tâche)

Une tâche est un travail élémentaire dont la réalisation nécessite un certain nombre d'unités de temps et d'unités de chaque ressource. Chaque tâche est caractérisée par une durée d'exécution et un certain nombre de ressources.

1.2.8. Ressource

Une ressource est un moyen technique ou humain utilisé pour permettre la réalisation Des tâches. Ce moyen technique est donc nécessaire et indispensable pour le bon Fonctionnement du cycle de fabrication. Dans un atelier, plusieurs types de ressources sont distingués :

- **Les ressources renouvelables** : qui après avoir été allouées à une tâche, redeviennent disponibles et qui peuvent être réutilisées (machines, personnel, etc.).
- **Les ressources consommables** : qui après avoir été allouées à une tâche, ne sont plus disponibles, et sont donc épuisées (argent, matières premières, etc.).
- **Les ressources partageables** : Qui peuvent être partagées entre plusieurs tâches.

Ces ressources peuvent être classées d'une autre manière :

- ✓ **Les ressources de type disjonctif** : qui ne peuvent exécuter qu'une opération ou une tâche à la fois,
- ✓ **Les ressources de type cumulatif** : qui peuvent exécuter plusieurs opérations simultanément.

1.2.9. Utilisation

Défini comme de temps de fraction pendant laquelle une station n'est pas inactive. L'utilisation est égale au taux d'arrivées divisé par le taux effectif de départ.

1.2.10. Temps d'attente

C'est le temps, pendant lequel un produit ou un lot de produit reste près d'une station de travail avant d'être transféré aux stations suivantes.

1.2.11. Temps de déplacement

Le temps que les travaux d'un système de production passent à être déplacés d'une station du système de production à la station suivante, y compris le temps d'attente pour se déplacer. Cette définition du temps de déplacement suppose qu'une ressource est toujours disponible pour déplacer le travail (c'est-à-dire sans contrainte de capacité).

1.2.12. Flexibilité

La flexibilité est la capacité d'un système à répondre aux changements de l'environnement.[2]

1.2.13. Capacité (Cp)

La capacité est le nombre de pièces produites par unité de temps (Pièces/Unité) dans une station ou une ligne.

1.2.14. Stock matière première (RMI)

Le stock de matières premières signifie les matériaux qui n'ont pas encore été utilisés dans les encours critique ou dans la production de produits finis.[5]

1.2.15. Stock des produits finis (Finished Goods Inventory - FGI)

Le FGI est le matériel stocké à la fin de la production pour l'expédition au client.[5]

1.2.16. Stock de fin de chaine (Crib Inventory)

Produits stockés en bout de chaine.[5]

1.2.17. Stock Total

Stocks dans tout le système RMI + WIP + FGI + Crib inventory.[5]

1.2.18. Encours Critiques constants (Constant Work In Process - CONWIP)

Le CONWIP (Constant Work In Process) est une méthode de gestion de production en flux tiré et à encours constant.

Le Conwip est utilisé pour réduire et maîtriser les délais de fabrication et pour mieux respecter les dates clients.

1.2.19. Inventaire

L'accumulation d'entités qui se produit n'importe où dans et/ou entre les processus (flow). L'inventaire entre deux ou plusieurs flow est appelé stock tandis que l'inventaire au sein d'un flux est appelé travail en cours ou WIP.[5]

1.2.20. Rotation des stocks / taux de rotation

Le taux de rotation défini comme étant rapport entre la productivité et le stock moyen. Habituellement, la productivité est exprimée en termes de valeur annuelle, de sorte que ce rapport représente le nombre moyen de fois où le stock est réapprovisionné ou renouvelé. Le type exact d'inventaire qui est inclus dépend de ce qui est mesuré.

1.3. Classification des ateliers de production

Les différents types possibles sont les suivants :

1.3.1. Atelier Flow shop

Dans ce type d'atelier, les machines sont disposées en série et les jobs à réaliser sont composés de plusieurs opérations et visitent toutes les machines selon une gamme opératoire unique.

Toutes les opérations de tous les jobs passent par les machines dans le même ordre (flux unidirectionnel) toutes les files d'attente des machines opèrent selon la règle FIFO (First In First Out)

- ✓ Chaque job passe par toutes les machines.
- ✓ Le routage est identique pour tous les jobs.

Dans ce type d'atelier (Figure 1.1), on dispose de n pièces qui doivent s'exécuter suivant le même ordre sur les m machines qui composent l'atelier.

Ce type de problème sera détaillé dans le chapitre 2.

Tache en attente

Tache finies

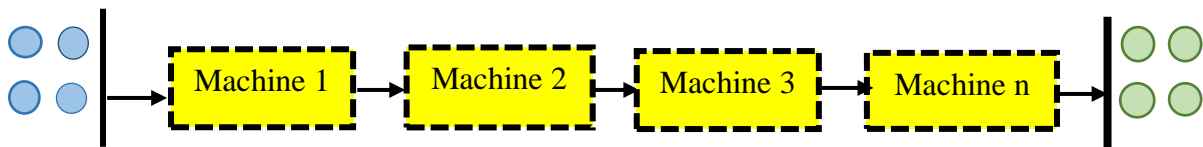


Figure 0.1 : Atelier à Cheminement Unique (flow-shop)

1.3.2. Atelier Job-shop

Les job-shop sont des unités de fabrication qui traitent une variété de produits individuels dont la production nécessite différents types de machines dans différentes séquences. L'une des caractéristiques d'un job-shop est que la demande pour un produit particulier est généralement de petite à moyenne taille. Une autre caractéristique est la variabilité des opérations et la gamme de produits en constante évolution. Ainsi, il est essentiel que le système soit de nature flexible. En général, la flexibilité est la capacité d'un système à répondre aux changements de l'environnement.[3]

La (figure 1.2) suivante montre un exemple d'atelier job-shop avec deux tâches et quatre machines

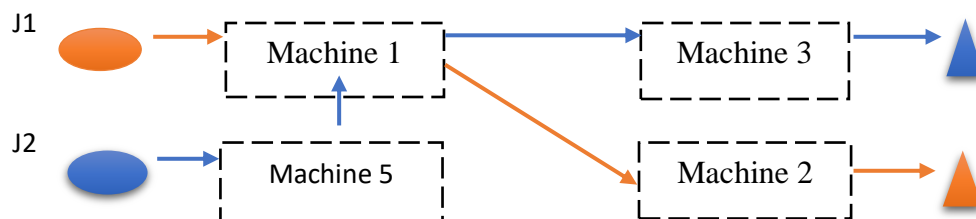


Figure 0.2 : Atelier à Cheminement Multiple (job-shop)

1.3.2.1. Types d'atelier

Nous allons déterminer deux types du problème job shop :

1.3.2.1.1. Job shop classique

Le problème de job shop constitue l'un des problèmes les plus étudiés, les variations autour du problème de job shop sont nombreuses et il n'est pas possible de trouver une formulation unique de celui-ci. Nous présentons ici la formulation la plus générale possible du problème de job shop simple.

Le problème de type job shop consiste à réaliser un ensemble de n jobs sur un ensemble de m machines. En cherchant d'atteindre certains objectifs. Chaque job J_i est composé d'une suite d'opérations O_i devant être exécutées sur les différentes machines selon un ordre préalablement défini.

Par ailleurs, un ensemble de contraintes concernant les machines et les tâches souvent existées, comme :

- ❖ Les machines sont indépendantes les unes des autres.
- ❖ Une machine ne peut exécuter qu'une seule opération à la fois à un instant donné.
- ❖ Les machines sont disponibles pendant toute la durée de l'ordonnancement.
- ❖ Les jobs sont indépendants les uns des autres. En particulier, il n'existe aucun ordre de priorité attaché aux jobs.

1.3.2.1.2. Job shop flexible

Le job shop flexible est une extension du modèle job shop classique. Sa particularité essentielle réside dans le fait que chaque opération peut être exécutée sur plusieurs machines. Dans ce modèle, les machines qui effectuent la même opération sont groupées dans un même étage. Il s'ensuit qu'il offre plus de flexibilité par rapport au job shop classique grâce à la polyvalence de ces machines. Toutefois, cela induit une complexité supplémentaire due à la nécessité de la détermination des affectations adéquates avant d'établir l'ordre de passage des différentes opérations sur les machines. Un exemple de ce problème à m étage et trois machines maximums par étage, est donné dans la (Figure 1.3).

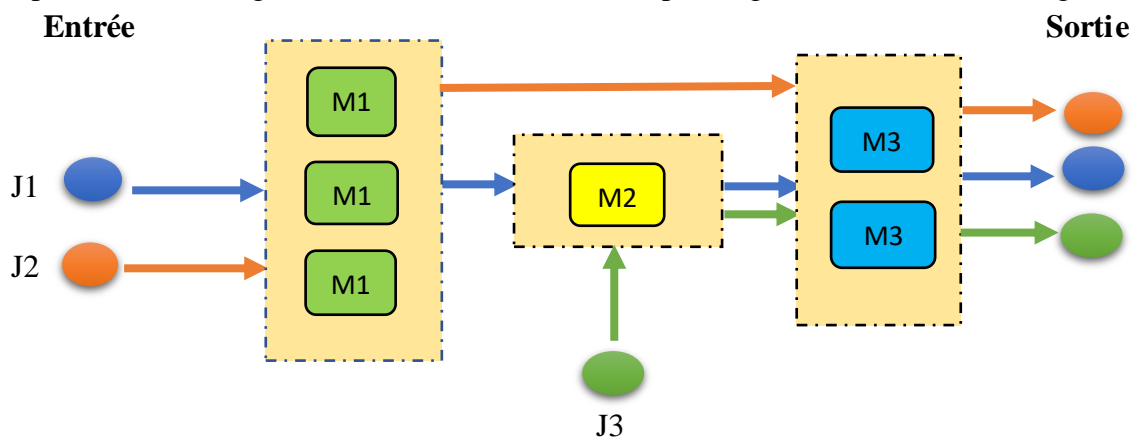


Figure 0.3 : Schéma d'un atelier Job-shop flexible à deux étages

1.3.3. Atelier Open Shop

Dans ce cas, chaque tâche passe par toutes les machines, mais les temps d'opérations peuvent être nuls sur certaines machines. Il n'y a aucune restriction sur le routage. Il appartient au développeur de planification de définir le routage pour chaque tâche.

Tache finis

Tache en attente

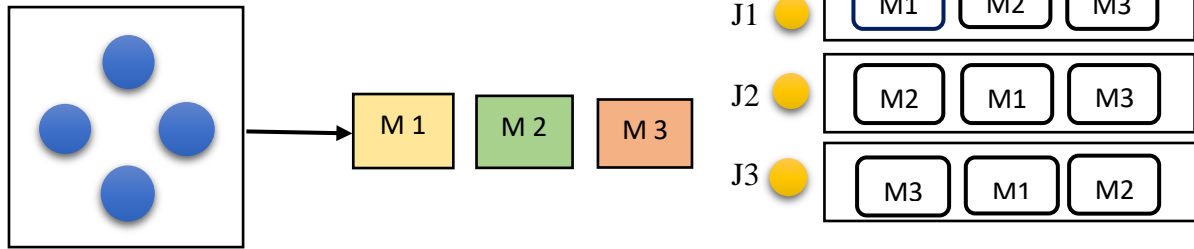


Figure 0.4 : Modèle Open shop

1.3.4. Atelier a ressource parallèle

Dans ce cas, nous disposons d'un ensemble de machines identiques pour effectuer le travail. Les travaux consistent en un processus et le travail nécessite une machine. L'ordonnancement s'effectue en deux temps : le premier temps consiste à allouer le travail aux machines et le second temps consiste à déterminer la séquence d'exécution sur chaque machine.

Si tous les équipements ont la même vitesse d'exécution des tâches, les équipements sont dits "identiques" et le problème (P_m) est observé.

Si les machines diffèrent par la vitesse d'exécution et que la vitesse de chaque machine est constante et ne dépend pas de l'ensemble des tâches, alors elle est dite "uniforme" (O_m).

Si les vitesses d'exécution des machines dépendent des tâches et sont différentes, elle est dite "quelconque" ou différente (R_m).

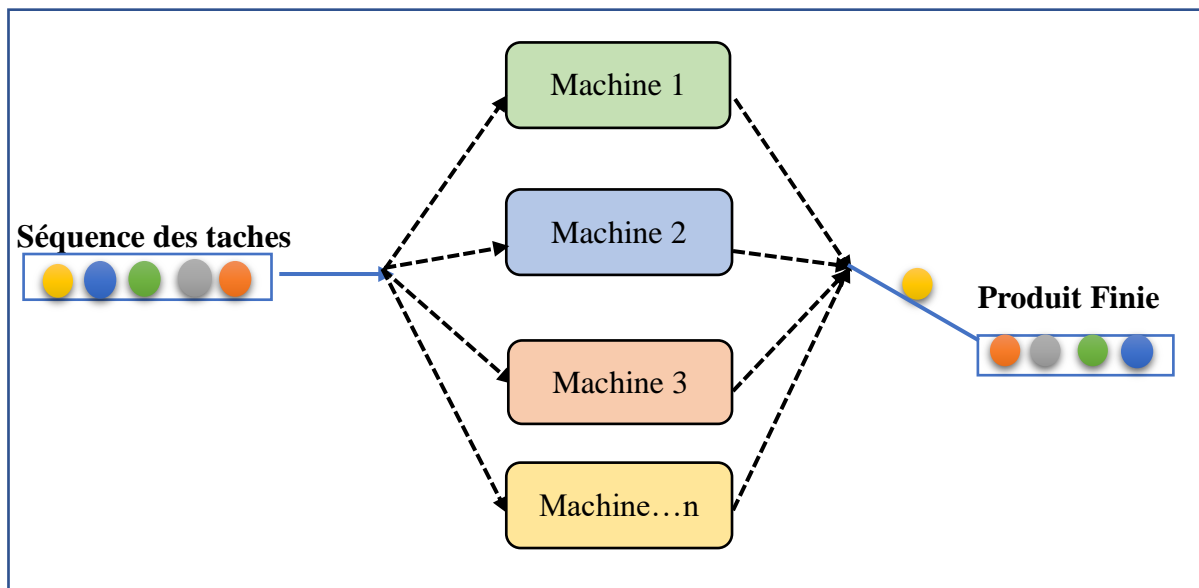


Figure 0.5 : Problèmes à machines parallèles

1.4. Avantage et inconvénient de chaque type

Tableau 1.1: Avantages et inconvénients de chaque atelier

	Avantages	Inconvénient
Job-shop	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Affectation unique : une et une seule machine est affectée à chaque opération. En d'autres termes, une opération ne peut être réalisée sur deux machines différentes. ✓ Grande flexibilité dans l'ingénierie des produits. ✓ Flexibilité d'expansion élevée (les machines sont facilement ajoutées ou remplacées). ✓ Élasticité élevée du volume de production (due à de faibles augmentations de la capacité de production). ✓ Faible obsolescence (les machines sont généralement polyvalentes). ✓ Grande robustesse aux pannes de machines 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Ordonnancement difficile en raison de la grande variabilité des produits et du flux de production tordu. ✓ Faible utilisation de la capacité : chaque machine ne peut traiter qu'une opération à la fois. ✓ Non préemption : les opérations ne peuvent être interrompues.
Flow-Shop	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Une grande productivité ✓ Facilité d'automatisation ✓ Meilleure utilisation des machines ✓ Les opérateurs développent des compétences et des connaissances élevées ✓ Facilité de mesure - Plusieurs indicateurs de performance clés (KPI) pour la fabrication sont conçus pour flow shop. ✓ Facilité d'optimisation - En raison de la facilité de mise à l'échelle, il est également facile d'identifier les étapes du processus qui doivent être améliorées et il existe des solutions claires pour gérer les étapes non optimisées 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Plus de travail initial La création d'un Flow Shop demande initialement beaucoup de travail. L'investissement est également élevé en raison de la nécessité d'avoir une machine pour chaque processus. ✓ C'est difficile à mettre à l'échelle - imaginez que vous commencez à recevoir de grosses commandes d'un client. Avec un flow shop, il peut être difficile de se développer à court terme. Vous devrez peut-être investir dans une toute

	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Une planification précise est indispensable afin de séquencer les besoins de chaque produit, les aptitudes de chaque pôle de travail et les ordres de priorité.[4]. ✓ Une plus grande flexibilité 	<p>nouvelle chaîne de production, ce qui est risqué si les commandes des clients chutent à nouveau soudainement.</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Coût de production élevé. ✓ Coût élevé de la gestion des matériaux ✓ Planification compliquée
Machine parallèle	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Avoir plusieurs machines parallèles effectue la même tâche pour réduire le temps de production. ✓ Il se caractérise par une production continue, la fluidité de son processus et l'élimination du stockage. ✓ Non limité théoriquement en nombre de processeurs => grande puissance de calcul. ✓ Partage transparent des ressources. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Dans le cas du processus d'assemblage industriel, par exemple, une des étapes d'assemblage nécessite beaucoup de temps. ✓ Mauvais équilibrage des charges. ✓ Efficacité limitée.
Open-shop	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Ces ateliers généralement est moins contraint que celui de type flow-shop ou de type job shop pour réaliser des opérations sur les produits. ✓ L'ordre des opérations n'est pas fixé a priori. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Le problème consiste, d'une part, à déterminer le cheminement de chaque produit. ✓ Comparé aux autres modèles d'ateliers, l'open shop n'est utilisé pas facilement dans les entreprises.

1.5. Mesure des performances

La gestion de la performance est le processus de mesure des progrès vers la réalisation des buts et objectifs clés afin d'améliorer la performance individuelle, de groupe ou organisationnelle. La gestion de la performance englobe l'établissement de stratégies, l'établissement d'objectifs, la planification, les prévisions et les techniques de modélisation. La performance est liée à deux termes :

1.5.1. Taux de production (débit)

Le rendement moyen d'un processus de production (machine, station de travail, ligne, usine) par unité de temps (par exemple, pièces par heure) est défini comme le taux de

production du système. Le débit est lié au temps de cycle (CT) et aux encours critique (WIP) par la loi de Little.

1.5.2. Temps de cycle (CT)

Le temps de cycle CT est le temps entre l'entrée d'une tâche dans le système et sa sortie. Le temps de cycle (CT) est lié au débit (TH) et aux encours critique (WIP) par la loi de Little.

1.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié toutes les différentes définitions, paramètres et mesures de performance qui ont été mis en place dans les ateliers et plus particulièrement dans ce projet. Ce positionnement thématique centré sur le système de production nous permettra dans les chapitres suivants, de réaliser d'abord, une analyse du système de production et des problèmes actuels et de proposer ensuite, des améliorations nous estimons capables de nous faire parvenir aux objectifs fixés.

CHAPITRE 02 : Principe de la Physique des Usines

2.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous nous concentrons sur le problème d'un système flow shop basé sur la physique des usines (Factory physics) qui est une série de processus et d'étapes à travers lesquels les entités passent en séquence. Au niveau d'un atelier flow Shop, les paramètres de performances liés à la performance globale du système sont le débit, le temps de cycle et les encours critiques (WIP) de chaque job.

Comprendre les relations entre ces métriques et le comportement de l'atelier basé sur la variabilité est la partie la plus importante de l'amélioration des performances d'un atelier flow-shop. Le système peut fonctionner complètement différemment dans différentes conditions. En comparant les performances du système dans l'état actuel avec celles dans les états théoriquement possibles, nous pouvons alors déduire des conclusions sur le comportement et la qualité du système flow-shop.

2.1.1. Physique des usines

La physique des usines fournit une description systématique exprimée sous forme de lois. Il aide à décider quelles mesures de performance collecter et quelles alternatives évaluer, ainsi que dans l'interprétation des résultats de simulation.[4]

2.2. Etat de l'art

À première vue, il peut sembler paradoxal d'utiliser une approche de physique des usines pour modéliser la dynamique des systèmes. L'approche de la physique des usines, présentée dans les chapitres (7 et 8) de livre Factory physics écrit par Wallace Hopp et Mark Spearman, est basée sur l'analyse du système de production à long terme, ayant atteint l'état dit stationnaire. D'autre part, la dynamique des systèmes met l'accent sur le comportement dynamique des systèmes complexes qui ne sont pas équilibrés [6]. Cependant, pour les besoins de ce travail, les équations apparaissent dans une approche de physique des usines qui est unique en fournissant une modélisation mathématique systématique du comportement du système de production, qui est capable de mesurer l'effet des valeurs moyennes et des écarts-types des paramètres clés d'un système de production (tels que les temps de configuration, le temps de réparation et le taux de défauts, entre autres) sur les mesures de performance du système, telles que nombre de job encours (WIP) et l'utilisation des ressources. Afin que les approches puissent être utilisées ensemble, et donc, que les équations de la physique des usines puissent être utilisées pour modéliser la dynamique du système, dans ce travail ils supposent que le temps de cycle qui forme la base de la dynamique du système développé est long, correspondant à des périodes de quelques mois (dans notre cas, cette valeur est de 3 mois). Cette hypothèse est raisonnable dans le contexte de ce travail, car il faut généralement un certain temps pour qu'une possibilité

d'amélioration soit identifiée, mise en œuvre et que des résultats soient obtenus. On suppose également que pendant chaque période de temps, le système est en équilibre (de cette façon, les équations de la physique de l'usine peuvent être utilisées). Cette hypothèse sur de longues durées permet également d'ignorer le comportement transitoire du système aux frontières entre périodes.

Selon la définition de Factory physics, la variance est "une propriété non uniforme d'un ensemble d'éléments". Selon ces auteurs, un écart important conduit toujours à une dégradation des performances du système de production (en termes de stock, de capacité et de temps). En ce sens, une faible productivité des processus (productivité), des délais d'exécution élevés, un potentiel de gaspillage. Les politiques d'amélioration continue sont modélisées comme des réductions des valeurs moyennes et de la variance, par rapport aux paramètres considérés : la variation du taux d'arrivée des commandes dans le système ; Variabilité des processus - qui se compose de trois autres types de variabilité : la variabilité naturelle des processus, la variabilité du temps de réparation des machines et la variabilité du temps de réglage ; qualité : il s'agit ici de réduire le taux moyen de défauts de process ; temps moyen entre les pannes de machine ; temps moyen de réparation des machines ; et le temps moyen d'installation de l'appareil. À chaque période, de nouvelles valeurs de paramètres sont calculées sur la base des améliorations mises en œuvre au cours de la période précédente et des équations de physique d'usine sont utilisées pour publier les effets des améliorations sur les métriques de performance du système étudié .Le modèle développé par Wallace Hopp et Mark Spearman 2000 suppose également un comportement déterministe des variables, ce qui indique que l'approche déterministe est suffisante pour saisir les principales relations d'intérêt dans une étude. Il est intéressant de noter que malgré cette hypothèse, les effets du hasard dans le système sont capturés par les variances des paramètres étudiés, qui sont inclus dans les équations de l'approche de la Factory physics [6] .PENTILLÄ, M. J.2005, l'approche de la physique des usines a établi un ensemble de lois pour expliquer le comportement et la relation entre les variables dans l'usine, fournissant des outils pour analyser les processus existants, pour concevoir des efforts d'amélioration possibles et pour analyser les compromis[7].

Hopp et Spearman (1996) ont donné une bonne explication des compromis de variabilité basés sur les approximations de Kingman. Ils ont également introduit des modèles approximatifs pour de nombreuses situations pratiques dans les systèmes de fabrication, tels que les lots de transfert, les lots de traitement et les systèmes CONWIP. [8]

STANDRIDGE, C. R.2004.Affirme que l'approche de la physique des usines fournit une description systématique, exprimée par certaines lois, du comportement fondamental du système [9]. STANDRIDGE souligne également que cette approche a le potentiel de contribuer à l'investigation d'études utilisant la simulation. En raison de sa capacité à expliquer le comportement des systèmes de fabrication, l'approche de la physique des usines peut également être utilisée comme outil d'apprentissage dans le domaine de la gestion des opérations d'évaluation des performances d'un atelier « job-shop » basé sur des concepts de la physique des usines. Hopp, W. J., and M. L. Roof. 1998présentent

comment la physique des usines peut être utilisée dans un nouveau paradigme éducatif pour le domaine de la gestion de la production et des opérations [10].

2.3. Paramètres

Pour déterminer les trois courbes du meilleur cas, pire cas et pire cas pratique, nous allons déterminer trois paramètres : r_b , T_0 et W_0

2.3.1. Taux de production de la machine goulot : r_b (Débit goulot)

C'est la machine avec l'utilisation la plus élevée et avec un taux de production réduit.

2.3.2. Temps de traitement brut (T_0)

Le temps de traitement brut est la somme des temps d'opération moyens de chaque station de travail (minimum temps de cycle CT)

2.3.3. Encours Critiques (W_0)

L'encours Critique est un niveau d'encours où une chaîne atteint le taux de production maximum (maximum r_b) avec un temps de cycle minimum (T_0).

$$W_0 = r_b \times T_0 \quad (2.1)$$

2.4. Coefficient de congestion

Le Coefficient de congestion de la variabilité (α) est un coefficient sans unité qui mesure la congestion de la ligne.

Le tableau suivant montre les différentes valeurs de α dans les trois cas du système.

Tableau 2.1 : Coefficient de congestion

Comportement du système	Valeur de α
Cas idéal (variabilité nulle)	0
Pire cas pratique	1
Le pire cas possible	W_0

Note : sera utilisé pour montrer que des chaînes avec les mêmes r_b et T_0 peuvent se comporter différemment.

2.5. Loi de Little

La loi de Little est la relation qui lie le temps de cycle, les encours et le débit d'un système. Elle est utilisée dans la gestion des files d'attente.[11] La relation s'écrit :

$$WIP = CT \times TH$$

Où (2.2)

$$TH = \frac{WIP}{CT}$$

2.6. Formulation mathématique

Dans cette partie nous allons présenter les trois cas existants pour étudier les performances d'un système :

2.6.1. Performance du meilleur cas « Best Case »

La performance du meilleur cas signifie l'état où le système atteint un temps de cycle minimum (CT_{Best}) et le débit maximum (TH_{best}) pour un niveau WIP donné [6] :

$$CT_{Best}(w) = \begin{cases} T_0 & w < W_0 \\ \frac{w}{r_b} & \text{si non} \end{cases}, TH_{Best}(w) = \begin{cases} \frac{w}{T_0} & w < W_0 \\ r_b & \text{si non} \end{cases} \quad (2.3)$$

Exemple : $r_b = 0.5$ et $T_0 = 8$, $W_0 = 0.5 \times 8 = 4$

$$CT_{Best}(w) = \begin{cases} 8 & w < 4 \\ \frac{w}{0.5} & \text{si non} \end{cases}, TH_{Best}(w) = \begin{cases} \frac{w}{8} & w < 4 \\ 0.5 & \text{si non} \end{cases}$$

La figure (2.2) représente le tracé du temps de cycle CT en fonction d'encours WIP et la figure (2.3) représente le tracé du taux de production TH en fonction d'encours WIP dans le meilleur cas de performance :

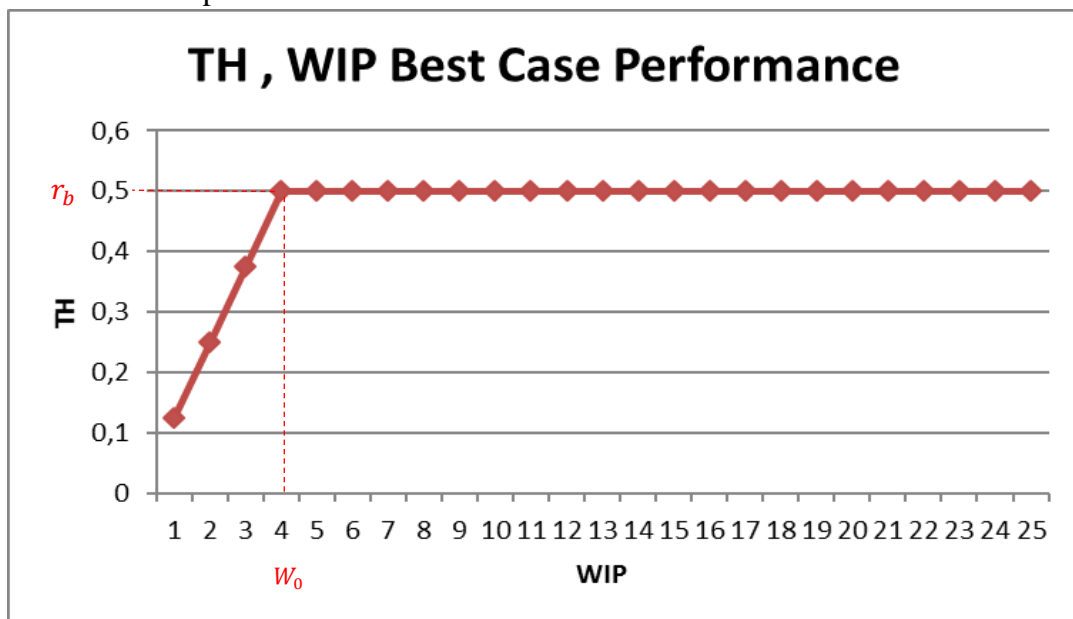


Figure 0.1 : Graphe TH en fonction de WIP (Best Case)

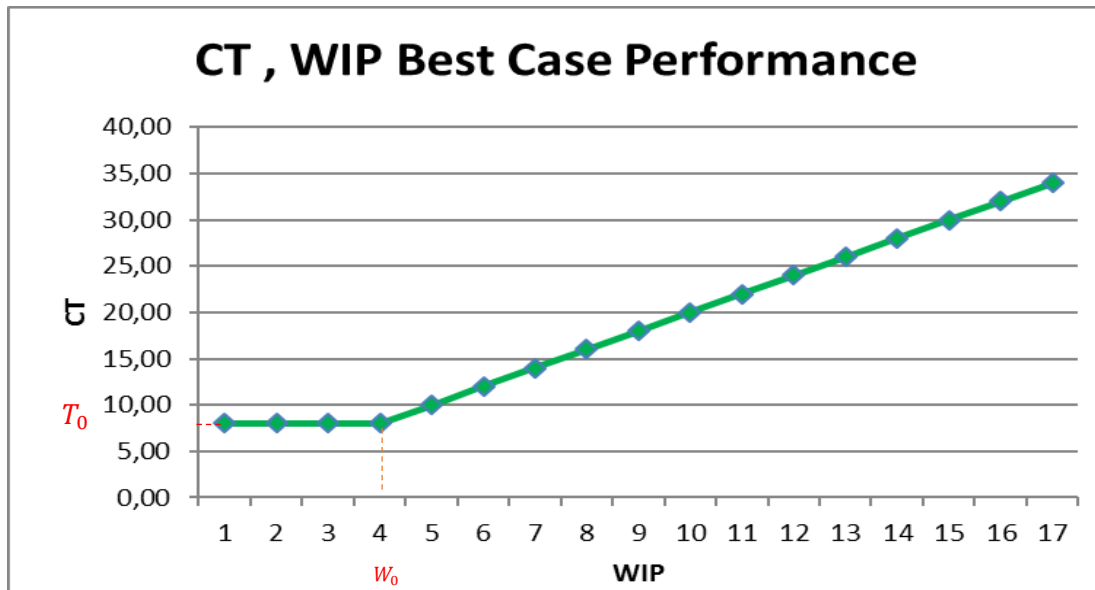


Figure 2.2 : Graphe CT en fonction de WIP (Best Case)

Ces graphiques (2.4 et 2.3) montrent que le taux de production a atteint sa valeur maximale (maximum de r_b) avec un temps de cycle minimum (T_0)

2.6.2. Performance du pire cas possible « Worst Case »

C'est l'état dans lequel le système atteint un temps de cycle maximum (CT_{worst}) et le taux de production minimum (TH_{worst}) pour un niveau WIP donné [6] :

$$CT_{\text{worst}}(w) = w \times T_0 \quad (2.4)$$

$$TH_{\text{worst}}(w) = \frac{1}{T_0} \quad (2.5)$$

Exemple : $r_b = 0.5$ et $T_0 = 8$, $W_0 = 0.5 \times 8 = 4$.

$$CT_{\text{worst}}(W) = w \times T_0 = w \times 8 ; TH_{\text{worst}}(W) = \frac{1}{T_0} = \frac{1}{8}.$$

Les résultats obtenus nous permettent de tracer les courbes suivants tel que :

La figure (2.4) représente le tracé du temps de cycle CT en fonction du WIP et la figure (2.5) représente le TH en fonction du WIP.

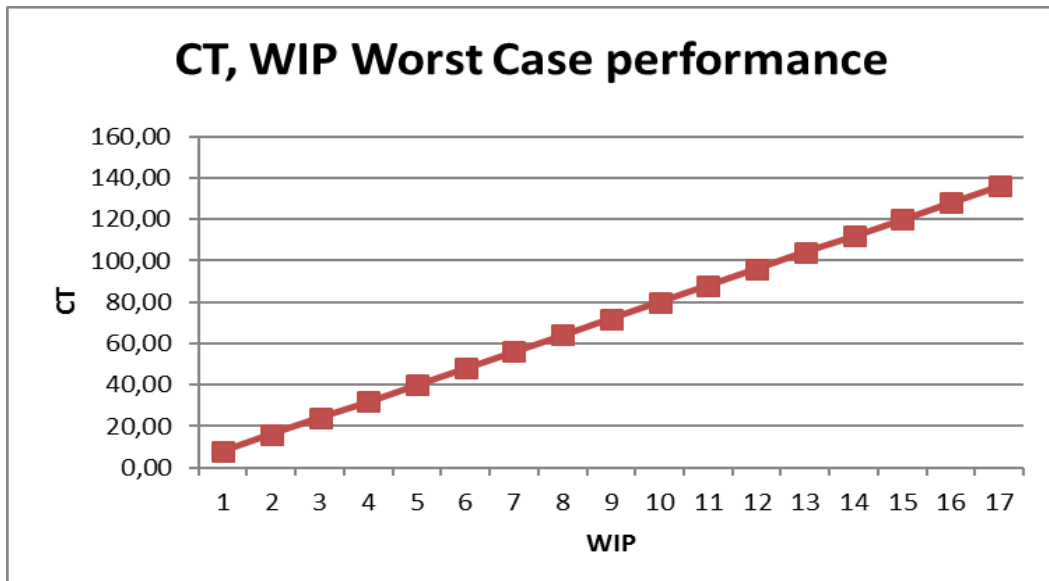


Figure 0.3 : Graphe CT en fonction de WIP (Worst Case)

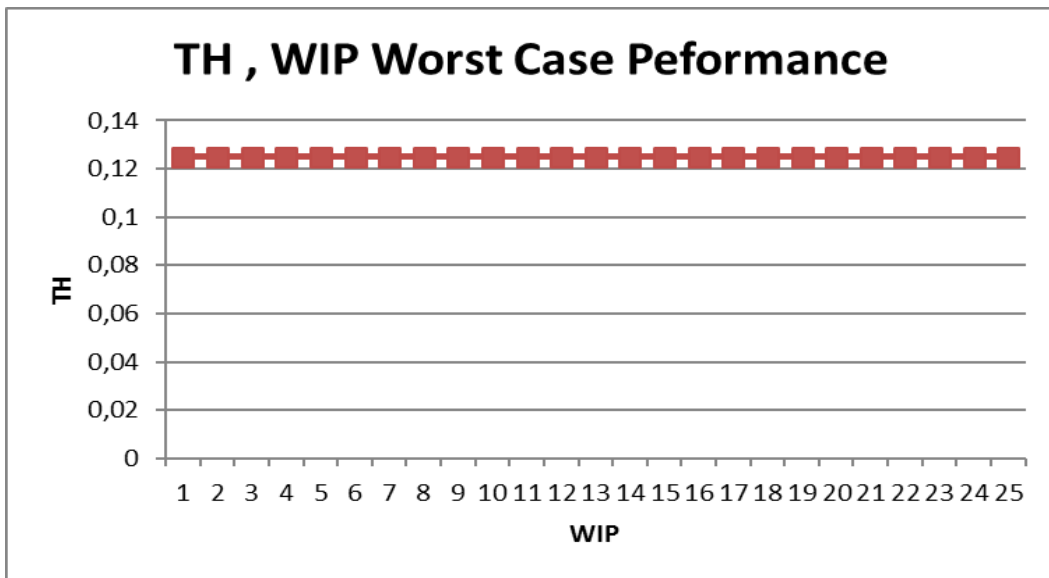


Figure 0.4 : Graphe TH en fonction de WIP (Worst Case)

Ces graphiques (2.4 et 2.5) montrent que le système est dans le pire des cas, car le système est dans le temps de cycle maximum avec un taux de production minimum et stable.

2.6.3. Performance du pire cas pratique « Pratical Worst Case (PWC) »

C'est un écart énorme entre la meilleure et la pire performance.

Ces extrêmes théoriques ne sont pas très pratiques pour évaluer les performances réelles du système car la plupart des systèmes ont une performance de cas pratique. Par conséquent, nous avons besoin d'un point de comparaison plus réaliste [6][3] :

$$CT_{PWC}(w) = T_0 + \frac{w-1}{w} \tag{2.6}$$

$$TH_{PWC}(w) = \frac{w}{w_0+w-1} \times r_b \tag{2.7}$$

Exemple : $r_b = 0.5$, $T_0 = 8$, $W_0 = 0.5 \times 8 = 4$.

$$CT_{PWC}(w) = 8 + \frac{w-1}{w} \quad , \quad TH_{PWC}(w) = \frac{w}{4+w-1} \times 0.5$$

Les résultats obtenus permettent de tracer les courbes suivantes tel que :
 La figure (2.6) représente le TH en fonction du WIP dans le pire cas pratique :

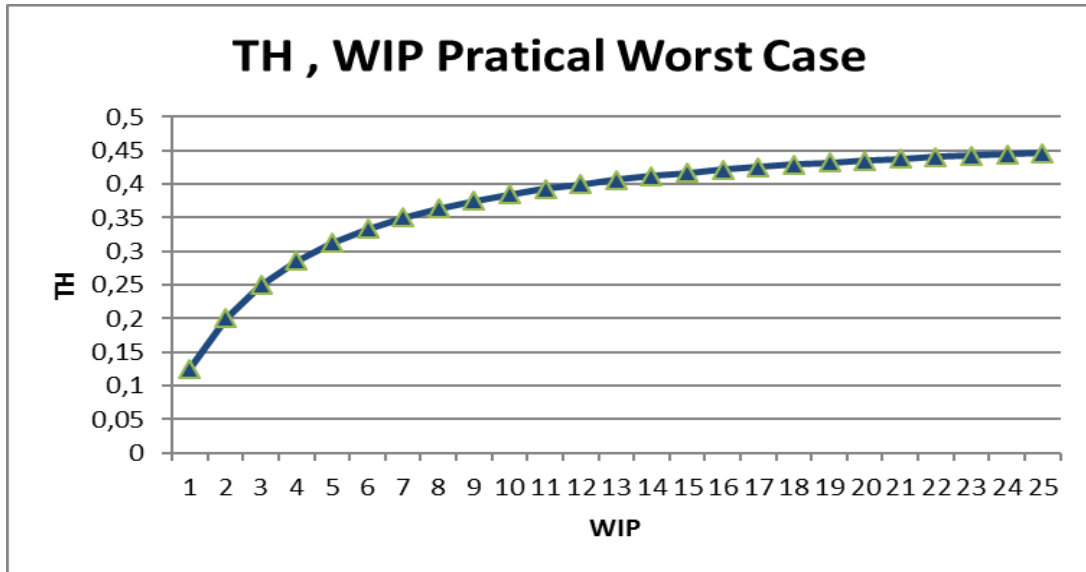


Figure 2.5 : Graphe TH en fonction de WIP (Pratical Worst Case)

La figure (2.7) représente le CT en fonction du WIP dans le pire cas pratique :

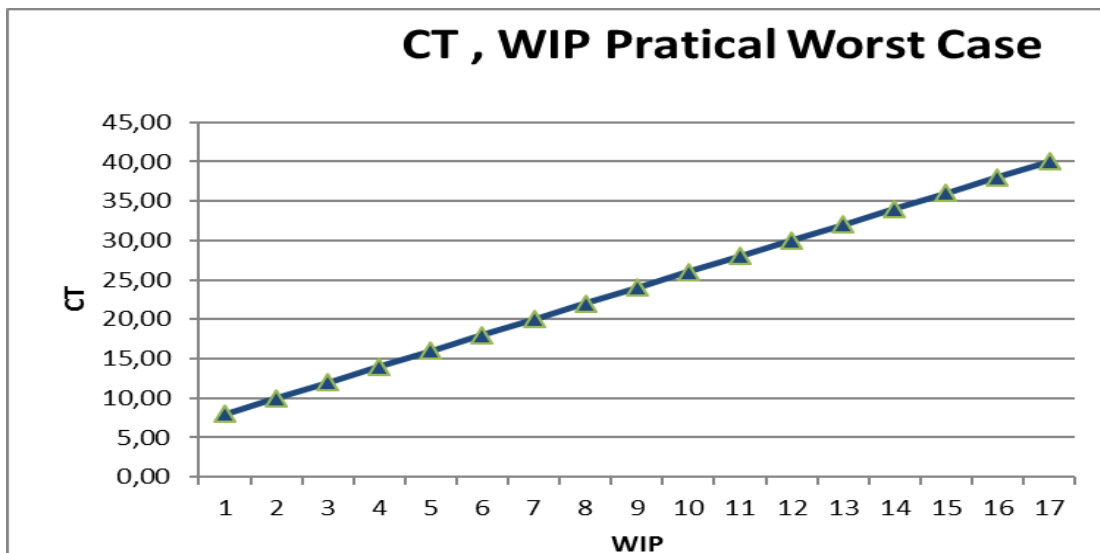


Figure 0.6 : Graphe CT en fonction de WIP (Pratical Worst Case)

Ces graphes (2.6 et 2.7) expriment l'état général de ce système qui est interprété comme une limite entre les performances du meilleur cas et le pire cas possibles.

2.7. Evaluation interne

Nous avons maintenant les outils pour évaluer les performances d'une ligne de production. L'idée de base est d'étudier les performances des meilleurs cas, des pires cas et des pires cas pratique (PWC).

Pour montrer comment cela fonctionne dans la pratique, nous proposons un exemple suivant :

Soit un atelier qui compose de quatre machines identiques en série tel que :

1. $T_0 = 5.14$ heures,
2. $W_0 = 6,7848$ pièces
3. $r_b = 1,32$ pièces/heures.

2.7.1. Meilleurs cas :

Dans ce cas-là on va analyser et comprendre le comportement d'une ligne dans les meilleures performances des cas possibles, c'est-à-dire lorsque les temps de traitement sont absolument réguliers. (Chaîne équilibrée)

La figure (2.8) représente la ligne de production avec une seule première pièce (WIP=1) :

WIP == 1

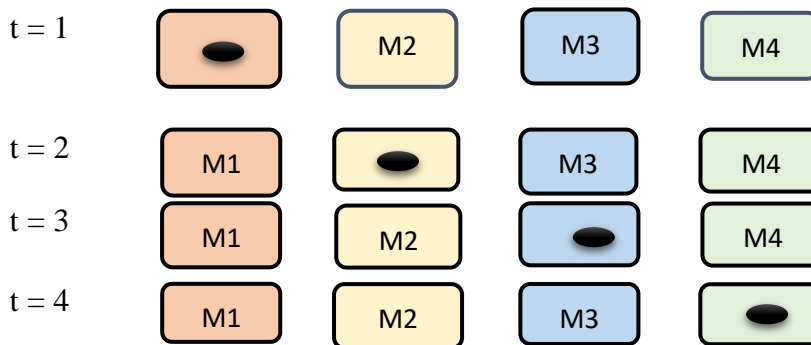


Figure 0.7 : Cas WIP= 1

Résultat obtenu :

- ✓ Le temps de traitement par station de la première pièce est égal à 1.285 heures et le temps total de production est égal 5.14 heures.
- ✓ Le taux de production est donc égale à : $\frac{1}{5.14} = 0.1945$ Pièce/heure.

WIP == 2

Nous ajoutons une deuxième pièce au système :

- ✓ La deuxième partie du traitement commence à la station 1 après que la première partie a quitté la station.
- ✓ Le taux de production égale à $\frac{2}{5.14} = 0.3891$ Pièce/heure.

La figure (2.9) représente la ligne de production avec deux pièces dans le système (WIP=2) :

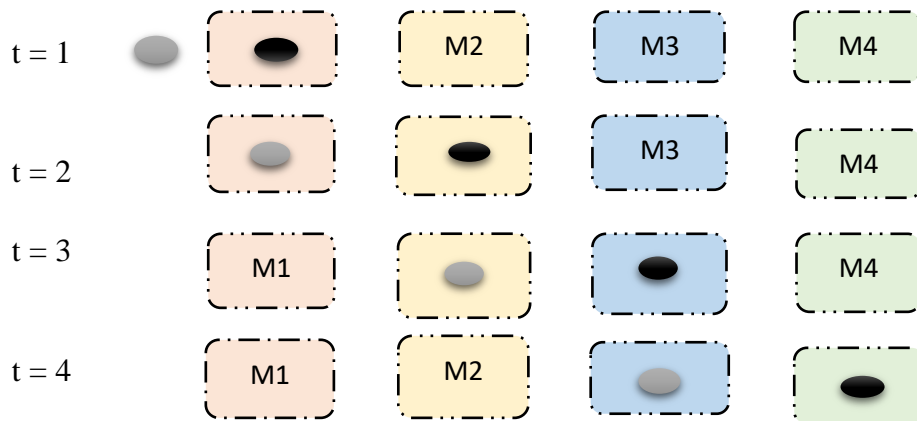


Figure 0.8 : Cas WIP= 2

WIP == 3

Nous ajoutons une troisième pièce :

- ✓ Il n'y a pas de file d'attente pour les pièces dans ce cas.
- ✓ Le temps de cycle reste à $CT = 5.14$ heures.
- ✓ Le taux de production augmente à $\frac{3}{5.14} = 0.5836$ Pièces / heures.

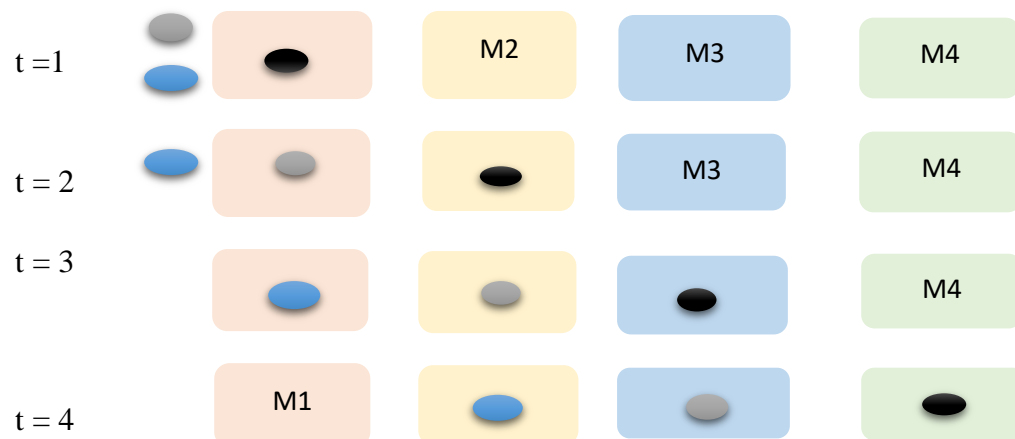


Figure 0.9 : Cas WIP= 3

WIP ==4

Lorsqu'on ajoute une quatrième pièce,

- ✓ Toutes les stations restent occupées tout le temps une fois le régime établi atteint.
- ✓ Il n'y a pas d'attente aux stations
- ✓ Le temps de production est toujours 5.14 heures.

- ✓ Le taux de production devient à $\frac{4}{5.14} = 0.7782$ pièces par heure, ce qui équivaut à la capacité de la ligne r_b .
- ✓ Le taux de production de r_b (sa valeur maximale) ne sont atteints que lorsque le niveau de WIP est fixé à niveau WIP critique, dont nous rappelons pour les pièces est :
 $W_0 = r_b \times T_0 = 1.32 \times 5.14 = 6$ pièces.

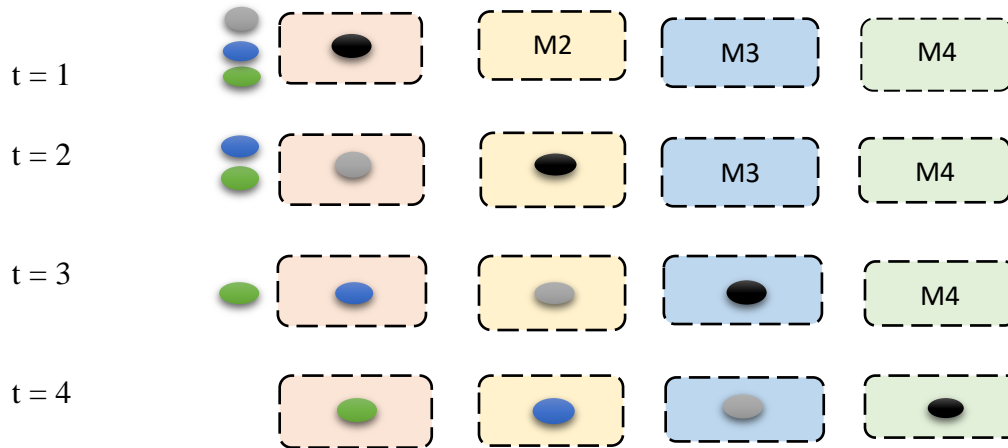


Figure 0.10 : Cas WIP= 4

WIP == 5

Maintenant, nous ajoutons une cinquième pièce à la ligne.

- ✓ Il n'y a que quatre machines.
- ✓ Une pièce attendra à la première station.
- ✓ Même après que le système se soit stabilisé. Étant donné que nous mesurons le temps de cycle comme le temps entre le moment où un travail est libéré (le moment où il entre dans la file d'attente à la première station) et le moment où il quitte la ligne.
- ✓ Temps de traitement brut $T_0 = 6.24$ heures, en raison une heure supplémentaires de temps d'attente dans devant la station 1.
- ✓ Le débit augmenté à 1.32 pièces /heurs.

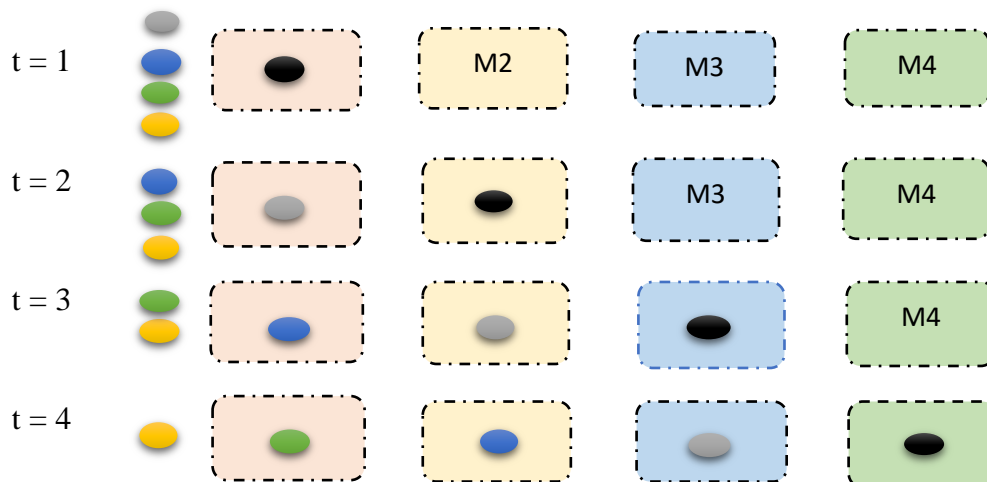


Figure 0.11 : Cas WIP= 5

Sur la base du concept décrit dans la section précédente, nous pouvons calculer CT et TH dans le meilleur cas possible.

Le tableau (2.2) montre les valeurs du temps de cycle et de TH en fonction du changement d'encours et le rapport w/rb :

Tableau 2.2 : Résultats TH et CT en fonction de WIP (Best Case Performance)

WIP	Best Case Performance		w/rb
(w)	CT_{Best(w)}	TH_{Best(w)}	
1	5.14	0,194552529	0.76
2	5.14	0,389105058	1.52
3	5.14	0,583657588	2.27
4	5.14	0,778210117	3.03
5	5.14	0,972762646	3.79
6	5.14	1,167315175	4.55
7	5.30	1.32	5.30
8	6.06	1.32	6.06
9	6.82	1.32	6.82
10	7.58	1.32	7.58
11	8.33	1.32	8.33
12	9.09	1.32	9.09
13	9.85	1.32	9.85
14	10.61	1.32	10.61
15	11.36	1.32	11.36
16	12.12	1.32	12.12
17	12.88	1.32	12.88
18	13.64	1.32	13.64
19	14.39	1.32	14.39
20	15.15	1.32	15.15
21	15.91	1.32	15.91
22	16.67	1.32	16.67
23	17.42	1.32	17.42
24	18.18	1.32	18.18
25	18.94	1.32	18.94

Les figures (2.13) et (2.14) montrent le temps de cycle et le débit en fonction des encours (Niveaux de WIP) à toutes les stations.

Pour comparer CT et TH en observant le débit, le temps de cycle et le niveau de WIP, nous pouvons déterminer que le flux de processus est bon.

On remarque que le temps de cycle est petit, ainsi que le temps de traitement, le taux de goulot et la productivité sont élevée, ce cas sera meilleur.

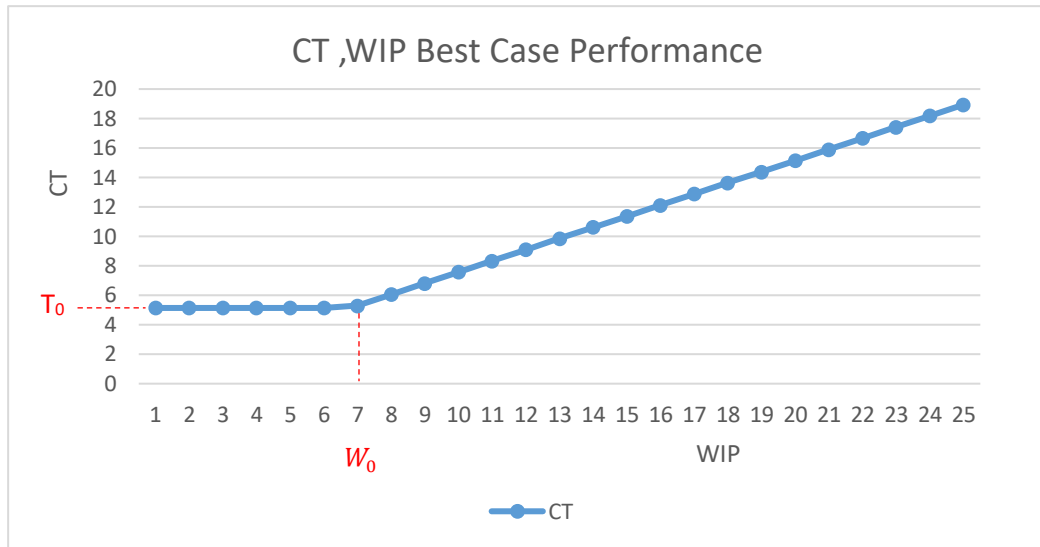


Figure 0.12 : Meilleur Cas de performance pour CT vous WIP

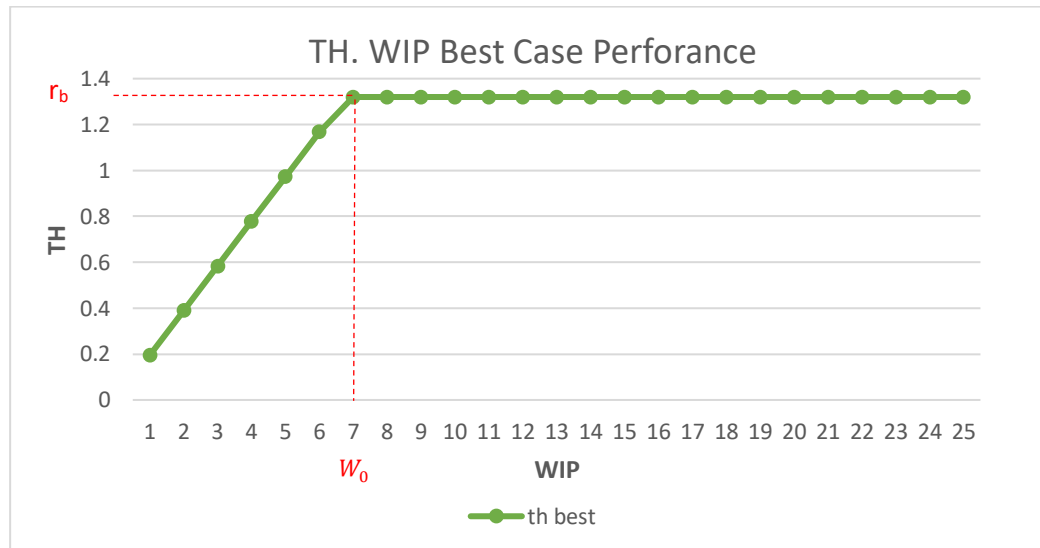


Figure 0.13 : Meilleur Cas de Performance pour TH vous WIP

2.7.2. Le pire cas possible

Nous considérons que les temps d'exécution sont identiques sur chaque station.
 Supposons qu'il y ait quatre stations avec 4 pièces (toutes les stations sont occupées) :

- ✓ Le temps de traitement moyen à chaque pièce est $\frac{5.14}{4} = 1.285$ heures.
- ✓ Le taux de goulot égal à $r_b = 1,32$ pièce /heure de chaque machine et le temps de cycle de chaque pièce égale à $CT = 5.14$ heures.
- ✓ Le temps de cycle pour ce système est :

$$CT = 5.14 + 5.14 + 5.14 + 5.14 = 20.56 \text{ heures.}$$
- ✓ Le taux de production est égal à : $\frac{4}{20.56} = \frac{1}{5.14}$ Pièces /heures.

- ✓ Le produit entre le débit et le temps de cycle (les encours critique) $W_0 = \frac{1}{5.14} \times 20.56$
 $W_0 = 4$ Pièces.

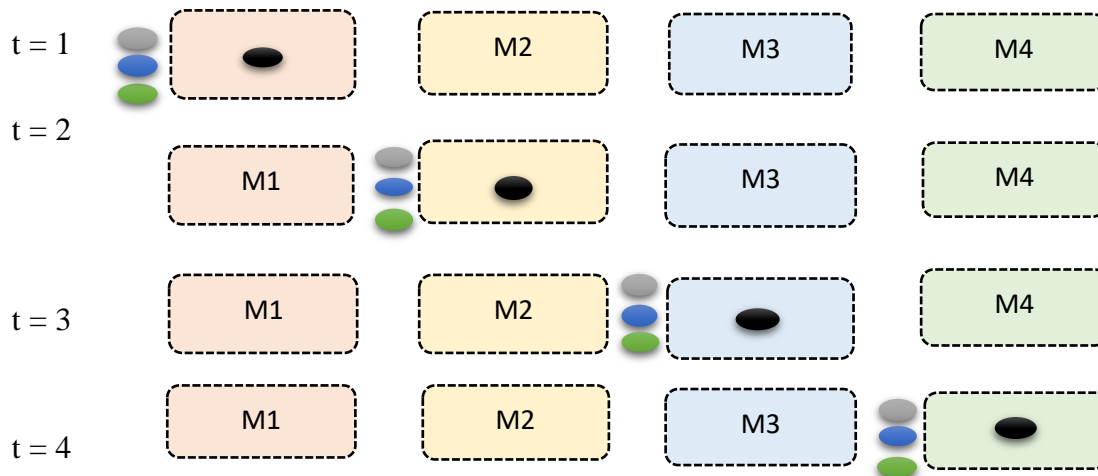


Figure 0.14 : Evolution des performances de pire cas pratique d'un flow shop

Sur la base du concept décrit dans la section précédente, nous pouvons calculer CT et TH pour condition –pire cas possible. Le calcul peut se faire simplement à l'aide d'un tableau (2.3) en changeant le niveau des travaux en cours.

Tableau 2.3 : Résultats TH et CT en fonction de WIP (Worst Case Performance)

WIP	w/r_b	Worst	Case	Performance
(w)		CT_{worst} (w)		TH_{worst}(w)
1	0.76	5.14		0,194552529
2	1.52	10.28		0,194552529
3	2.27	15.42		0,194552529
4	3.03	20.56		0,194552529
5	3.79	25.7		0,194552529
6	4.55	30.84		0,194552529
7	5.30	35.98		0,194552529
8	6.06	41.12		0,194552529
9	6.82	46.26		0,194552529
10	7.58	51.4		0,194552529
11	8.33	56.54		0,194552529
12	9.09	61.68		0,194552529
13	9.85	66.82		0,194552529
14	10.61	71.96		0,194552529
15	11.36	77.1		0,194552529
16	12.12	82.24		0,194552529
17	12.88	87.38		0,194552529
18	13.64	92.52		0,194552529
19	14.39	97.66		0,194552529
20	15.15	102.8		0,194552529
21	15.91	107.94		0,194552529
22	16.67	113.08		0,194552529
23	17.42	118.22		0,194552529
24	18.18	123.36		0,194552529
25	18.94	128.5		0,194552529

Les figures (2.16) et (2.17) montrent le temps de cycle et le débit en fonction des encours (Niveau de WIP) à toutes les stations.

Pour comparer CT et TH en observant le débit, le temps de cycle et le niveau de (WIP), nous pouvons déterminer que le flow-shop est mauvais.

Nous notons que le temps de cycle est important ainsi que le temps de traitement, le taux d'étranglement et la productivité sont minimales, cette situation sera un mauvais flow-shop. Afin d'améliorer les performances du flow-shop (c'est-à-dire passer à la "bonne" zone), nous pouvons envisager deux options différentes.

- ✓ Réduire le niveau des encours critique (WIP).
- ✓ Augmenter le taux de production (débit) TH

- ✓ Augmenter le taux de goulot d'étranglement en ajoutant des ressources (équipements ou personnes), en formant, en utilisant une main-d'œuvre flexible, en améliorant la qualité, etc.

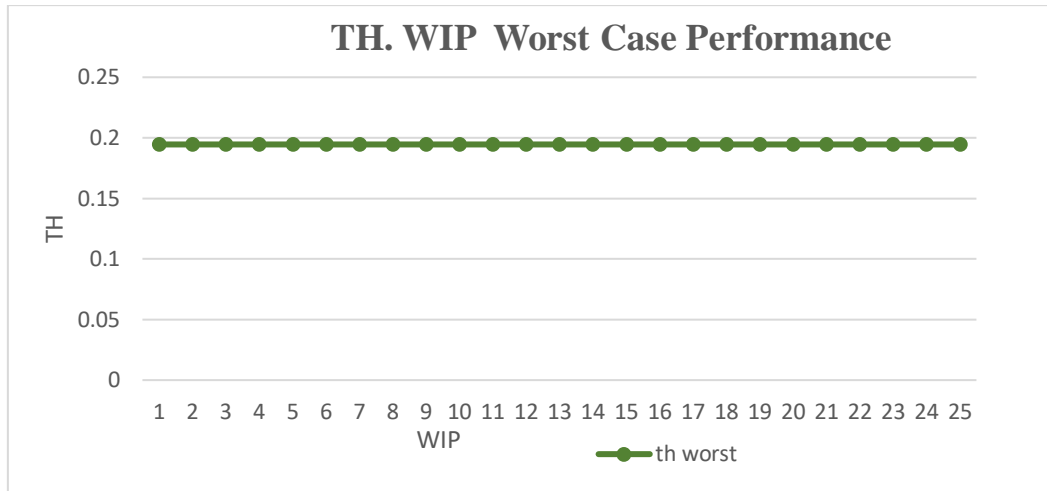


Figure 0.15 : Pire Cas Pratique de Performance pour TH en fonction de WIP

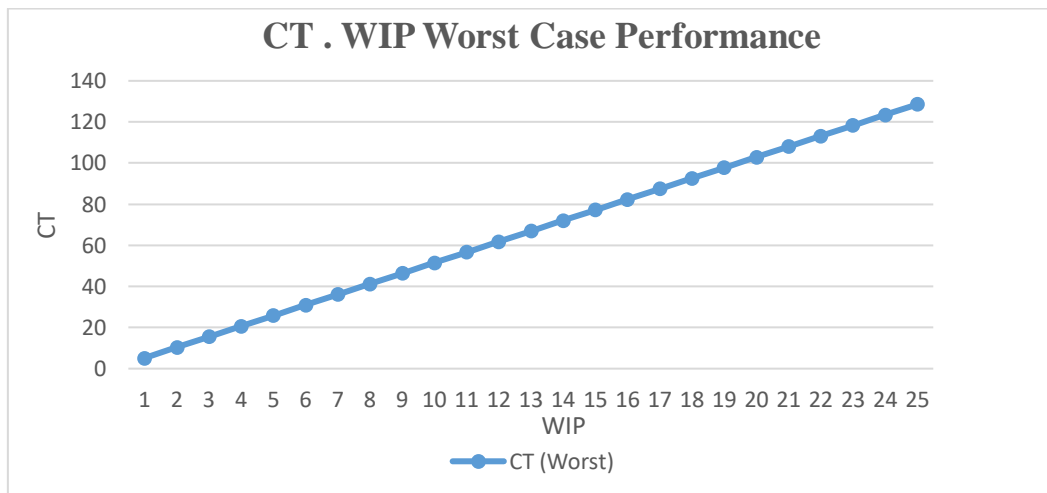


Figure 0.16 : Pire Cas Pratique de Performance pour CT en fonction WIP

2.7.3. Le pire cas pratique « PWC »

Pratiquement aucune ligne du monde réel ne se comporte littéralement selon le meilleur ou le pire des cas. Par conséquent, pour mieux comprendre le comportement entre ces deux cas extrêmes, il est instructif de considérer un cas intermédiaire.

Par conséquent, nous pouvons donner un bref exemple dans ce cas

1. Supposons que les temps de traitement sont exponentiels au lieu d'être déterministes.
2. Les temps de traitement moyens sont toujours de 1.285 heures à chaque station.
3. Supposons que les stations 3 et 4 soient regroupées en une seule station avec deux machines parallèles, où les machines effectuent à la fois 3,4 en une seule étape et prennent deux fois plus de temps qu'avant.
4. Capacité de chaque station est égale à une pièce par heures.

Résultat obtenu :

- ✓ Deux pièces seront retrouvées aux machines 3 ou 4, par conséquent, nous avons dû attendre.
- ✓ Dans la ligne, chaque fois qu'il y a deux pièces en 3 ou 4, nous sommes assurés que les deux sont en cours de traitement.
- ✓ Enfin, nous pourrions réduire la variabilité des temps de traitement à moins que celle impliquée par la distribution exponentielle.
- ✓ La réduction de la probabilité que les jobs s'accumulent derrière les stations, et donc en attente, améliorera le débit et le temps de cycle pour un niveau WIP donné.

Sur la base du concept décrit dans la section précédente, nous pouvons calculer CT et TH pour condition –pire cas pratique (PWC). Le calcul peut se faire simplement à l'aide d'un tableau (2.4) en changeant le niveau des encours critique.

Tableau 2.4 : Résultats TH et CT en fonction de WIP (Practical Worst Case Performance (PWC))

WIP	w/r_b	Pire Cas	Pratique (PWC)
(w)		$CT_{PWC}(w)$	$TH_{PWC}(w)$
1	0.76	5.14	0.19
2	1.52	5.90	0.34
3	2.27	6.66	0.45
4	3.03	7.41	0.54
5	3.79	8.17	0.61
6	4.55	8.93	0.67
7	5.30	9.69	0.72
8	6.06	10.44	0.77
9	6.82	11.20	0.80
10	7.58	11.96	0.84
11	8.33	12.72	0.87
12	9.09	13.47	0.89
13	9.85	14.23	0.91
14	10.61	14.99	0.93
15	11.36	15.75	0.95
16	12.12	16.50	0.97
17	12.88	17.26	0.98
18	13.64	18.02	1.00
19	14.39	18.78	1.01
20	15.15	19.53	1.02
21	15.91	20.29	1.03
22	16.67	21.05	1.05
23	17.42	21.81	1.05
24	18.18	22.56	1.06
25	18.94	23.32	1.07

Les figures (2.18 et 2.19) illustrent certains de ces concepts en traçant le temps de cycle et le débit en fonction du WIP sous l'hypothèse de temps de traitement distribués de manière exponentielle à toutes les stations.

Pour la comparaison CT et TH, nous avons tracé le pire pour le même taux de goulot d'étranglement et le même temps de traitement brut (c'est-à-dire pour $r_b = 1,32$ et $T_0 = 5.14$ heures). Même si les temps de traitement sont exponentiels, une ligne déséquilibrée et des stations machines parallèles, cela surpasse le pire des cas pratiques. Si nous devons réduire la variabilité des délais de traitement, cela améliorerait encore plus PWC.

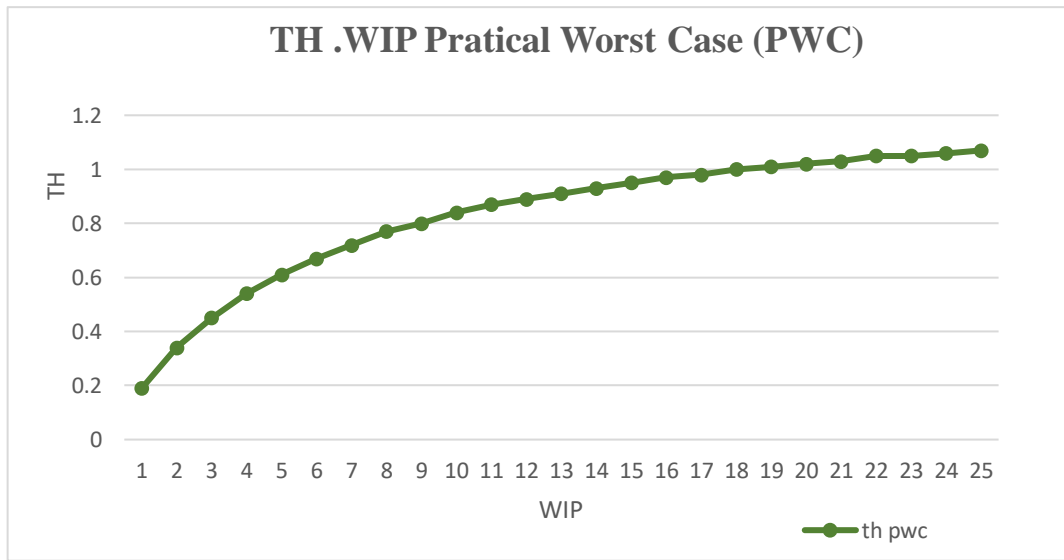


Figure 0.17 : Pire Cas Possible de Performance pour TH en fonction de WIP

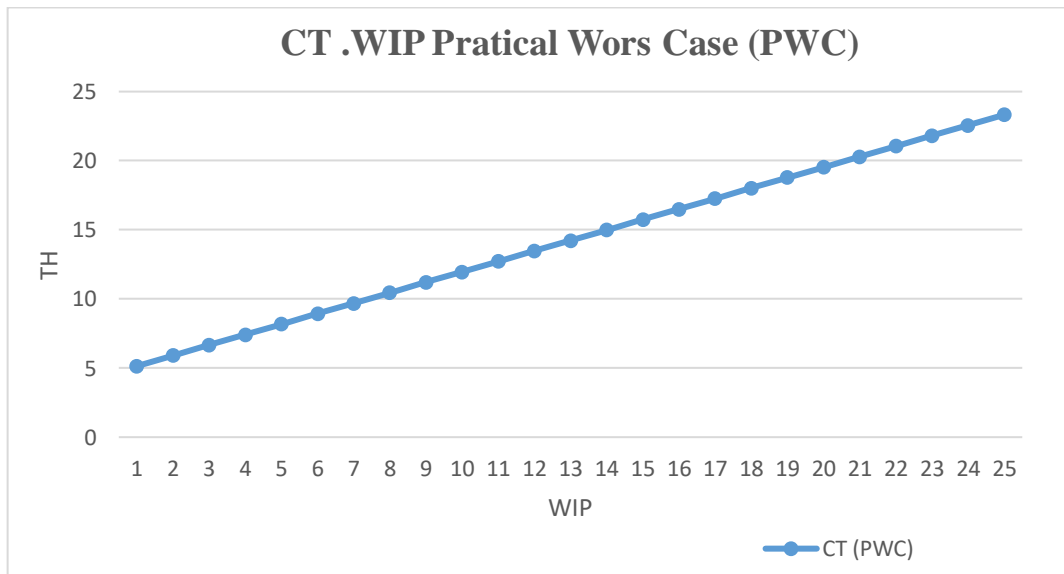


Figure 0.18 : Pire Cas Possible de Performance pour CT en fonction de WIP

Un autre exemple, dans une ligne avec quatre stations et trois jobs, le vecteur $(3, 0, 0, 0)$ représente l'état dans lequel les trois jobs sont à la première station, tandis que le vecteur $(1, 1, 1, 0)$ représente l'état dans lequel il y a une tâche chacune aux stations 1, 2 et 3. Il existe 20 états possibles pour un système composé de quatre machines et de trois tâches, qui sont énumérés dans le tableau (2.5). Selon les hypothèses spécifiques sur la ligne, tous les états ne se produiront pas nécessairement. Par exemple, les quatre derniers états $(1,1,1,0)$, $(0,1,1,1)$, $(1,0,1,1)$ et $(1,1,0,1)$ présentés sur le tableau (2.5) représente le meilleur des cas dans notre système. De même, s'il se comporte selon le pire des cas, alors il existe les quatre premiers états $(3,0,0,0)$, $(0,3,0,0)$, $(0,0,3,0)$ et $(0,0,0,3)$.

Tableau 2.5 : États possibles pour un système avec quatre machines et trois tâches [1]

Station	Etat	Station	Etat
1	$(3,0,0,0)$	11	$(1,0,2,0)$
2	$(0,3,0,0)$	12	$(0,1,2,0)$
3	$(0,0,3,0)$	13	$(0,0,2,1)$
4	$(0,0,0,3)$	14	$(1,0,0,2)$
5	$(2,1,0,0)$	15	$(0,1,0,2)$
6	$(2,0,1,0)$	16	$(0,0,1,2)$
7	$(2,0,0,1)$	17	$(1,1,1,0)$
8	$(1,2,0,0)$	18	$(1,1,0,1)$
9	$(0,2,1,0)$	19	$(1,0,1,1)$
10	$(0,2,0,1)$	20	$(0,1,1,1)$

Supposons que les temps de traitement soient déterministes. Mais à ce moment-là, la machine a mal fonctionné pendant plusieurs heures. Ensuite, la plupart du temps, nous observerons des états « étalés », comme ceux de la figure (2.20), mais parfois nous verrons des états « regroupés », comme ceux de la figure (2.21). S'il y a peu d'aléatoire (par exemple, les pannes matérielles sont très rares), alors la fréquence des états de propagation sera très élevée, tandis que s'il y a beaucoup d'aléatoire (par exemple, les pannes matérielles sont très fréquentes), alors tous les cas indiqués dans le tableau (2.3) peuvent se produire fréquemment.

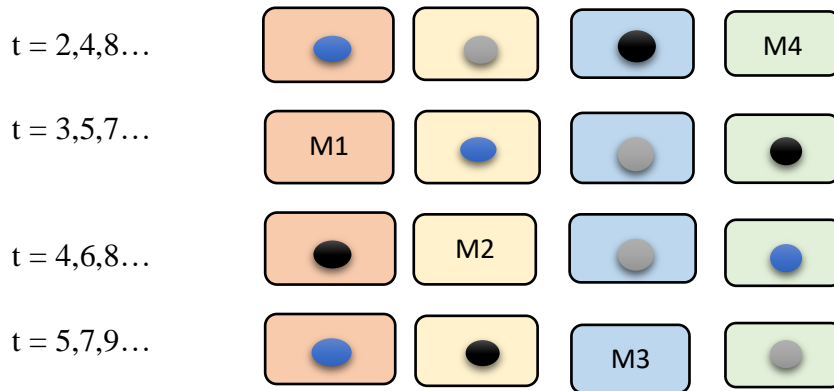


Figure 0.19 : États étalés dans le pire des cas possible (PWC), ligne à quatre machines et à trois tâches

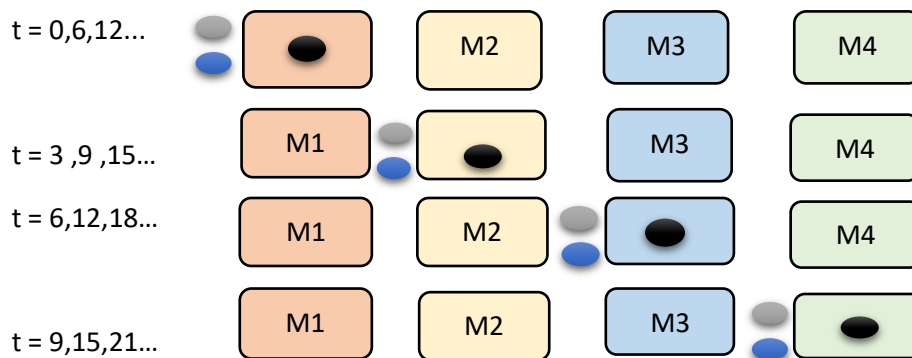


Figure 2.20 : États regroupés dans le pire des cas possible (PWC), ligne à quatre machines et à trois tâches.

2.8. Variabilité d'un système flow shop

2.8.1. Définition

La variabilité est tout ce qui amène le système à s'écarter d'un comportement régulier et prévisible.

2.8.2. Sources de variabilité

- ✓ Pannes de machine.
- ✓ Variation de l'espace de travail.
- ✓ Configurations.
- ✓ Niveaux de compétence différentiels.
- ✓ Pénuries de matériel.
- ✓ Maintenance du matériel.
- ✓ Fluctuations de la demande.
- ✓ Reprise.
- ✓ Ordres de modification technique.
- ✓ Indisponibilité de l'opérateur.
- ✓ Variété de produits.

2.8.3. Types de variabilité

Pour déterminer les stratégies de gestion des systèmes de production face à la variance, il est important de comprendre d'abord les types de variance dans les environnements de fabrication sont :

- ❖ La variation d'entité comprend les différences dans n'importe quel attribut tel que la taille, la couleur, la dureté, la densité, la quantité, la qualité, etc.
- ❖ La variation du processus comprend les différences dans le résultat du processus lui-même, telles que la qualité du service, l'application du processus, etc.
- ❖ La variation temporelle traite du temps nécessaire pour obtenir ou produire des entités et/ou des services.

2.8.4. Mesures de la variabilité

Pour analyser efficacement la variabilité, il faut pouvoir la quantifier. Pour ce faire, nous utilisons des mesures statistiques standard pour définir un ensemble de classes de variabilité de la physique des usines.

La variance, habituellement notée σ^2 , est une mesure de la variabilité, tout comme l'écart type σ , défini comme la racine carrée de la variance. Souvent, cependant, la variabilité absolue est moins importante que la variabilité relative. [1]

Une mesure relative raisonnable d'une variable aléatoire est l'écart type divisé par la moyenne, qui est appelé le coefficient de variation (CV). Si nous notons t la moyenne et σ la variance, le coefficient de variation C peut s'écrire :

$$C = \frac{\sigma}{t} \tag{2.8}$$

Dans de nombreux cas, il s'avère plus pratique d'utiliser le coefficient de variation au carré (SCV) :

$$C^2 = \frac{\sigma^2}{t^2} \tag{2.9}$$

2.8.5. Classes de variabilité

Nous utiliserons le CV et le SCV pour représenter et analyser la variabilité dans les systèmes de production. Nous dirons qu'une variable aléatoire a une faible variabilité (LV) si son CV est inférieur à 0,75, qu'elle a une variabilité modérée (MV) si son CV est compris entre 0,75 et 1,33, et qu'il présente une forte variabilité (HV) si le CV est supérieur à 1,33. Le (tableau 2.5) présente ces cas.

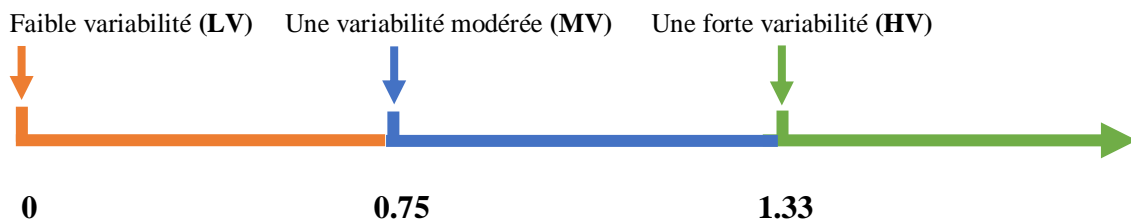


Figure 0.21 : Classes de variabilité [1]

2.8.6. Relation avec les cas de performance

Pour les systèmes équilibrés, les pires cas pratiques et les pires cas possible représentent des systèmes dont les performances sont dégradées par la variabilité. Cependant, la variabilité dans le pire des cas pratiques est complètement prévisible - une conséquence d'un mauvais contrôle - tandis que la variabilité dans le pire cas possible est due à un caractère aléatoire imprévisible. Pour comprendre la différence, il faut faire la distinction entre la variation contrôlable et la variation aléatoire.

- **MV** – Pire cas pratique
- **LV** – entre le meilleur cas et le pire cas pratique
- **HV** – entre le pire cas pratique et le pire cas

2.9. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté comment diagnostiquer l'efficacité des performances d'un système flow-shop en mesurant les principaux paramètres de flux en fonction de la physique de l'usine. Cependant, comment les paramètres de flux sont liés et comment vous pouvez améliorer les performances du flux de processus. Nous avons présenté également la variance et ses effets sur le système.

Dans le chapitre suivant, nous allons étudier le système job-shop en détail dans le but d'atteindre sa performance satisfaisante. Nous essayons alors de répondre à quelques questions en relation avec les paramètres de flux et l'amélioration de ces performances.

Chapitre 3 : Evaluation des performances d'un système Job Shop

3.1. Introduction

Aujourd'hui, les entreprises évoluent dans un environnement changeant très incertain dominé par une forte concurrence internationale. Pour survivre dans cette concurrence, il faut toujours s'adapter au plus vite et assurer leur interaction, il existe plusieurs types de systèmes de production. Dans notre travail, on s'intéresse aux problèmes liés aux systèmes job-shop en général. Dans ce chapitre, nous allons étudier ce genre de système on se basant sur les concepts de la physique des usines. Nous allons alors définir le pire cas possible (Worst Case), le meilleur cas (Best Case) et le pire cas pratique (Practical Case Worst (PWC)) au sens large dont le but est de réduire le temps total de production.

3.2. Description du système étudié

Le système étudié dans ce mémoire est un système de production de type job shop. Il est considéré comme une généralisation de celui du Flow shop, le passage des jobs sur les machines est différent d'un job à l'autre.

Le problème du Job Shop peut être expliqué comme suit : Étant donné un ensemble de n jobs et un ensemble de m machines. Chaque job i est composé d'un ensemble ordonné de n opérations $O_{i1}, O_{i2}, O_{i3}, \dots, O_{in}$.

L'ordre des opérations ne peut pas être modifié, elles sont organisées par un ordre donné propre à chaque job. En effet, l'opération O_{ij} doit être réalisée par une machine donnée durant un temps P_{ijk} sans interruption (i.e. lorsque l'opération commence, elle ne peut pas être interrompue ou stoppée temporairement jusqu'à ce qu'elle s'achève complètement).

D'autre part, chaque machine peut exécuter un seul job à la fois (i.e. dans une période donnée) et chaque job peut être exécuté par une seule machine pendant une période de temps.

L'objectif final est de minimiser le temps d'exécution du job. Le job shop se caractérise par un cheminement multiple parce que les opérations de chaque job peuvent emprunter divers chemins (routage des opérations).

Dans notre travail, nous avons proposé d'étudier un système constitué de six machines (M1, M2, M3, M4, M5 et M6) positionnées sous forme présentée dans la figure (Figure 3.1).

Les routages sont représentés comme ci-dessous :

J1 en Orange : Entrée \longrightarrow Machine 1- Machine 5- Machine 2- Machine 3 \longrightarrow Sortie.

J2 en Bleu : Entrée \longrightarrow Machine 4- Machine 2 - Machine 3 \longrightarrow Sortie.

J3 en Vert : Entrée \longrightarrow Machine 4 - Machine 2 - Machine 6 \longrightarrow Sortie.

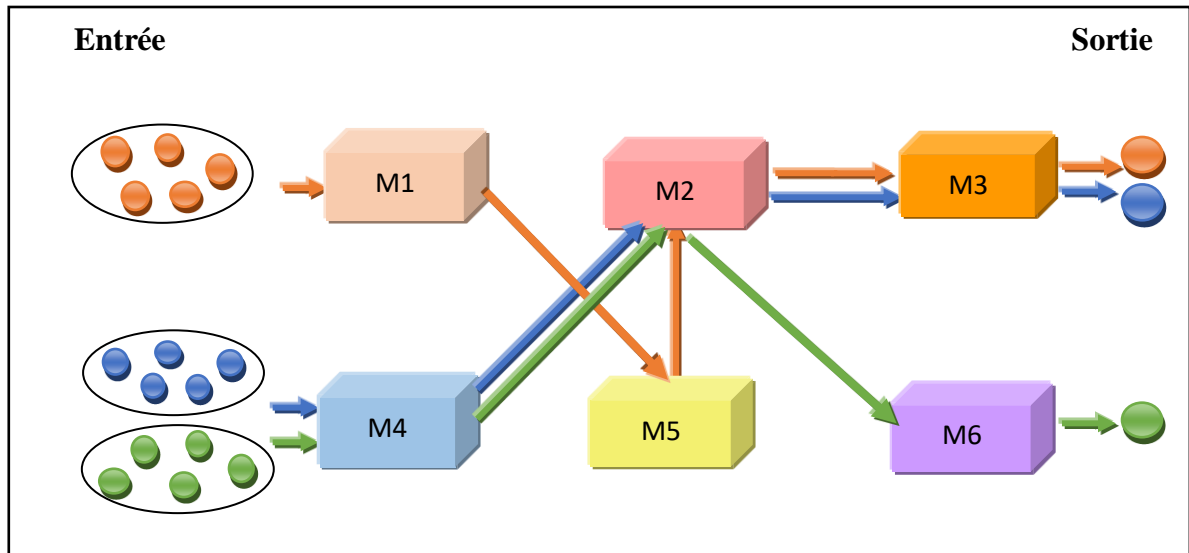


Figure 0.1: Organisation du système étudié

Le tableau (3.1) suivant regroupe un ensemble des temps opératoires entre les différentes stations de travail d'une chaîne de production proposée utilisés à la résolution du problème traité :

Tableau 3.1 : Table d'affectation pour l'étude

Jobs	Opérations	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Job 1	O ₁₁	5					
	O ₁₂		4				
	O ₁₃			8			
	O ₁₅					5	
Job 2	O ₂₂		2				
	O ₂₃			9			
	O ₂₄				4		
Job 3	O ₃₂		3				
	O ₃₄				6		
	O ₃₆						13

3.3. Notations et Hypothèses

3.3.1. Notations



Pour la modélisation mathématique de ce type de systèmes, nous allons utiliser les notations suivantes :

Tableau 3.2 : Notations

Notation	Description
n	Nombre total de Job i .
M	L'ensemble des machines $M = \{1, 2, \dots, m\}$
J_i	L'ensemble des jobs $J = \{J_1, J_2, \dots, J_n\}$
O_{il}	Opérations numéro l appartenant au job i
P_{ilk}	Temps de traitement de l'opération O_{il} sur la machine k
T_{0J_i}	Temps de traitement brut (temps cycle minimum)
TA_{ik}	Temps d'attente dans la file d'attente de la machine k .
TQ_{J_i}	Temps d'attente du job i dans le système.
CT_{J_i}	Temps de Cycle du job i
CT	Temps de Cycle du système
$CT_{J_{ir}}$	Temps de cycle du job i du routage r
Y_{ir}	Routage r du job i
TH_i	Taux de production du job i
TH	Taux de production du système
X_{ilk}	Variable de décision liée à l'affectation de l'opération O_{il}
Z_{ik}	Variable de décision liée à la disponibilité de la machine k
Y_i	L'ensemble de routages de chaque job i
i	Indice des jobs, $i = 1, 2, \dots, n$.
l	L'indice des opérations, $l = 1, 2, \dots, L_i$
k	Indice des machines, $k = 1, 2, \dots, m$
r	Indice de routages, $r=1, 2, \dots, R$

3.3.2. Hypothèses

Pour comprendre et bien étudier notre problématique nous avons proposé un ensemble d'hypothèses et de contraintes concernant le fonctionnement de notre système :

-  Les jobs sont toujours disponibles à l'instant $T=0$
-  Les machines sont en bon fonctionnement (pas de panne).

- ✚ Chaque machine possède une file d'attente avec une capacité illimitée.
- ✚ Les temps de traitement P_{ilk} sont déterministes et connus à l'avance.
- ✚ Les temps de montage et de démontage sont inclus dans le temps de traitement et les temps de transport sont négligeables.
- ✚ Chaque machine ne peut réaliser qu'une seule opération à un instant donné.
- ✚ Un job peut être traité au moins par une machine à un instant donné.
- ✚ Pas de préemption des opérations sur les machines.
- ✚ Pas de gamme de remplacement, chaque job suivra une séquence d'opérations qui lui est propre, celle-ci pouvant être choisie aléatoirement lors de la simulation.
- ✚ Pas de temps de changement d'outils entre les gammes.

3.4. Formulation mathématique

Dans le but d'étudier notre système de type job-shop, ce dernier peut être décrit mathématiquement comme suit :

Il existe un ensemble de m machines, un ensemble de n jobs et un ensemble de O opérations. Ces jobs sont constitués d'une suite d'opérations dont chacune doit être exécutée pendant un intervalle de temps donné sur une machine donnée. Chaque machine peut traiter au plus une opération à la fois. Nous supposons que toutes les opérations successives d'un même travail sont traitées sur des machines différentes.

Supposons qu'il existe trois ensembles finis J , M et O où :

J est un ensemble de $1, 2, \dots, n$ jobs.

M est un ensemble de $1, 2, \dots, m$ machines.

O est un ensemble de $1, 2, \dots, l$ opération.

Pour évaluer les performances de notre système, notre objectif initial et principal est de trouver le temps de cycle (CT) de chaque job. Par la suite nous pouvons calculer le Makespan « C_{Max} », il représente le temps de cycle du dernier produit exécuté dans le système, il est calculé de la façon suivante :

3.4.1. Variables de décision

Nous proposons d'utiliser les variables de décision suivantes :

$$\forall i \in n, l \in O_{il} \forall k \in M : X_{ilk}$$

$$X_{ilk} = \begin{cases} 1 & \text{si l'opération } O_{il} \text{ est effectuée par la machine } k \\ 0 & \text{si non} \end{cases}$$

$$\forall i, \forall k \in M : Z_{ik}$$

$$Z_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{si la machine } k \text{ est occupée} \\ 0 & \text{si non} \end{cases}$$

3.4.2. Calcul du temps de cycle

En utilisant les variables de décision définies précédemment, le temps de cycle pour chaque job peut être modélisé de la façon suivante :

$$CT_{J_i} = \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^{L_i} P_{ilk} \times X_{ilk} + TQ_{J_i} \quad (3.1)$$

Tel que :

Le temps d'attente peut être exprimé par :

$$TQ_{J_i} = \sum_{k=1}^m TA_{ik} \times Z_{ik} \quad (3.2)$$

L'équation suivante 3.3 exprime le temps de cycle du système :

$$CT = \text{Max}(CT_{J_1}, CT_{J_2}, \dots, CT_{J_n})$$

d' ou

$$CT = \text{Max}_{i=1..n}(CT_{J_i}) \quad (3.3)$$

3.4.3. Algorithme de calcul :

Afin de calculer le temps de cycle de chaque routage et trouver le meilleur routage au même temps, nous avons proposé l'algorithme suivant :

Etape 01 : vérifier la disponibilité de chaque machine constituant le routage défini.

Etape 02 : calcul du temps d'attente si $Z_{ik} = 1$:

$$TQ_{J_i} = \sum_{k=1}^m TA_{ik} \times Z_{ik}$$

Etape 03 : calcul du temps de cycle $CT_{J_{ikr}}$ de chaque job i en passant par différents routages à l'aide de (3.1)

$$CT_{J_{ir}} = \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^{L_i} P_{ilk} \times X_{ilk} + TQ_{J_i}$$

Etape 04 : enregistrer les valeurs de $CT_{J_{ir}}$.

Etape 05 : définir la valeur minimale des $CT_{J_{ir}}$ enregistrés dans chaque routage

Etape 06 : définir le temps de cycle CT qui est le maximum entre les temps de cycle de différents routages.

3.4.4. Organigramme de l'algorithme proposé :

Afin de trouver le temps de cycle pour chaque job pour améliorer les performances du système, nous avons présenté notre algorithme développé par l'organigramme suivant :

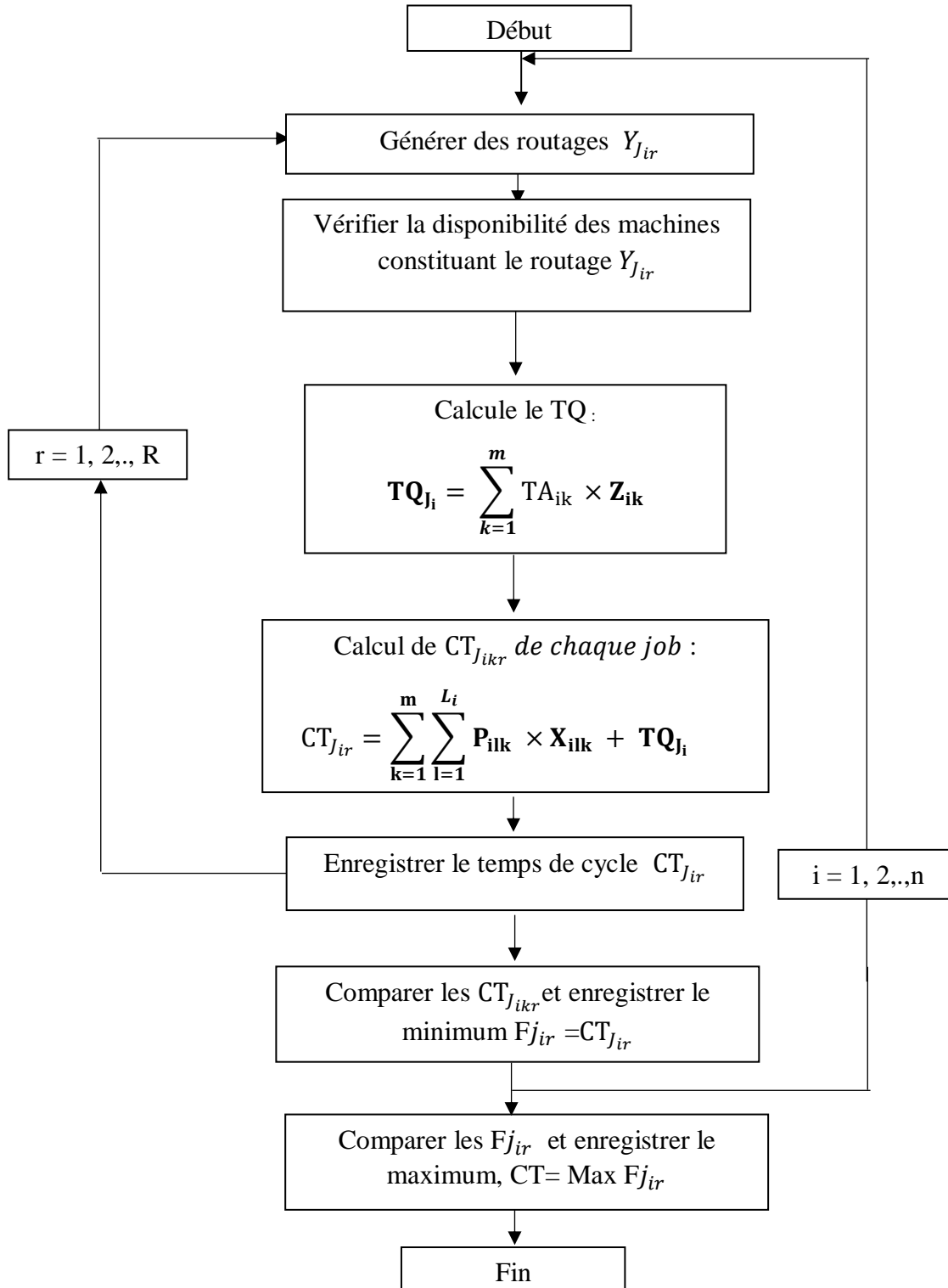


Figure 0.2 : Organigramme proposé

3.4.5. Caractéristique du système

Pour bien étudier les performances de notre système, nous devons étudier et connaître les caractéristiques suivantes :

➤ **Temps de traitement brut (T_{0j_i}):** signifie le temps traitement brute moyen pour chaque job dans une station de travail (temps de cycle CT minimale pour chaque job).

➤ **Taux de production machine goulot (r_{b_i}):**

Le taux de production de la machine goulot est le nombre de jobs exécutés par la station de travail ayant l'utilisation la plus élevée par unité de temps.

➤ **Encours Critiques de jobs (W_{0ilk}) :**

L'encours critique est la somme des niveaux d'encours où le taux de production atteint sa valeur maximale de chaque job (maximum $r_{b_{ik}}$) avec un temps de cycle minimum de chaque job (minimum T_{0_i}).

$$W_{0ilk} = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{l=1}^{L_i} \sum_{k=1}^m r_{b_i} \times (P_{ilk} \times X_{ilk}) \right) + TQ_{J_i} \quad (3.4)$$

Application numérique

Dans notre exemple présenté sur la figure 3.1, on calcule le temps de traitement brut pour chaque job à partir de notre système.

- Taux de production de la machine goulot : la machine à goulot d'étranglement du système est la troisième machine car c'est la machine avec l'utilisation la plus élevée et avec un taux de production réduit.
- Nous avons un taux de production de la machine goulot :
 $r_b = 0.170$
- A l'aide de l'équation (3.3), calculons le temps de traitement brut de chaque job (T_{0j_i}):

$$T_{0j_1} = \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^{L_i} P_{1lk} \times X_{1lk} + TQ_{J_1}$$

$$T_{0j_1} = (5 + 0) + (4 + 3) + (8 + 0) + (5 + 0) = \mathbf{25 \text{ min}}$$

$$T_{0j_2} = \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^{L_i} P_{2lk} \times X_{2lk} + TQ_{J_2}$$

$$T_{0j_2} = (4 + 0) + (2 + 0) + (9 + 0) = \mathbf{15 \text{ min}}$$

$$T_{0j_3} = \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^{L_i} P_{3lk} \times X_{3lk} + TQ_{j_3}$$

$$T_{0j_3} = (6 + 0) + (3 + 4) + (13 + 0) = \mathbf{26 \text{ min}}$$

- **Encours critique** : en utilisant l'équation (3.4) :

$$W_{0ilk} = \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^{L_i} \left(\sum_{k=1}^m r_{bi} \times ((P_{ilk} \times X_{ilk}) + TQ_{j_i}) \right)$$

$$W_{0ilk} = (0.17 \times 25) + (0.17 \times 15) + (0.17 \times 26) = 4.25 + 2.55 + 4.42 = \mathbf{11.22 \text{ Pièces}}$$

3.4.6. Loi de Little

La loi de Little est la relation qui lie le temps d'attente de chaque job, le temps de cycle maximal entre les jobs, la somme des encours et le de taux de production (débits) maximal entre chaque job d'un système. La relation s'écrit :

$$WIP_{ilk} = \text{Max} (CT_{j_i, i=1,2,\dots,n}) \times \sum_{i=1}^n (TH_i) \quad (3.5)$$

Où

$$TH = \frac{WIP_{ilk}}{\text{Max} (CT_{j_i, i=1,2,\dots,n})}$$

Nous utilisons l'équation (3.5) pour calculer la somme des encours dans le système :

$$WIP_{ilk} = \text{Max} (CT_{j_i, i=1,2,\dots,n}) \times \sum_{i=1}^n (TH_i)$$

En Calculant le taux de production de chaque job :

$$TH = \sum_{i=1}^n (TH_i) = 0.17 + 0.17 + 0.17 = \mathbf{0.51 \text{ Pièce/min}}$$

Nous obtenons alors :

$$WIP_{ilk} = 26 \times 0.51 = \mathbf{13.26 \text{ Pièces}}$$

3.5. Modélisation

La modélisation, est en général, une étape très importante dans la résolution d'un problème Job Shop dans lequel l'analyse et l'interprétation des résultats constituent l'étape qui permet la comparaison des solutions résultantes. Il est donc impératif de documenter

non seulement les résultats eux-mêmes, mais aussi la façon dont ils ont été obtenus et c'est ce que nous allons faire dans cette partie.

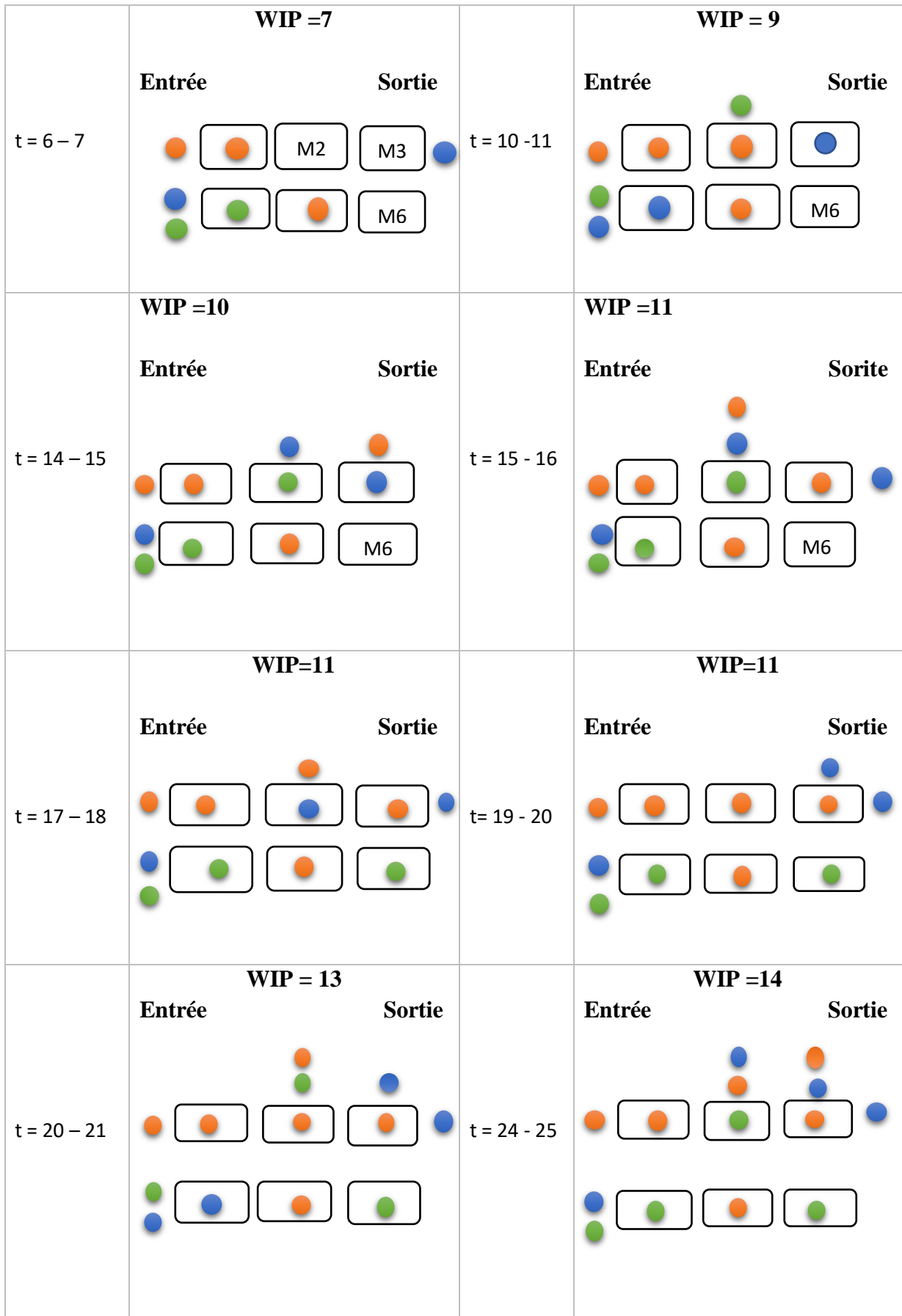
Dans cette partie du travail, nous allons commencer par l'application des notions du Factory physics sur notre système pour déterminer les performances du pire cas pratique (Practical Worst Case), le meilleur cas (Best Case) et le pire cas possible (Worst Case).

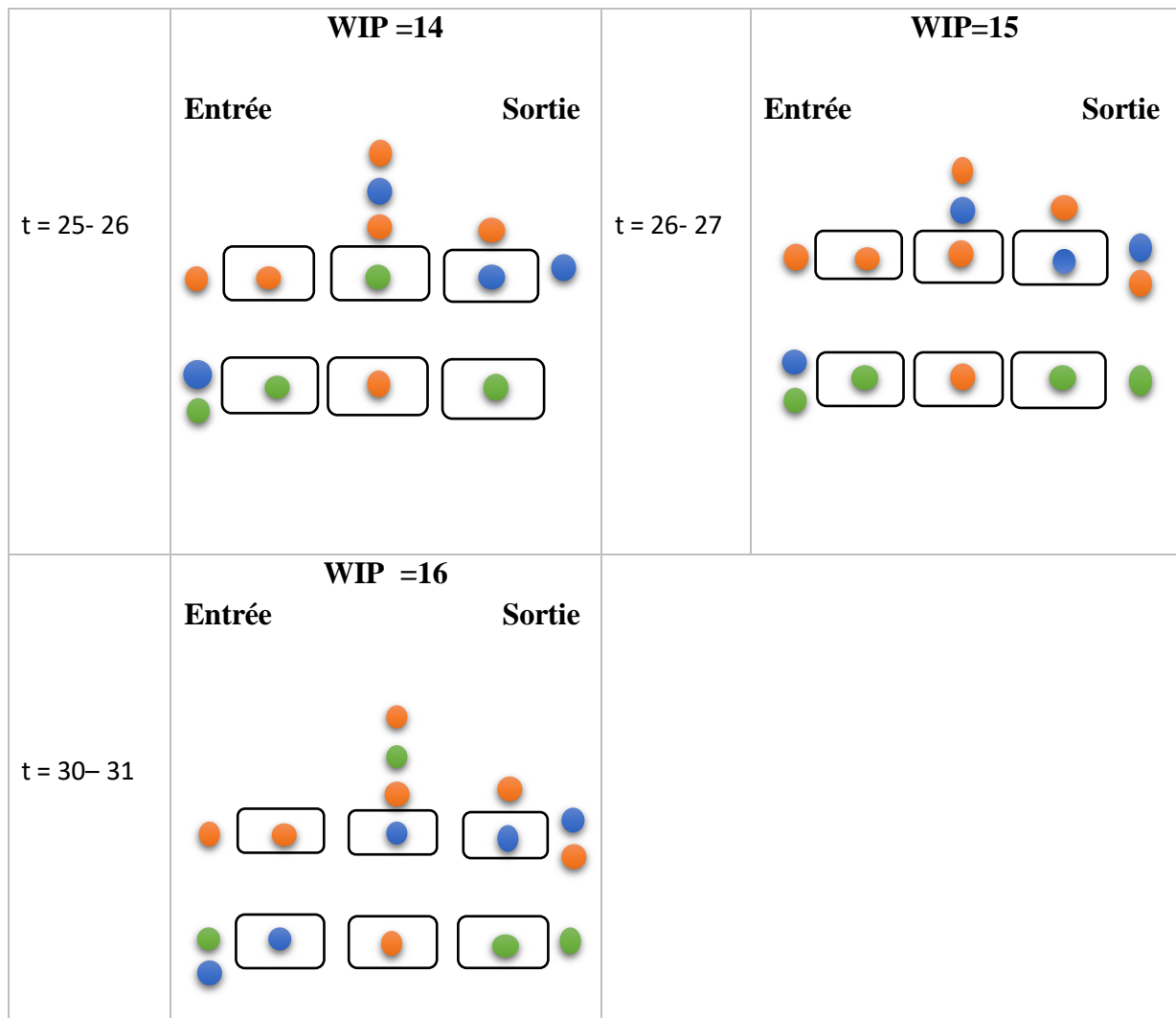
3.5.1. Modélisation graphique

En regardant l'exemple précédent (Figure 3.1), nous simulons le système de Job-shop étudié composé de trois jobs et de six machines de telles sortes que chaque job se déplace sur la machine, en tenant compte le temps opératoire mentionné dans le tableau 3.3 ci-dessous.

Tableau 3.3 : Tableau récapitulatif de l'analyse des performances de notre système

Temps d'arrivée (min)		Temps d'arrivée (min)	
t = 0	<p style="text-align: center;">WIP= 3</p> <p style="text-align: center;">Entrée Sortie</p>	t = 4 - 5	<p style="text-align: center;">WIP =7</p> <p style="text-align: center;">Entrée Sortie</p>
t = 0 ... 4	<p style="text-align: center;">WIP= 5</p> <p style="text-align: center;">Entrée Sortie</p>	t = 5-6	<p style="text-align: center;">WIP=7</p> <p style="text-align: center;">Entrée Sortie</p>





Le tableau (3.3) représente les solutions d'un problème de job-shop à 3 jobs et 6 machines avec les gammes opératoires suivantes :

$$J1 = \{M1, M5, M2, M3\}.$$

$$J2 = \{M4, M2, M3\}.$$

$$J3 = \{M4, M2, M6\}.$$

Nous constatons qu'un job ne peut s'exécuter sur une machine jusqu'à ce que la machine soit disponible, c'est-à-dire le début d'exécution de l'opération suit le dernier job exécuté sur cette même machine. Par exemple, le job J_3 ne peut commencer sur la machine $M4$ avant le début de job J_2 sur la machine $M2$.

Dans la partie suivante, nous présentons des équations mathématiques qui nous permettent d'étudier le comportement de notre système.

3.5.2. Modélisation mathématique

Les modèles mathématiques visent à trouver des équations mathématiques pour décrire les données, les contraintes ainsi que les critères utilisés pour l'optimisation des solutions.

L'avantage de ce type de modélisation est d'obtenir des expressions mathématiques simples qui peuvent être exploitées facilement en programmation.

3.5.2.1. Règle du meilleur cas « Best Case Performance »

Le temps de cycle est le maximum entre les différents temps de cycle (CT_{Best_i}), tel que (CT_{Best_i}) représente le minimum CT de chaque job i pour différents niveaux d'encours w , donnée par :

$$CT_{Best} = \text{Max}(CT_{Best_i, i=1,2,\dots,n})$$

Où

$$CT_{Best_i} = \text{Max}_{i=1\dots n}(CT_{Best_i}) \quad (3.11)$$

Sachant que :

$$CT_{Best_i}(w) = \begin{cases} T_{0_i} & \text{si } w < W_{0_{ilk}} \\ \frac{w}{r_{b_{ik}}} & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.12)$$

Le taux de production (TH_{Best}) par rapport à un niveau d'encours w est égal la somme de production de chaque job :

$$TH_{Best}(w) = \sum_{i=1}^n (TH_i) \quad (3.13)$$

Sachant que :

$$TH_{Best_i}(w) = \begin{cases} \frac{w}{T_{0_i}} & \text{si } w < W_{0_{ilk}} \\ r_{b_{ik}} & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.14)$$

On applique les équations 3.11 et 3.13 sur l'exemple de la section 3.4 nous obtenons alors le temps de cycle pour chaque job dans le meilleur cas comme suivant :

$$CT_{Best_1} = \begin{cases} 25 & w < 11.22 \\ \frac{w}{0.17} & \text{sinon} \end{cases}$$

$$CT_{Best_2} = \begin{cases} 15 & w < 11.22 \\ \frac{w}{0.17} & \text{sinon} \end{cases}$$

$$CT_{Best_3} = \begin{cases} 26 & w < 11.22 \\ \frac{w}{0.17} & \text{sinon} \end{cases}$$

Donc le temps de cycle du meilleur cas est :

$$CT_{Best} = \text{Max}(CT_{Best_1}, CT_{Best_2}, CT_{Best_3})$$

$$CT_{Best} = CT_{Best_3}$$

Nous calculons le taux de production par job dans le meilleur cas comme suivant :

$$TH_{Best_1} = \begin{cases} \frac{w}{25} & w < 11.22 \\ 0.17 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$TH_{Best_2} = \begin{cases} \frac{w}{15} & w < 11.22 \\ 0.17 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$TH_{Best_3} = \begin{cases} \frac{w}{26} & w < 11.22 \\ 0.17 & \text{sinon} \end{cases}$$

Donc le taux de production du Meilleur cas est :

$$TH_{Best} = TH_{Best_1} + TH_{Best_2} + TH_{Best_3}$$

Sur la base de l'exemple (3.1) et du concept décrit dans cette section, nous pouvons également calculer CT_{j_i} et TH_i pour le meilleur des cas. Le calcul peut être effectué simplement à l'aide du tableau (3.3) en modifiant le niveau critique w .

Tableau 3.4 : Résultats TH_i et CT_i en fonction de WIP_i (Best Case Performance)

WIP	Meilleur	Cas	« Best	Case	Performance »	
w	CT₁	CT₂	CT₃	TH₁	TH₂	TH₃
1	25	15	26	0.04	0.0666	0.04
2	25	15	26	0.08	0.1333	0.08
3	25	17.6470	26	0.12	0.17	0.12
4	25	23.5294	26	0.16	0.17	0.15
5	29.41	29.4117	29.41	0.17	0.17	0.17
6	35.29	35.2941	35.29	0.17	0.17	0.17
7	41.18	41.1764	41.17	0.17	0.17	0.17
8	47.06	47.0588	47.05	0.17	0.17	0.17
9	52.94	52.9411	52.94	0.17	0.17	0.17
10	58.82	58.8235	58.82	0.17	0.17	0.17

A partir des résultats du tableau (3.4), nous traçons les courbes suivantes :

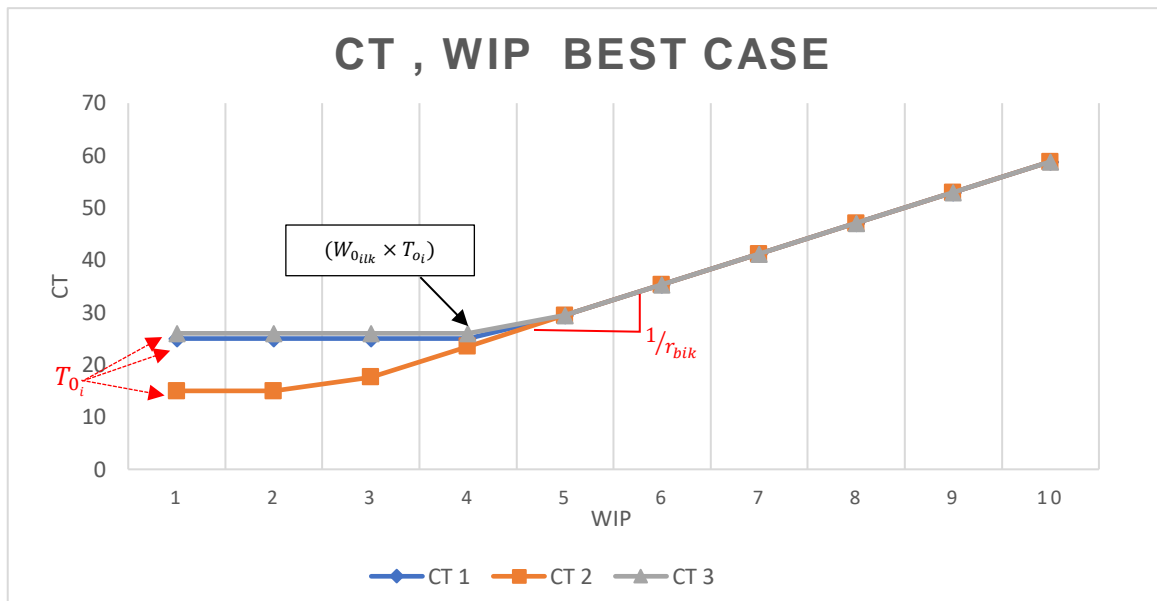


Figure 0.3 : Graphe CT en fonction de WIP pour les trois jobs (Best Case)

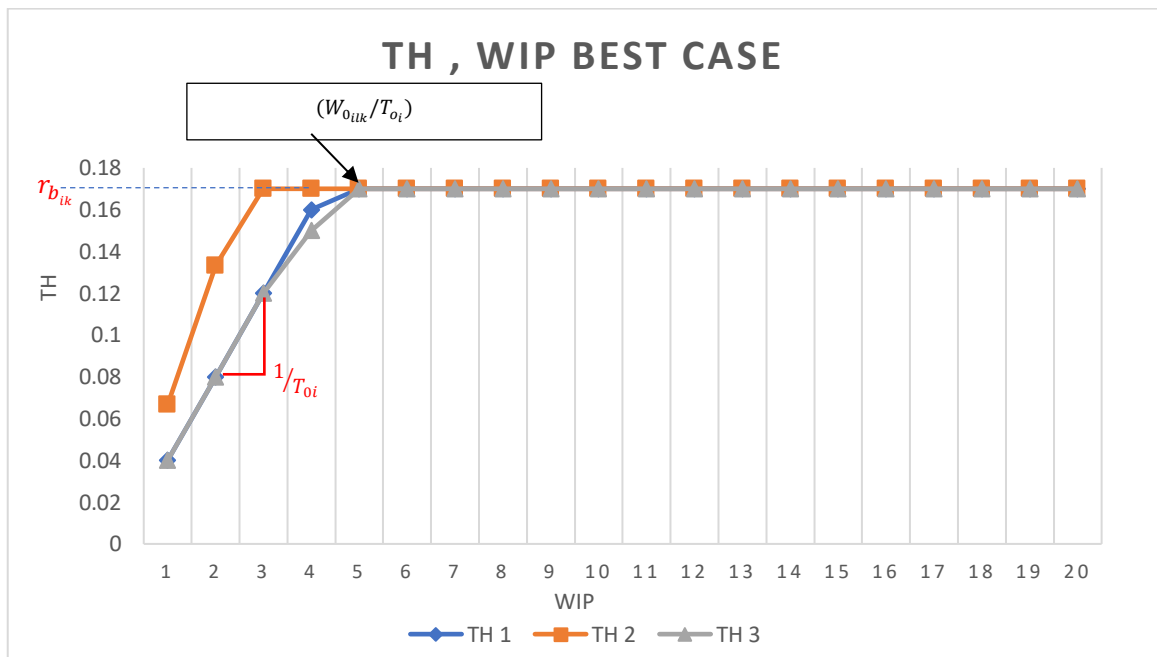


Figure 0.4 : Graphe TH en fonction de WIP pour les trois jobs (Best Case)

Dans le cas de meilleure performance, le taux de production TH est en croissance jusqu'à sa stabilisation au point du débit maximal r_b :

$$r_{bik} = (W_{0ilk}/T_{oi})$$

3.5.2.2. Règle du Pire cas possible « Worst Case Performance »

Le système atteint sa valeur maximale du temps de cycle maximal (CT_{worst}) de chaque job en fonction d'un niveau d'encours w donné tel que :

$$\begin{aligned} \mathbf{CT}_{\text{worst}}(\mathbf{w}) &= \mathbf{Max}(\mathbf{CT}_{\text{worst } i}, i=1, 2, \dots, n) \\ &\text{où} \\ \mathbf{CT}_{\text{worst}}(\mathbf{w}) &= \mathbf{Max}_{i=1, \dots, n}(\mathbf{CT}_{\text{worst } i}) \end{aligned} \quad (3.15)$$

Sachant que :

$$\mathbf{CT}_{\text{worst } i}(\mathbf{w}) = \mathbf{W} \times \mathbf{T}_{0i} \quad (3.16)$$

Le taux de production par tâche au pire cas ($\mathbf{TH}_{\text{worst}}$) pour un niveau d'encours donné \mathbf{w} est représenté par :

$$\mathbf{TH}_{\text{worst}}(\mathbf{w}) = \sum_{i=1}^n (\mathbf{TH}_{\text{worst } i}) \quad (3.17)$$

Sachant que :

$$\mathbf{TH}_{\text{worst } i}(\mathbf{w}) = \frac{1}{\mathbf{T}_{0i}} \quad (3.18)$$

On applique les équations 3.15 et 3.17 sur l'exemple de la section 3.4 nous obtenons alors le temps de cycle pour chaque job dans le pire cas possible comme suivant :

$$\mathbf{CT}_{\text{worst } 1} = \mathbf{w} \times \mathbf{T}_{01} = \mathbf{w} \times 25 \text{ Min}$$

$$\mathbf{CT}_{\text{worst } 2} = \mathbf{w} \times \mathbf{T}_{02} = \mathbf{w} \times 15 \text{ Min}$$

$$\mathbf{CT}_{\text{worst } 3} = \mathbf{w} \times \mathbf{T}_{03} = \mathbf{w} \times 26 \text{ Min}$$

Donc le temps de cycle de pire cas possible est :

$$\begin{aligned} \mathbf{CT}_{\text{worst}} &= \mathbf{Max}(\mathbf{CT}_{\text{worst } 1}, \mathbf{CT}_{\text{worst } 2}, \mathbf{CT}_{\text{worst } 3}) \\ \mathbf{CT}_{\text{worst}} &= \mathbf{CT}_{\text{worst } 3} \end{aligned}$$

Nous calculons le taux de production pour chaque job dans le pire cas possible comme suivant :

$$\mathbf{TH}_{\text{worst } 1} = \frac{1}{\mathbf{T}_{01}} = \frac{1}{25} = 0.0400 \text{ Pièces /min}$$

$$\mathbf{TH}_{\text{worst } 2} = \frac{1}{\mathbf{T}_{02}} = \frac{1}{15} = 0.0666 \text{ pièce /min}$$

$$\mathbf{TH}_{\text{worst } 3} = \frac{1}{\mathbf{T}_{03}} = \frac{1}{26} = 0.0384 \text{ Pièces /min}$$

Donc le taux de production du pire cas possible est :

$$\mathbf{TH}_{\text{worst}} = \mathbf{TH}_{\text{worst } 1} + \mathbf{TH}_{\text{worst } 2} + \mathbf{TH}_{\text{worst } 3}$$

$$\mathbf{TH}_{\text{worst}} = 0.0400 + 0.0666 + 0.034 = \mathbf{0.1406 \text{ Pièce /min}}$$

Sur la base du concept des équations décrit dans cette section, nous pouvons calculer CT et TH pour la condition des pires cas possibles pour chaque job. Le calcul peut se faire simplement à l'aide du tableau (3. 5) en changeant le niveau des encours critique.

Tableau 3.5 : Résultat de CT_i et TH_i en fonction de WIP_i (Worst Cas Performance)

WIP	Pire Cas	Possible	« Worst Case	Case	Performance »	
w	CT₁	CT₂	CT₃	TH₁	TH₂	TH₃
1	25	15	26	0.04	0.0666	0.0384
2	50	30	52	0.04	0.0666	0.0384
3	75	45	78	0.04	0.0666	0.0384
4	100	60	104	0.04	0.0666	0.0384
5	125	75	130	0.04	0.0666	0.0384
6	150	90	156	0.04	0.0666	0.0384
7	175	105	182	0.04	0.0666	0.0384
8	200	120	208	0.04	0.0666	0.0384
9	225	135	234	0.04	0.0666	0.0384
10	250	150	260	0.04	0.0666	0.0384

Traduisons nos résultats par les courbes suivantes :

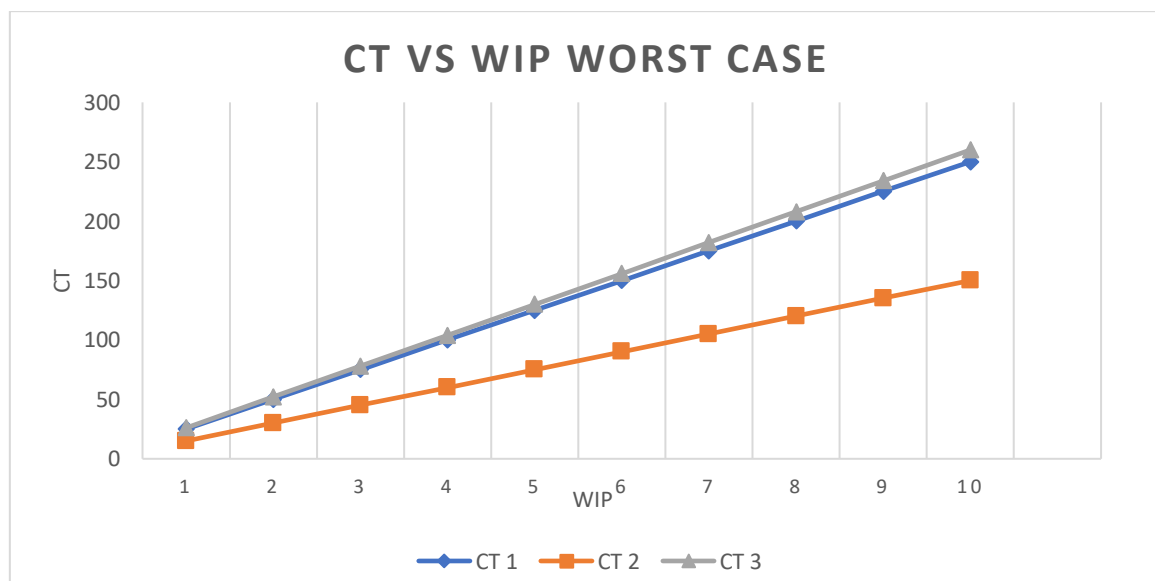


Figure 0.5 : Graphe CT en fonction de WIP pour les trois jobs (Worst Case)

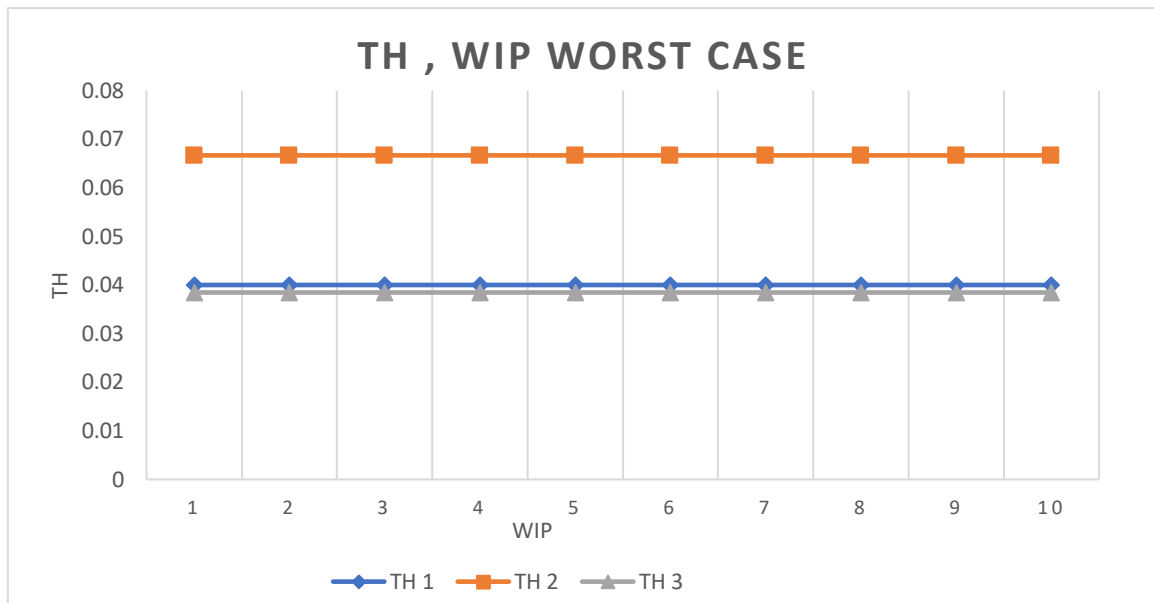


Figure 0.6 : Graphe TH en fonction de WIP pour les trois jobs (Worst Case)

Les graphes (3.5 et 3.6) représentent CT_i et TH_i en fonction de WIP_i du pire des cas possible.

Pour cela, nous constatons que le taux de production pour tous les jobs égale à $1/T_0$ pour chaque valeur de WIP. Pour cette raison, il est bien représenté sur le graphe sous forme de ligne constante. Sinon, le temps de production de chaque job (25, 15 et 26) change et on peut observer la linéarité par job par rapport aux WIP multiplier T_0 , c'est-à-dire la pente de la courbe linéaire par job.

En augmentant le WIP, le débit monte jusqu'au goulot d'étranglement tandis que la contrainte de lot l'amène au pire des cas.

3.5.2.3. Règle du pire cas pratique « Pratical Worst Case Performance »

Le temps de cycle (CT_{PWC}) entre les jobs pour un niveau d'encours donné, w , est donné par :

$$CT_{PWC}(w) = \text{Max}(CT_{PWC_i}, i=1,2,\dots, n)$$

Où

$$CT_{PWC}(w) = \text{Max}_{i=1..n}(CT_i) \tag{3.19}$$

Sachant que :

$$CT_{PWC_i}(w) = T_{0i} + \frac{w-1}{r_{bik}} \tag{3.20}$$

Le taux de production (TH_{PWC}) entre les jobs pour un niveau d'encours donné w , est donné par :

$$TH_{PWC} = \sum_{i=1}^n (TH_i) \tag{3.21}$$

Sachant que :

$$\mathbf{TH}_{PWC_1(w)} = \frac{w}{w_{0ilk} + w - 1} \times r_{bik} \quad (3.22)$$

On applique les équations 3.19 et 3.21 sur l'exemple de la section 3.4 nous obtenons le temps de cycle pour chaque job dans le pire cas pratique comme suivant :

$$\begin{aligned} CT_{PWC_1} &= T_{0_1} + \frac{w-1}{r_{bik}} = 25 + \frac{w-1}{0.17} \\ CT_{PWC_2} &= T_{0_2} + \frac{w-1}{r_{bik}} = 15 + \frac{w-1}{0.17} \\ CT_{PWC_3} &= T_{0_3} + \frac{w-1}{r_{bik}} = 26 + \frac{w-1}{0.17} \end{aligned}$$

Donc le temps de cycle de pire cas pratique égale à :

$$\begin{aligned} \mathbf{CT}_{PWC} &= \mathbf{Max}(CT_{PWC_1}, CT_{PWC_2}, CT_{PWC_3}) \\ \mathbf{CT}_{PWC} &= CT_{PWC_3} \end{aligned}$$

Nous calculons le taux de production pour chaque job dans le pire cas pratique comme suivant :

$$\begin{aligned} TH_{PWC_1} &= \frac{w}{W_{0ilk} + w - 1} \times r_{bik} = \frac{w}{11.22 + w - 1} \times 0.17 \\ TH_{PWC_2} &= \frac{w}{W_{0ilk} + w - 1} \times r_{bik} = \frac{w}{11.22 + w - 1} \times 0.17 \\ TH_{PWC_3} &= \frac{w}{W_{0ilk} + w - 1} \times r_{bik} = \frac{w}{11.22 + w - 1} \times 0.17 \end{aligned}$$

Donc le taux de production du pire cas pratique (PWC) sont :

$$\mathbf{TH}_{PWC} = \mathbf{TH}_{PWC_1} + \mathbf{TH}_{PWC_2} + \mathbf{TH}_{PWC_3}$$

$$\mathbf{TH}_{PWC} = \frac{w}{11.22 + w - 1} \times 0.17 + \frac{w}{11.22 + w - 1} \times 0.17 + \frac{w}{11.22 + w - 1} \times 0.17$$

On se basant sur les équations décrites dans cette section, nous pouvons calculer CT et TH pour la condition –pire cas pratique (PWC) pour chaque job. Le calcul peut se faire simplement à l'aide du tableau (3.6) en changeant le niveau des encours critique.

Tableau 3.6 : Résultat de CT_i et TH en fonction de WIP_i (Practical Worst Case Performance)

WIP	Pire	Cas	Pratique	« PWC Performance »		
w	CT₁	CT₂	CT₃	TH₁	TH₂	TH₃
1	25	15	26	0.04	0.066	0.0384
2	30.8823	20.88	31.8823	0.0647	0.0957	0.0627
3	36.7647	26.76	37.7647	0.0816	0.1120	0.0794
4	42.6470	32.65	43.6470	0.0937	0.1225	0.0916
5	48.5294	38.53	49.5294	0.1030	0.1297	0.1009
6	54.4117	44.41	55.4117	0.1102	0.1350	0.1082
7	60.2941	50.29	61.2941	0.1160	0.1391	0.1142
8	66.1764	56.18	67.1764	0.1208	0.1424	0.1190
9	72.0588	62.06	73.0588	0.1248	0.1450	0.1231
10	77.9411	67.94	78.9411	0.1283	0.1471	0.1266

Les résultats trouvés permettent de tracer les courbes suivantes :

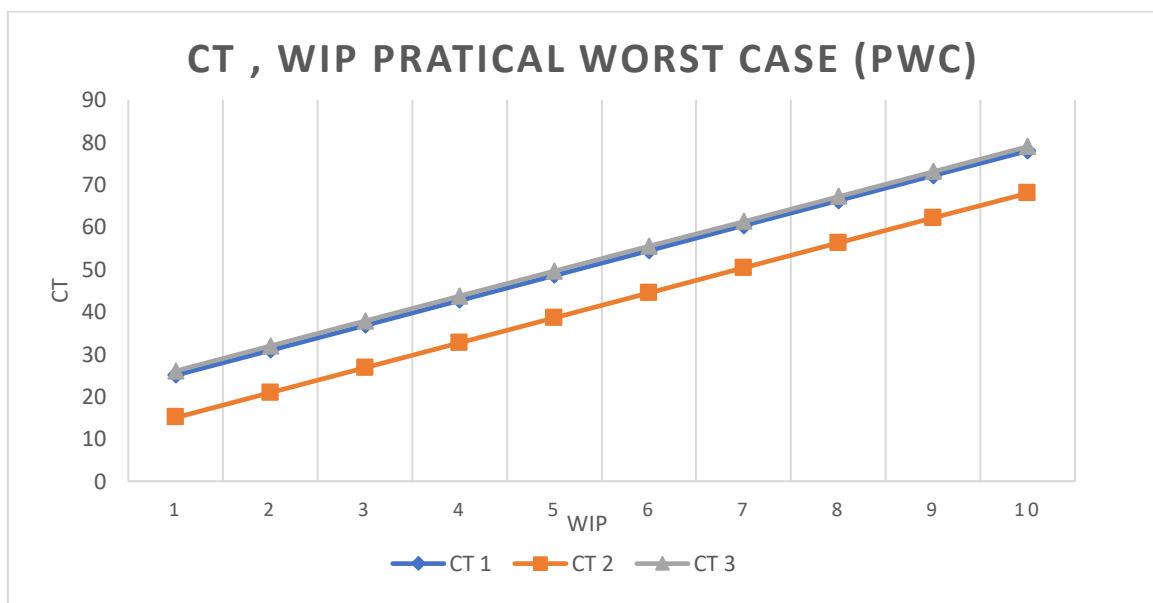


Figure 0.7 : Graphe CT en fonction de WIP pour les trois jobs (Practical Worst Case (PWC))

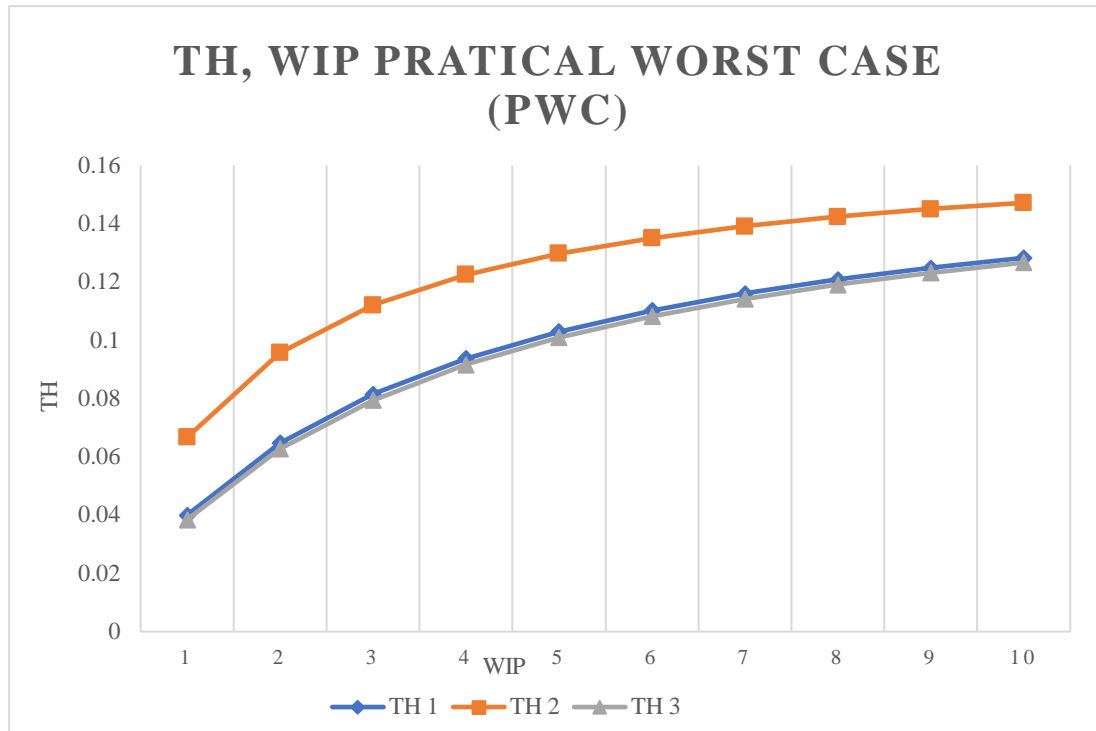


Figure 0.8 : Graphe TH en fonction de WIP pour les trois jobs (Practical Worst Case)

Les figures (3.6 et 3.7) représente CT_i et TH_i en fonction des encours critiques WIP_i , où PWC est interprété comme un point entre le meilleur et le pire des cas possible.

3.6. Comparaison des résultats trouvés par LEKIN

LEKIN est un système de planification développé à la Stern School of Business de l'Université de New York. La plupart du système a été développé et écrit par des étudiants de l'Université de Columbia.

LEKIN a été créé comme un outil pédagogique dont le but principal est d'initier les étudiants à la théorie de la programmation et à ses applications. De plus, l'évolutivité du système est utilisée pour le développement d'algorithmes.

Dans cette partie du travail, nous présentons les différents résultats trouvés à l'aide du logiciel LEKIN de simulation de l'ordonnancement et puis comparons les résultats de ce programme avec les résultats de notre projet :

■ En utilisant la règle SPT :

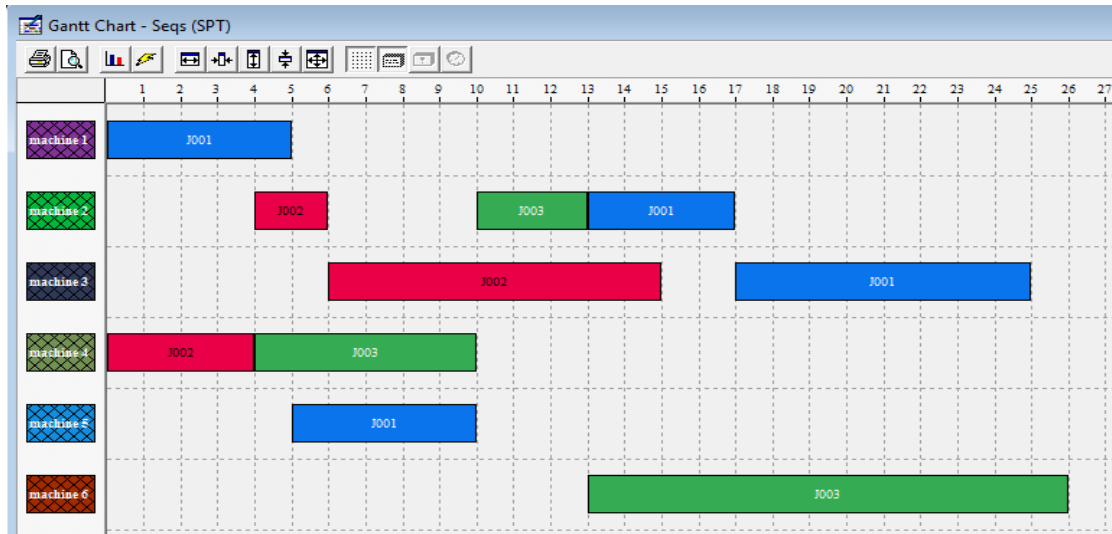


Figure 0.9 : Diagramme de Gantt trouvé utilise la règle SPT

■ En utilisant la règle EDD :

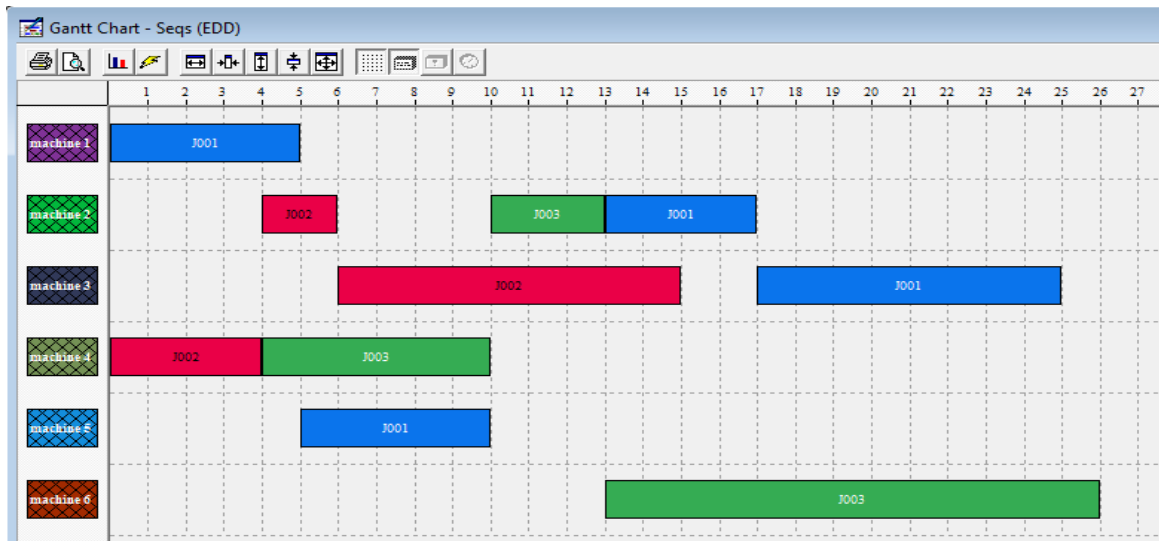


Figure 0.10 :Diagramme de Gantt trouvé utilise la règle EDD

Nous notons que les règles SPT et EDD donnent les mêmes résultats que l'on obtient en appliquant les concepts Factory physics (Trouvé le temps de cycle minimum (T_{0i}) de chaque jobs) contrairement aux résultats obtenus en adoptant les règles LPT, CR et WSPT.

Schedule	Time	C_{max}	T_{max}	ΣU_j	ΣC_j	ΣT_j	$\Sigma w_j C_j$	$\Sigma w_j T_j$
EDD	1	26	26	3	66	66	66	66
SPT	1	26	26	3	66	66	66	66
CR	1	30	30	3	68	68	68	68
WSPT	1	30	30	3	68	68	68	68
LPT	1	29	29	3	72	72	72	72

Figure 0.11 : Critères de performance trouvée par chaque règle.

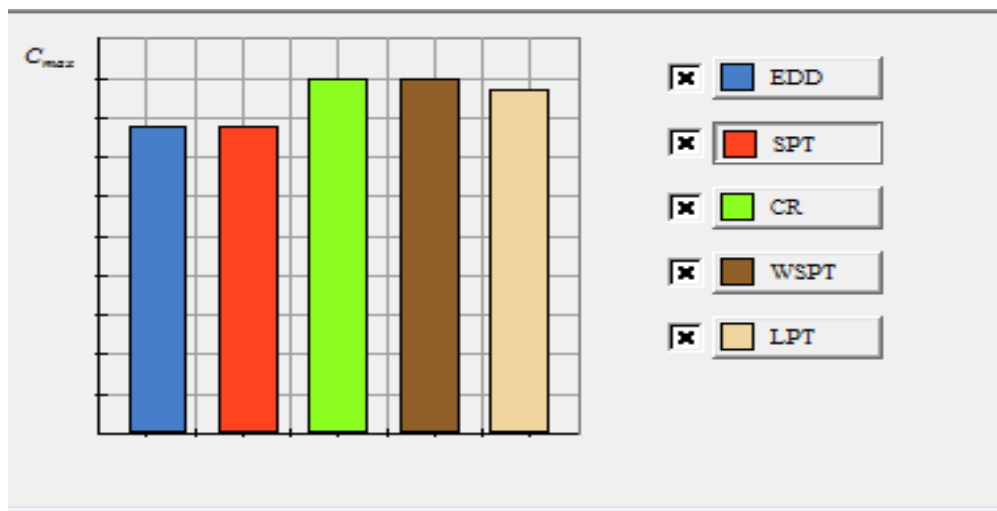


Figure 0.12 : Temps de cycle obtenus par chaque règle

3.7. Conclusion

Dans cette section nous avons présenté une étude approfondie sur la modélisation mathématique d'un atelier job-shop on se basant sur les concepts de la physique des usines. D'où nous avons pu développer et présenter plusieurs équations.

Notre objectif en appliquant ces équations est d'évaluer et d'améliorer les performances d'un système tout en augmentant la production.

De plus, nous avons simulé le système job-shop à l'aide du logiciel LEKIN pour donner une simple comparaison entre quelques règles de gestions, cette simulation nous a donné les mêmes résultats que ceux expliqués dans la dernière partie de ce chapitre.

Chapitre 04 : Simulation et validation des résultats

4.1. Introduction

Le monde est témoin de plusieurs développements permanents de la technologie dans divers aspects, en particulier dans le domaine de la simulation, qui a été identifiée comme l'un des meilleurs moyens d'analyser les processus de production. La simulation est très importante dans le développement industriel, et la principale raison de son utilisation est la possibilité de réaliser des modèles réalistes, adaptés à l'étude de systèmes complexes à grande échelle, et apportant une aide précieuse à la conception, à la gestion et à l'aide à la décision. La simulation est constituée de plusieurs éléments en interaction, car elle peut répondre à certains problèmes lorsqu'un modèle mathématique est introuvable. [13].

Dans ce chapitre, nous présentons notre simulation en utilisant **ARENA** qui est un logiciel de simulation d'événements distinct, développé par Rockwell Automation. [14] ARENA est un environnement facile à utiliser qui offre un bon aperçu et une bonne compréhension de la modélisation, le logiciel Arena permet la :

- ✚ Reproduction de systèmes réels et analyse du comportement d'un système.
- ✚ Valider les options de conception.
- ✚ Mener des analyses et évaluer les alternatives possibles.
- ✚ Identifiez les goulots d'étranglement, estimez les coûts de processus et réduisez les temps de cycle.
- ✚ Planification et allocation des ressources en mode optimal.
- ✚ Obtenir des améliorations significatives de la performance (coûts, qualité, service...).

4.2. Représentation du système simulé

Dans cette section nous allons donner une présentation du modèle simulé par ARENA. Nous avons conçu un modèle ARENA pour simuler le système job-shop étudié présenté dans la section 3 (Figure 3.1).

Le modèle a été simulé sur un temps de simulation de 10000 heures avec 1 réplication pour chaque simulation. La figure 4.1 présente la configuration du système job-shop simulé où on présente les différentes stations de travail et les deux stations de chargement et de déchargement.

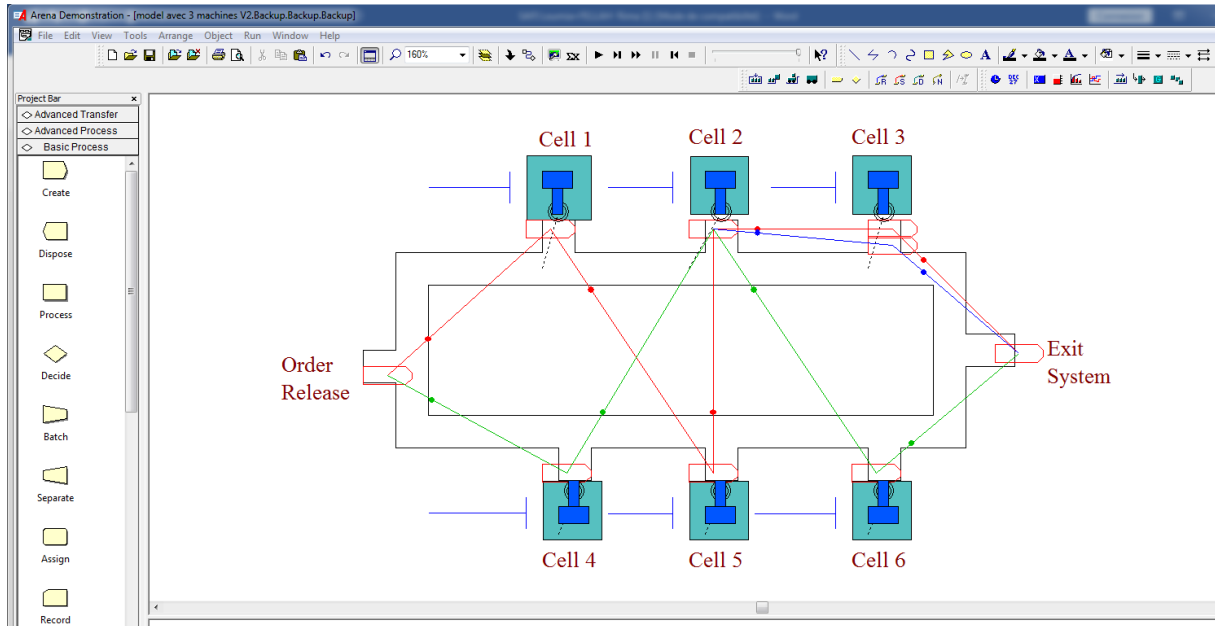


Figure 0.1 : Configuration du système Job -shop

Le modèle simulé dans cette partie représente un atelier à 6 stations, chaque station contient une seule machine, à l'entrée du système nous avons une station de chargement « Order Release » et à la sortie nous avons une autre station de déchargement « Exit System ». Figure (4.1).

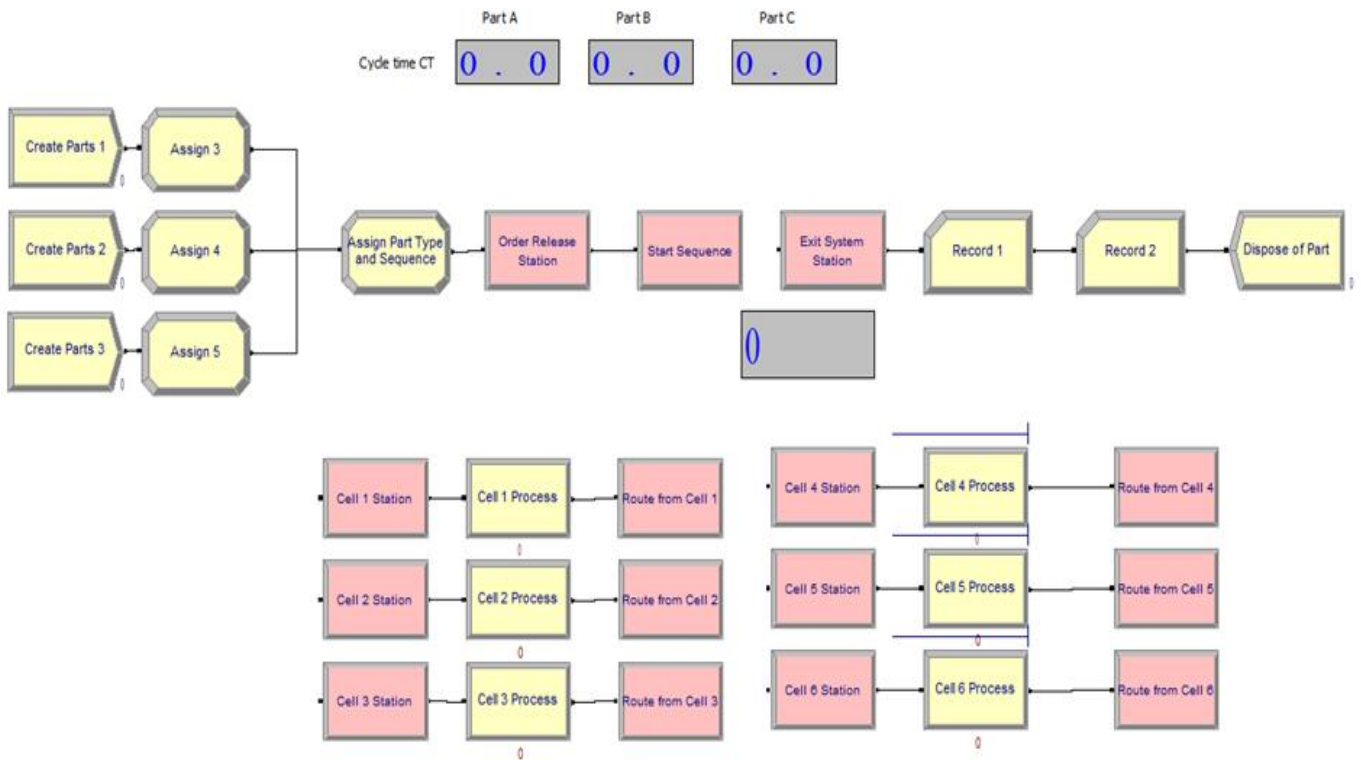


Figure 0.2 : Modèle de simulation

Pour modéliser le système étudié, nous avons utilisé le module Station, ce dernier contient une machine modélisée par un set, comme le montre la figure 4.3.

Set - Basic Process			
	Name	Type	Members
1 ▶	Part Pictures	Entity Picture	3 rows
2	Entity Types	Entity Type	3 rows
3	cycle time of every parts	Tally	3 rows

Double-click here to add a new row.

Figure 0.3 : Configuration du module Set

Nous avons par la suite utilisé le module **ROUTE** pour déplacer les jobs vers les stations suivantes. Nous avons utilisé des séquences bien définies, pour déterminer les différents routages à l'aide de module Séquence figure 4.4. Dans cette simulation nous considérons que le temps de transports est négligeable. Figure 4.5.

	Name	Steps
1	Part 1 Process Plan	5 rows
2	Part 2 Process Plan	4 rows
3 ▶	Part 3 Process Plan	4 rows

Double-click here to add a new row.

Figure 0.4 : Routages suivies par chaque job.

Variable - Basic Process								Initial Values	
	Name	Rows	Columns	Data Type	Clear Option	File Name	Initial Values	Report Statistics	
1 ▶	Transfer Time			Real	System		1 rows	<input type="checkbox"/>	0

Double-click here to add a new row.

Figure 0.5 : Configuration du module Variable

Dans ces sous modèles nous introduisons les différentes données (les temps de traitement, les machines, les indice d'opérations) Voir le tableau 3.1 précédent. Pour déterminer le temps de cycle et le taux de production de chaque job, nous avons ajouté les modules **Record**. Figure 4.6 - 4.7

Un module Record pour enregistrer le temps de cycle pour chaque entité « **Time interval** », pour le faire, nous avons ajouté un module **Assign** au début du modèle avec un attribut (**Attribute**) Temps de cycle qui prend la valeur **Tnow**.

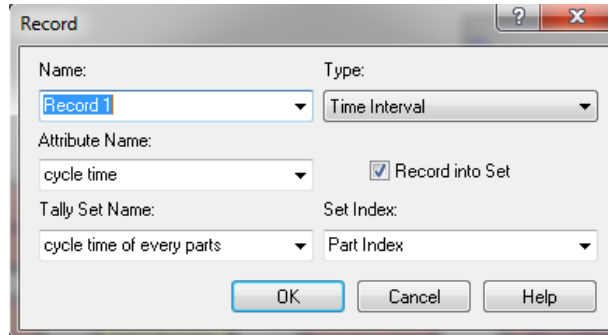


Figure 0.6 : Configuration du module Record 1

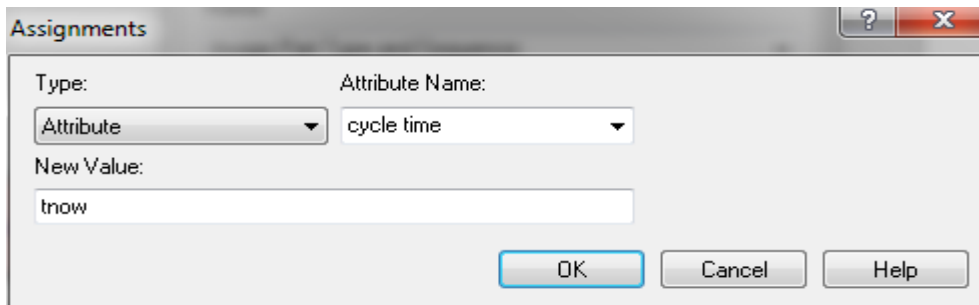


Figure 0.7 : Configuration du Module Assign

Nous avons ajouté un module Record après chaque station, pour calculer le temps entre deux sorties dans la même station « **Time Between** », une fois que ce temps est déterminé, on pourra calculer le taux de production. Figure 4.8

$$TH_i = \frac{1}{\text{Temps entre deux sorties}} \tag{4.1}$$

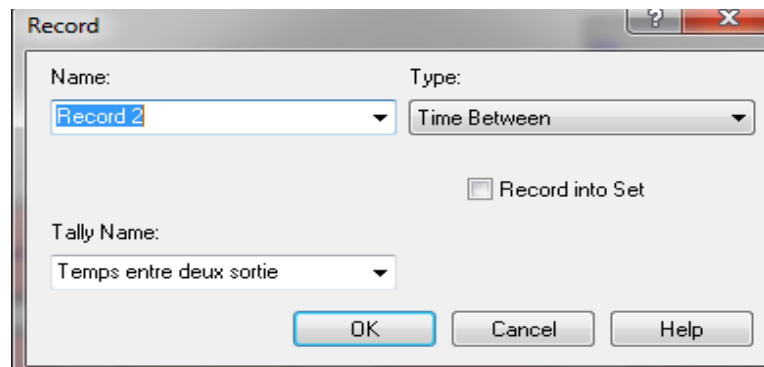


Figure 0.8 : Record Time Between

Ensuite nous introduisons les encours critiques (WIP Total) pour les trois types de jobs à l'aide du module **Statistic**. Figure 4.9

Statistic - Advanced Process						
	Name	Type	Expression	Collection Period	Report Label	Output File
1	Total WIP	Time-Persistent	EntitiesWIP(Part 1) + EntitiesWIP(Part 2) + EntitiesWIP(Part 3)	Entire Replication	Total WIP	Total WIP History One Long Run.dat

Double click here to add a new row

Figure 0.9 : Configuration du module Statistic

4.3. Résultat de simulation

Les résultats ont été obtenus à partir de la sortie Arena pour les mesures de performance spécifiées par l'utilisateur. Les mesures de performances sont conçues pour comprendre les performances du système au lieu des processus et entités individuels. Les mesures de performance sont :

1. Le temps de cycle.
2. Le taux de production.
3. Les encours Critique totale (WIP Total).

User Specified				
Tally				
Between	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
Temps entre deux sorties	5.5000	(Insufficient)	1.0000	10.0000
Time Persistent				
Time Persistent	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
Total WIP	0.00660000	(Insufficient)	0.00	3.0000
Usage				
None	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
Tally 1	25.0000	(Insufficient)	25.0000	25.0000
Tally 2	15.0000	(Insufficient)	15.0000	15.0000
Tally 3	26.0000	(Insufficient)	26.0000	26.0000

Figure 0.10 : Résultats de la simulation de système

Utilisons le modèle simulé sous Arena nous trouvons un $CT_1 = 25$ min, $CT_2 = 15$ min et $CT_3 = 26$ min (la simulation commence à instant égal à 0 min).

4.3.1. Taux d'utilisation des machines

Le taux d'utilisation des machines est un critère très important dans la mesure des performances d'un système de production.

Sa formule est :

$$\text{Taux d'utilisation des machines} = \frac{\text{Nombre d'heure d'utilisation de la machine}}{\text{Temps total}}$$

Le graphe dans la figure suivante représente les taux d'utilisation des machines dans notre système.

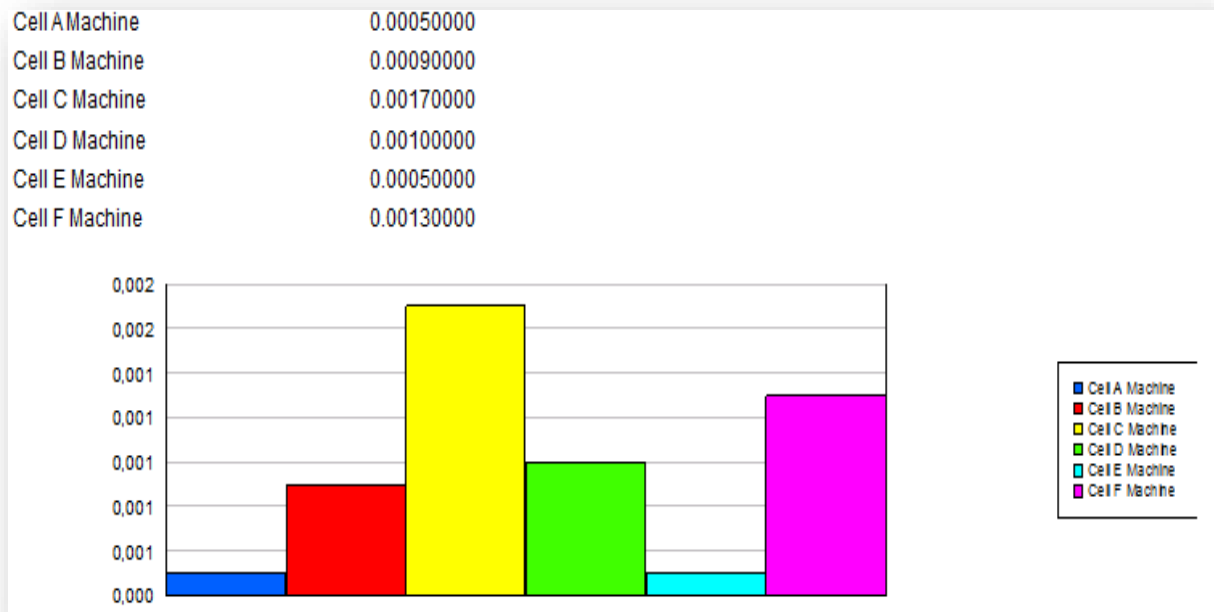


Figure 0.11 : Taux d'utilisation des machines

D'après le graphique, nous voyons que la machine avec le taux d'utilisation le plus élevé est la machine trouvée dans la cellule C (Cell C Machine) avec un taux de production minimum ce qui indique clairement que cette machine représente la machine goulot dans notre système.

4.3.2. Taux de production

Dans ce paragraphe nous présenterons les résultats sur le taux de production. Ces résultats sont la moyenne de dix répétitions pour chaque modèle obtenu après simulation. Le taux de production pour ce système est calculé en divisant un sur le temps entre deux sorties.

Le Figure 4.10 montre que le temps entre deux sorties de chaque job égale à 5.5.

Les résultats obtenus du taux de production sont les mêmes dans tous les jobs c'est-à-dire que le taux de production est de $1/5.5$.

Le Taux de production du système TH, en utilisant l'équation (4.1) :

$$TH_1 = \frac{1}{5.5} = 0.18 \text{ Pièce/min}$$

$$TH_2 = \frac{1}{5.5} = 0.18 \text{ Pièce/min}$$

$$TH_3 = \frac{1}{5.5} = 0.18 \text{ Pièce/min}$$

$$TH = \sum_{i=1}^n (TH_i)$$

$$TH = TH_1 + TH_2 + TH_3$$

$$TH = 0.18 + 0.18 + 0.18 = \mathbf{0.54 \text{ P/min}}$$

4.3.3. Temps de cycle

Dans cette section nous allons montrer les résultats liés au temps de cycle de notre système, la figure suivante (Figure 4.10) nous montre que le temps de cycle de job 3 est supérieur au temps de cycle de job 1 et de job 2. Cela est dû à l'augmentation des capacités des files d'attente, ce qui augmente le temps de cycle.

Donc nous calculons le temps de cycle de système à étudier :

$$CT = \text{Max}(CT_{J_1}, CT_{J_2}, CT_{J_3}, i = 1, 2, 3) = \text{Max}(25, 15, 26) = \mathbf{26 \text{ min}}$$

La loi de Little est donnée par :

$$WIP_{ilk} = \text{Max}_{i=1..n}(CT_i) \times \sum_{i=1}^n (TH_i)$$

$$WIP_{ilk} = 26 \times 0.1818 = \mathbf{4.7268 \text{ Pièces}}$$

4.4. Temps d'achèvement de chaque Job :

Pour valider les résultats suggérés dans la partie précédente, dans cette partie de notre travail, nous avons fait de la modélisation et de la simulation ininterrompues et aussi en ignorant complètement les temps de manutention attribués par le transport afin de comparer les résultats donnés par le logiciel ARENA.

Pour mesurer les performances et valider les résultats de notre système, nous calculons le temps de cycle **CT** pour chaque job proposé dans notre exemple dans leur meilleur et pire cas et les comparons avec les résultats que nous avons calculés manuellement dans le chapitre précédent, ce qui est représenté par les graphiques suivants :

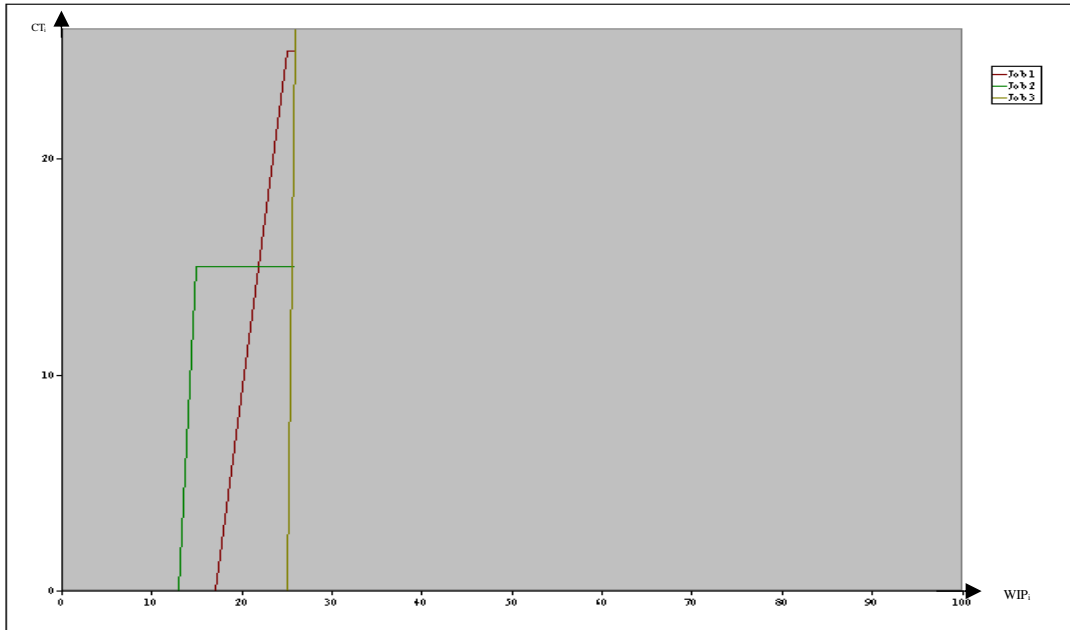


Figure 0.12 : Variation des temps de cycle CT_i en fonction des encours critique WIP_i

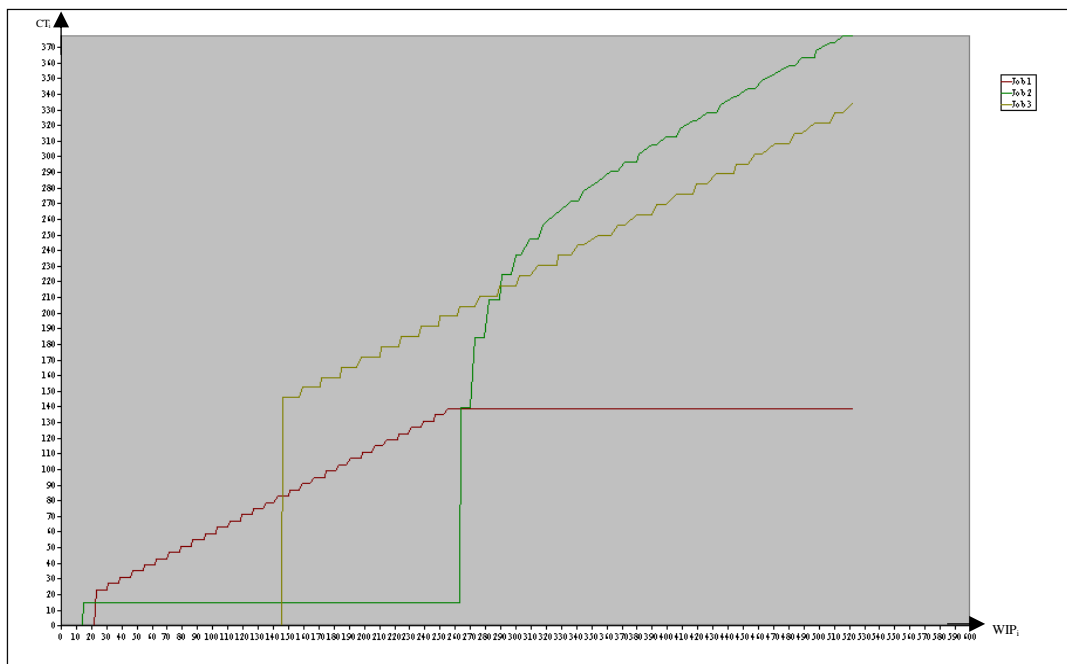


Figure 4.13 : Variation des temps de cycle CT_i en fonction des encours critique WIP_i (Arrivée par lot)

Ces deux graphes (4.12 - 4.13) montrent le temps de cycle en fonction des encours critiques (WIP). Nous avons obtenu le temps de cycle minimum (T_0) pour chaque job pour un niveau d'encours donnée w comme suit :

$$T_{0_1}=25 \text{ min}, T_{0_2}=15 \text{ min}, T_{0_3}=26 \text{ min}.$$

D'après les résultats présentés dans la figure (4.13), nous remarquons que le temps de cycle ne cesse d'augmenter en raison de 30 pièces par lot pour chaque job, ce qui entraîne un temps entre les sorties supérieur de 5,7079. Avec ces résultats, le système est au pire cas possible.

Ces résultats sont dus à :

- Taux de production diminue $\frac{1}{5.7079}$ Pièce / min.
- Taux d'utilisation élevé de la machine.
- Les niveaux WIP sont élevés 2.5530, cela est expliqué par l'augmentation de l'utilisation des machines et la présence importante des pièces dans le système lors de l'utilisation.
- L'augmentation du temps de traitement brut T_0 pour chaque job (a un effet significatif sur le temps de cycle minimum) telle que :
- $T_{0_1} = 139 \text{ min}, T_{0_2} = 377.5 \text{ min}, T_{0_3} = 334.5 \text{ min}.$
- Tandis que l'augmentation de la r_b peut avoir un effet significatif (augmentation le temps de cycle), de sorte que : $r_b= 5.1$

Tous ces critères cités précédemment vont augmenter le temps de cycle, puisque les pièces vont rester plus de temps dans le système.

Les meilleurs cas et le pire cas possible se produisent dans les systèmes sans aucun caractère aléatoire.

Les pires cas pratique résultent d'une forte variabilité causée par le contrôle stochastique.

4.5. Comparaison des Résultats

Notre objectif d'étude consistait principalement à analyser le système de production du type Job-shop qui vise à augmenter sa productivité, tout en réduisant les temps de cycle par job et en minimisant les encours, Pour cela nous avons fait recours à l'outil de simulation ARENA qui permet de modéliser, simuler et analyser la performance d'un système de production sous son aspect dynamique. Nous avons aussi intégré les concepts de la Factory physics pour bien étudier notre système.

Notre simulation de système de production sans panne nous a montré que notre système était dans les meilleurs cas possibles, puis il est devenu dans le pire des cas, ces résultats montrent que la forte volatilité résultant d'un mauvais contrôle car nous observons que les performances du système diminuaient encore :

$$\mathbf{CT \text{ (Best)} < CT \text{ (Pire cas)}}$$

$$\mathbf{TH \text{ (Best)} > TH \text{ (Pire cas)}}$$

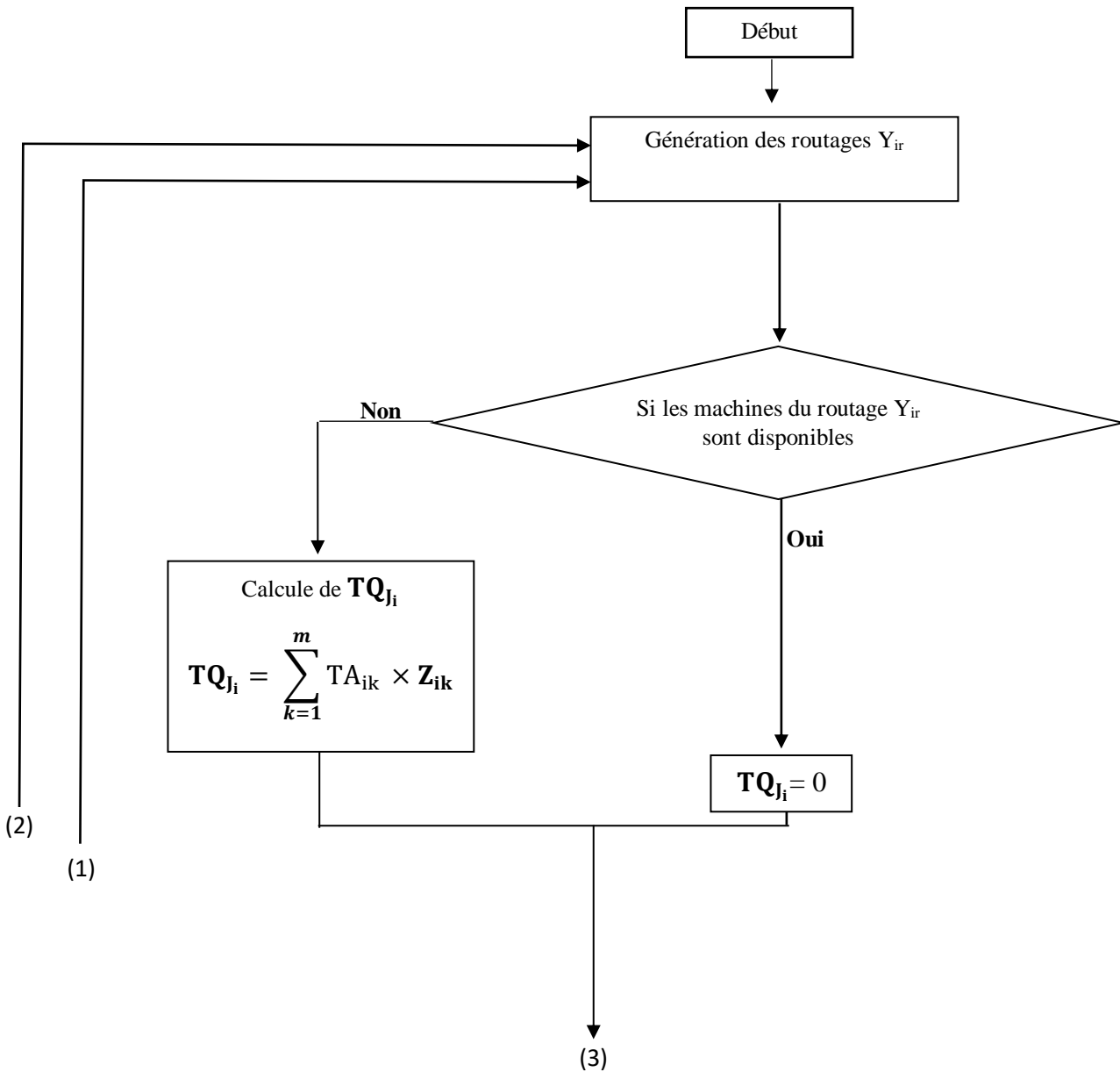
$$\mathbf{WIP \text{ (Best)} < WIP \text{ (Pire cas)}}$$

À partir de ces résultats, nous avons constaté que la diminution du rendement était due au temps d'attente plus élevé dû à la troisième machine qui est la machine goulot du système. Nous avons remarqué aussi que les WIP sont élevés ce qui réduit le temps de

traitement brut T_0 . Pour cela nous avons proposé une solution d'amélioration de performances.

1.5.1. Propositions d'amélioration

Dans le but de minimiser le temps de cycle et améliorer la performance du notre système, nous avons développé alors l'organigramme suivant.



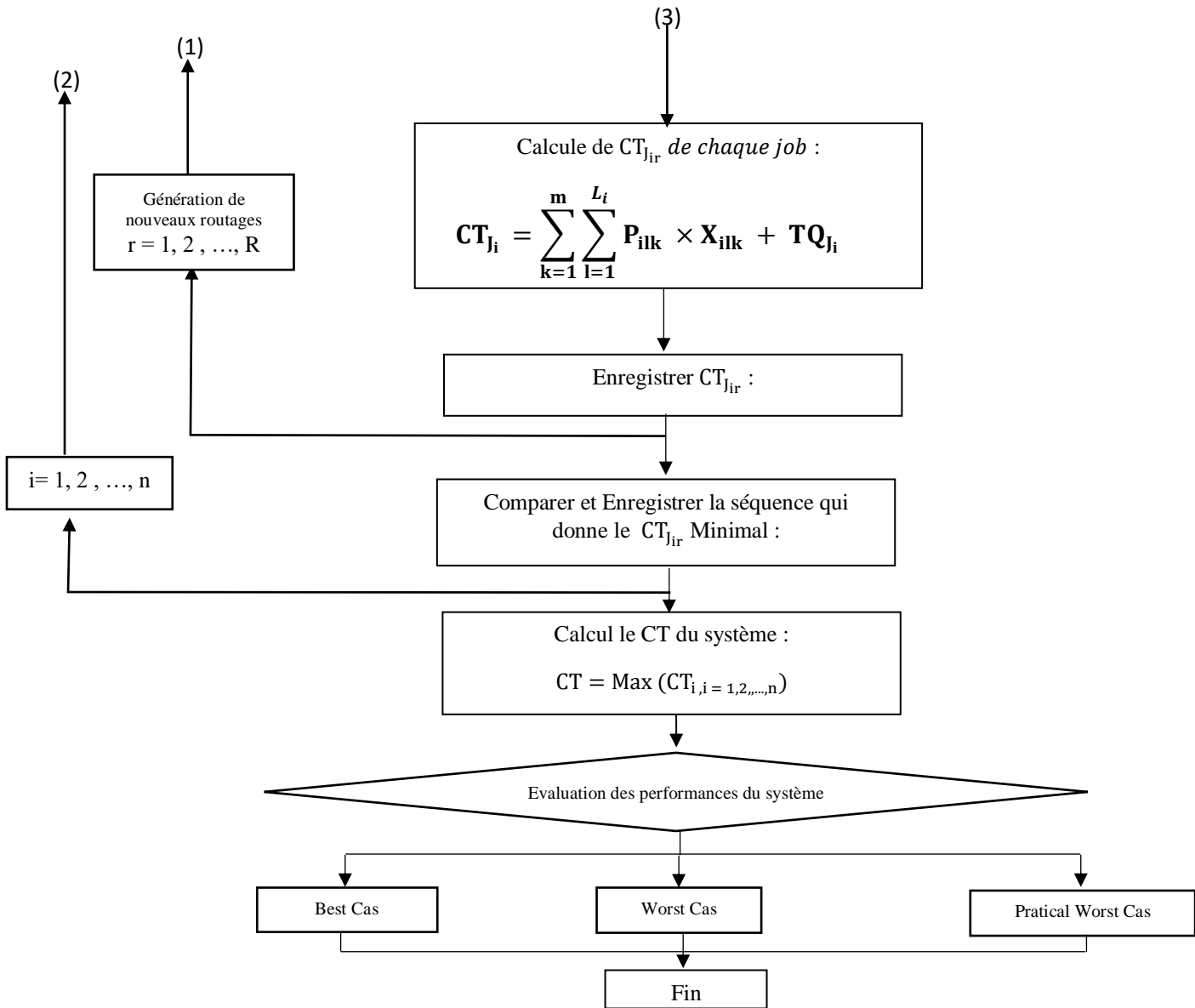


Figure 0.13 : Algorithmes proposée

Sur la base des résultats obtenus, nous obtenons de nouveaux routages ou bien de nouvelles séquences pour les trois jobs. La simulation avec les nouveaux routages trouvés :

Job 1 : M3-M1-M2-M5,

Job 2 : M2-M3-M4,

Job 3 : M4-M6-M2,

Nous donnons les résultats montrés sur la figure (Figure 4. 14).

User Specified				
Tally				
Between	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
Temps entre deux sorties	4.5000	(Insufficient)	2.0000	7.0000
Time Persistent				
Time Persistent	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
Total WIP	0.00610000	(Insufficient)	0.00	3.0000
Usage				
None	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
Tally 1	22.0000	(Insufficient)	22.0000	22.0000
Tally 2	15.0000	(Insufficient)	15.0000	15.0000
Tally 3	24.0000	(Insufficient)	24.0000	24.0000

Figure 4.14 : Résultat de la simulation des nouveaux routages

Les résultats de la simulation, il est clair que l'utilisation de la troisième machine a diminué, en équilibrant son l'utilisation avec les autres machines. Figure 4.15

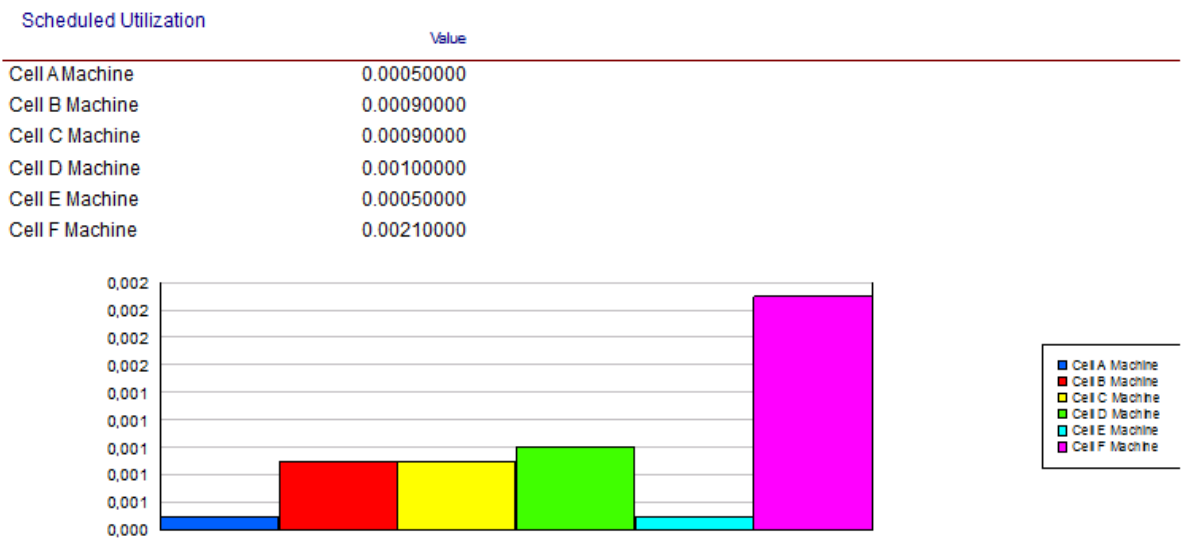


Figure 0.15 : taux d'utilisation de nouveau routage

Après avoir utilisé les nouveaux routages sur le modèle simulé sous Arena, nous avons trouvé :

- Le taux de production de la machine goulot : $r_b = 0.09$
- Le taux de production égale à :

$$TH_1 = \frac{1}{4.5} = 0.22 \text{ P/min}$$

$$\mathbf{TH}_2 = \frac{1}{4.5} = \mathbf{0.22 P/min}$$

$$\mathbf{TH}_3 = \frac{1}{4.5} = \mathbf{0.22 P/min}$$

$$\mathbf{TH} = \sum_{i=1}^n (\mathbf{TH}_i) = 0.22 + 0.22 + 0.22 = \mathbf{0.66 Pièces / min}$$

- **Le temps de cycle de système :**

$$\mathbf{CT} = \text{Max} (\mathbf{CT}_1, \mathbf{CT}_2, \mathbf{CT}_3) = \text{Max} (22, 15, 24) = \mathbf{24 min}$$

On remarque que le temps de cycle diminue par rapport au précédent, et cela peut s'expliquer par la diminution de l'utilisation de la file d'attente .

- **L'encours critique :**

En utilisant l'équation (3.8) :

$$\mathbf{W}_0 = (0.17 \times 22) + (0.17 \times 15) + (0.17 \times 24) = 1.98 + 1.35 + 2.16 =$$

$$\mathbf{W}_0 = \mathbf{5.49 Pièces}$$

- **La loi de Little :**

$$\mathbf{WIP}_{ilk} = \text{Max} (\mathbf{CT}_{J_i, i=1,2,\dots,n}) \times \sum_{i=1}^n (\mathbf{TH}_i)$$

$$\mathbf{WIP}_{ilk} = 24 \times 0.66 = \mathbf{16 Pièces}$$

La proposition de prendre des nouveaux routages a donné alors de bons résultats. Les résultats de la simulation ont démontré une augmentation importante du taux de production avec un temps de cycle très réduit et un nombre d'encours minimisé.

Amélioration au niveau du taux de production :

$$\mathbf{TH}_{\text{Best}} < \mathbf{TH}_{\text{Best}} (\text{proposition})$$

$$0.54 \text{ Pièces /min} < 0.66 \text{ Pièces /min}$$

Amélioration au niveau du temps de cycle :

$$\mathbf{CT}_{\text{Best}} > \mathbf{CT}_{\text{Best}} (\text{Proposition})$$

$$26 \text{ min} > 24 \text{ min}$$

Amélioration au niveau d'encours :

$$\mathbf{WIP}_{\text{Best}} > \mathbf{WIP}_{\text{Best}} (\text{Proposition})$$

$$16 \text{ Pièces} > 13.26 \text{ Pièce}$$

Nous remarquons aussi que les nouveaux routages permettent d'avoir une diminution importante dans le nombre d'encours dans le système.

4.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons simulé le système de production dans le cas stochastique sans pannes, à partir des résultats et les interprétations obtenus, nous avons pu déterminer l'état de notre système en appliquant les lois de Factory physics.

Les résultats obtenus ont montré que le modèle de simulation donne des résultats adéquates avec les résultats calculés théoriquement dans le chapitre précédent. Pour faire face aux taux de goulot d'étranglement élevés, l'augmentation des WIP dans le système et les temps perdus dans les files d'attente dans notre système, nous avons proposé un algorithme pour générer de nouveaux routages. Ce dernier nous a permis de diminuer le temps de cycle, d'augmenter le taux de production et d'équilibrer l'utilisation des machines.

Conclusion générale

Notre projet de fin d'étude nous a permis de développer nos connaissances et exploiter nos compétences.

Le travail réalisé lors de ce mémoire rentre dans le cadre de la maîtrise du système de production, nous avons synthétisé des équations de calcul de différents paramètres permettant d'évaluer les performances d'un système job shop en exploitant des acquis sur le système flow shop. Nous avons d'abord étudié ce dernier système et maîtrisé ses paramètres.

Nous avons parlé de la variabilité parce qu'elle est un facteur très sensible qu'il influence les performances du système.

Au cours de travail nous avons développé plusieurs équations de calcul de différents paramètres permettant d'évaluer les performances d'un atelier job-shop on se basant sur les concepts de la physique des usines.

Après avoir approuvé et démontré nos équations nous avons proposé des exemples numériques.

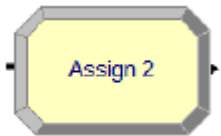
Par la suite, nous avons validé nos résultats à l'aide de la simulation sur ARENA, par le Montage numérique d'un système simple flow-shop et après avoir tiré les paramètres résultants nous l'avons développé en un système final job-shop. Par la suite nous avons proposé un algorithme pour générer de nouveaux routages. Ce dernier nous a permis d'améliorer les performances de notre système.

Comme perspective nous souhaitons synthétiser de équations permettant de calculer le temps d'attente, intégrer la variabilité du système et sélectionner des routages alternativement.

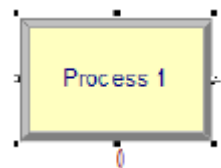
ANNEXE



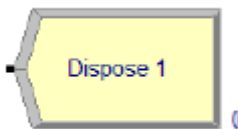
Ce module représente le point de départ des entités



Ce module est utilisé pour attribuer de nouvelles valeurs aux variables, aux attributs, aux types et aux images d'entité ou à d'autres variables du système



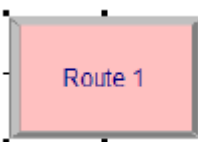
Ce module est conçu comme la principale méthode de traitement dans la simulation.



Ce module est conçu comme le point final pour les entités d'un modèle de simulation.



Le module Station définit une station (ou un ensemble de stations) correspondante à un emplacement physique ou logique où le traitement a lieu.



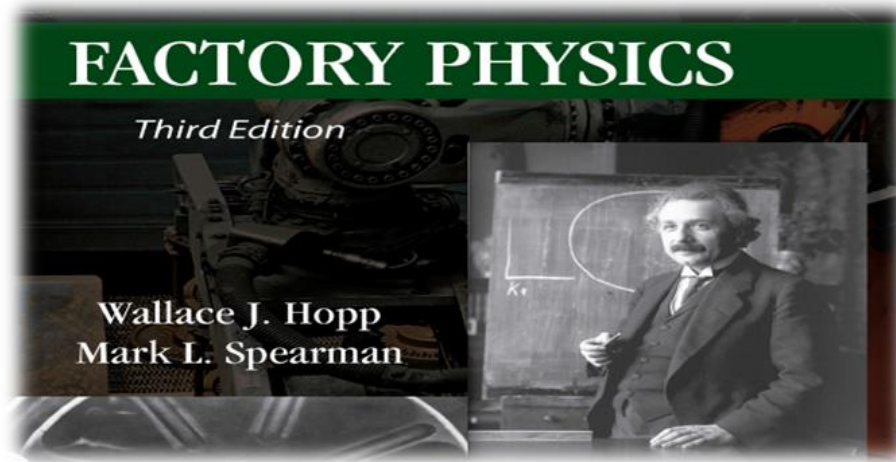
Le module d'acheminement transfère une entité vers une station spécifiée, ou la station suivante dans la séquence de visite des stations définie pour l'entité. Un délai pour le transfert vers la station suivante peut être défini.

Livre de Factory physics

« Factory Physics » est un livre écrit par Wallace Hopp et Mark Spearman, qui fournit une description systématique (une sorte d'ensemble de lois physiques) du comportement de base des systèmes de fabrication, et qui permet aux managers de travailler avec les tendances des systèmes de fabrication naturels pour :

Identifier les opportunités d'amélioration du système actuel.

Concevoir de nouveaux systèmes efficaces.



Bibliographies

- [1]: Fontanili, fFanck.” integration d’outil de simulation et d’optimisation pour le pilotage d’uneligned’assemblagemultiproduit a transfertasynchrone “Thèse de doctorat, Université de Paris XIII, 1999
- [2]: « Projet fin d’étude simulation d’unchaine flexible d’assemblage avec ARENA, M^{elle} BENDAHMANE Zhor 1999-2000 ».
- [3] : N. S. S. Anil kumar, Introduction to production and operation management, New age international publishers, 2008.
- [4]: N. S. S. Anil kumar, Introduction to production and operation management, New age international publishers, 2008.
- [5]: Conway, R., Maxwell, W., McClain, J. O., & Thomas, L. J. (1988). “The Role of Work-In-Process Inventory in Serial Production Lines.” Operations Research, Vol. 36, No. 2
- [6]: Hopp, W.J and Speaeman, M_L. (2001). Factory Physics Manufacturing.Management. Irwin/ McGraw-Hill.
- [7]: PENTILLÄ, M. J. Reducing variability in a semiconductor manufacturing environment. Department of Electrical Engineering and Computer Science. Boston, Massachusetts Institute of Tehcnology. Master: 75, 2005.
- [8]: Hopp, W. J. and M. L. Spearman. 1996. Factory Physics. Chicago, IL: IRWIN.
- [9]: STANDRIDGE, C. R. How factory physics helps simulation. Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference, 2004.
- [10]: Hopp, W. J., and M. L. Roof. 1998. "Quoting Manufacturing Due Dates Subject to a Service Level Constraint," Technical Report, Department ofIndustrial Engineering, Northwestern University, Evanston, IL.
- [11]: Little, J. (s.d.). "A Proof of the Queuing Formula: $L=AW$ ", Operations Research 9, (3). 383-387.
- [12]: Hopp, W.J, and Spearman, M_L, and Woodruff, D. L. (1990). "Practical Strategies forb Lead Time Reduction " American Society of Mechanical Engineers Manufacturing Review, (Vol. 3, No.2).

- [13]: G. Habchi, "Conceptualisation Et Modélisation Pour La Simulation Des Systèmes De Production," Université De Savoie, 2001.
- [14]: <https://Ridhaderrouiche.Com/Arena-Simulation-version-2020> /R. Derrouiche, "Arena Simulation," 2019..Consulté le:20/08/2020

ملخص

أصبحت أنظمة الإنتاج أكثر تعقيداً، ولهذا السبب يتم استخدام طرق مختلفة لفهم وتحليل سلوكهم وتقييم أدائهم. فيزياء المصنع هي "وصف منهجي للسلوك الأساسي لأنظمة الإنتاج" كما وصفها المؤلفان Hopp. J Wallace و Spearman. L Mark وهي واحدة من أكثر الأساليب شمولاً المستخدمة لفهم أنظمة الإنتاج. الهدف الرئيسي من هذا المشروع هو تحسين وتطوير نظام «Job Shop»، انطلاقاً من نظام «Flow Shop»، ذلك باستخراج المعادلات والنماذج الرياضية اعتماداً على أسس ومبادئ كتاب «Factory Physics» من أجل الوصول إلى تحليل وتفسير متعمق ونتائج الأداء لنظامنا المراد دراسته.

الكلمات الرئيسية: النمذجة، المحاكاة، معدل الإنتاج، وقت الدورة، التقدم الحرج، مسار متعدد.

Résumé

Les systèmes de production deviennent de plus en plus complexes, c'est pourquoi différentes méthodes sont utilisées pour comprendre et analyser leur comportement et évaluer leurs performances. Comme le décrivent les auteurs **Wallace J. Hopp et Mark L. Spearman**, la Factory physics est « une description systématique du comportement fondamental d'un système de production » et l'une des approches les plus complètes pour comprendre les systèmes de production. L'objectif principal de ce projet est de bien comprendre, d'améliorer et de développer une étude sur le système "Job Shop", sur la base d'un système "Flow Shop". Nous allons extraire la plupart des équations mathématiques et des modèles basés sur les principes du livre "Factory Physics" afin d'obtenir une étude approfondie sur les performances de notre système.

Mots clés : modélisation, simulation, taux de production, temps de cycle, encours critique, Job shop, loi de Little.

Abstract

Production systems are becoming more and more complex, which is why different methods are used to understand and analyse their behaviour and evaluate their performance. Factory physics is "a systematic description of the basic behaviour of production systems" as described by authors **Wallace Hopp and Mark L. Spearman** - and one of the most comprehensive approaches used to understand production systems. The main objective of this project is to fully understand, improve and develop a study on the "Job Shop" system, based on a "Flow Shop" system. We will extract most of the mathematical equations and models based on the principles of the book « Factory Physics » book, in order to obtain an in-depth study on the performance of our system.

Keywords: Modelling, Simulation, production rate, Cycle time, Work In Process (WIP), Job Shop.