

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRY OF HIGHER EDUCATION  
AND SCIENTIFIC RESEARCH

HIGHER SCHOOL IN APPLIED SCIENCES  
--T L E M C E N--



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
École Supérieure en  
Sciences Appliquées  
المدرسة العليا في العلوم التطبيقية  
-تلمسان-

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie industriel  
Spécialité : Management industriel et logistique

Présenté par : DJAMI Zine Eddine

Thème

**Évaluation de performance des  
systèmes de production  
reconfigurables : Une analyse  
comparative sur les différents modèles  
de reconfiguration - cas livingPacket**

Soutenu publiquement, le 03 / 07 / 2024, devant le jury composé de :

Mme. Imen KOULOUGHLI	MCB	(ESSA-Tlemcen)	Président
M. Fouad MALIKI	MCA	(ESSA-Tlemcen)	Directeur de mémoire
M. Olivier CARDIN	Maître de conférences	(Université de Nantes)	Co- Directeur de mémoire
Melle. Latéfa GHOMRI	Professeur	(Univ-Tlemcen)	Examineur 1
M. Pierre CASTAGNA	Professeur	(Université de Nantes)	Examineur 2
Melle. Yasmina DALI YOUCEF	Doctorante	(Université de Nantes)	Invité

Année universitaire : 2023 / 2024

# Remerciements

Tout d'abord, je tiens à exprimer mes plus sincères remerciements à ma très chère maman, ainsi qu'à mes sœurs et mes frères. Leur affection inconditionnelle, leur soutien indéfectible et leurs encouragements m'ont toujours donné la force de surmonter les défis rencontrés tout au long de ce parcours.

Je remercie profondément notre chère Monsieur Fouad MALIKI, mon directeur de thèse et chef de filière, pour son encadrement exceptionnel. Ses conseils avisés, son soutien constant, et sa disponibilité m'ont guidé tout au long de ce projet. Sa vision claire et ses orientations ont été cruciales pour mener à bien ce travail.

Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur Olivier CARDIN, mon co-encadrant à l'IUT de Nantes. Sa rigueur scientifique, son humour, et ses précieux conseils ont enrichi ce projet. Sa disponibilité et son engagement dans mes recherches ont été des sources d'inspiration et de soutien inestimables.

Je souhaite également remercier Yasmina DALI YUCEF, doctorante au LS2N, et mon superviseur tout au long de mon stage de fin d'études. Sa supervision attentive et son soutien moral ont grandement contribué à la réussite de ce travail. Sa patience et sa compréhension ont été particulièrement précieuses dans les moments critiques de ce projet.

Également, je remercie les autres membres du jury Mme Imen KOULOUGHLI, Melle Latéfa GHOMRI et M Pierre CASTAGNA pour l'amélioration de la qualité de ce travail à travers leurs remarques judicieuses, qui vont permettre l'essor vers de nouvelles perspectives.

Un remerciement spécial à l'ensemble des enseignants de l'ESSAT, ainsi qu'aux membres du laboratoire LS2N, pour leur accueil chaleureux et leur aide précieuse.

Enfin, je tiens à remercier tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire. Votre soutien, qu'il soit académique, matériel, ou moral, a été crucial pour la réussite de ce mémoire. À tous, je vous adresse mes plus sincères remerciements.

# Résumé

Ce mémoire explore l'optimisation des systèmes de production reconfigurable dans le cadre du projet RODIC en utilisant la simulation des systèmes à événements discrets (SED) et les indicateurs clés de performance (KPI). En simulant différentes configurations d'un système de production simplifié pour le projet de recherche RODIC via FlexSim, Le travail est basé sur une évaluation des effets de reconfiguration pour ce système par un changement de configuration matérielle et logique de ressources et de comportement des opérateurs, en utilisant des métriques comme la productivité, le taux de défauts, et l'utilisation des ressources. Tout en examinant l'impact de changement de valeur d'un paramètre qui est le nombre de palettes utilisé. Les résultats montrent que l'ajustement précis de ce paramètre pour chaque configuration réalisée conduit à une amélioration notable des performances du système, mettant en évidence les meilleures stratégies pour l'optimisation des processus industriels.

**Mots clés :** reconfiguration, système de production, indicateur de performances, configuration, évaluation de performance.

## Abstract

This thesis explores the optimisation of reconfigurable production systems for the RODIC project using discrete event system (DES) simulation and key performance indicators (KPIs). By simulating different configurations of a simplified production system for the RODIC research project via FlexSim, the work is based on an evaluation of the effects of reconfiguration for this system by changing the hardware and logical configuration of resources and operator behaviour, using metrics such as productivity, defect rate, and resource utilisation. At the same time, we examined the impact of changing the value of one parameter, the number of pallets used. The results show that fine-tuning this parameter for each configuration leads to a significant improvement in system performance, highlighting the best strategies for optimising industrial processes.

**Keywords:** reconfiguration, production system, performance indicator, configuration, performance evaluation.

## ملخص

(DES) باستخدام محاكاة نظام الأحداث المنفصلة RODIC تستكشف هذه الأطروحة تحسين أنظمة الإنتاج القابلة لإعادة التشكيل لمشروع RODIC البحثي لمشروع RODIC ومن خلال محاكاة تكوينات مختلفة لنظام إنتاج مبسط لمشروع (KPIs) ومؤشرات الأداء الرئيسية ، يستند العمل على تقييم آثار إعادة التشكيل لهذا النظام من خلال تغيير التكوين المنطقي للموارد وسلوك المشغل، FlexSim عبر نظام باستخدام مقاييس مثل الإنتاجية ومعدل العيوب واستخدام الموارد. وفي الوقت نفسه، قمنا بفحص تأثير تغيير قيمة أحد البارامترات، وهو عدد المنصات المستخدمة. أظهرت النتائج أن الضبط الدقيق لهذه المعلمة لكل تكوين يؤدي إلى تحسن كبير في أداء النظام، مما يسלט الضوء على أفضل الاستراتيجيات لتحسين العمليات الصناعية.

**الكلمات المفتاحية :** إعادة التشكيل، نظام الإنتاج، مؤشرات الأداء، التكوين، تقييم الأداء

# Contents

<b>1</b>	<b>Généralités sur les systèmes de production reconfigurable</b>	<b>9</b>
1	Introduction.....	9
2	Définition d'un système de production .....	9
3	les systèmes de production traditionnels .....	11
3.1	DML - ligne de production dédiée .....	11
3.2	FMS - système de production flexible .....	11
4	système de production reconfigurable.....	12
4.1	caractéristiques essentielles d'un système de production reconfigurable .	13
4.2	Machines reconfigurables .....	14
5	comparaison entre les différents systèmes de production .....	15
<b>2</b>	<b>Indicateurs clés de performance dans les systèmes de production</b>	<b>18</b>
1	Introduction.....	18
2	Définition des indicateurs clés de performance.....	18
2.1	Caractéristiques des KPI efficaces (SMART) .....	19
3	Types des indicateurs de performance clés.....	20
3.1	KPI financiers.....	20
3.2	KPI de performance opérationnelle .....	21
3.3	KPI de qualité.....	21
3.4	KPI de flexibilité.....	21
3.5	KPI de durabilité.....	21
4	rôle des indicateurs de performances clés.....	22
5	Importance des indicateurs clés de performance dans les RMS .....	22
5.1	Optimisation des processus.....	23
5.2	Suivi de la performance en temps réel.....	23
5.3	Évaluation de la flexibilité et de l'agilité .....	23
5.4	Amélioration continue.....	23
6	Les KPI utilisés pour évaluer les RMS .....	23
6.1	Productivité .....	23
6.2	Qualité.....	23
6.3	Flexibilité .....	23
6.4	Coût .....	24
<b>3</b>	<b>Cas d'étude simplifié RODIC</b>	<b>25</b>
1	Présentation RODIC.....	25
2	Description du système de production étudié.....	26
3	description du modèle de simulation .....	27
3.1	Initialisation .....	27
3.2	poste 1.....	28
3.3	poste 2 et 3 .....	29
3.4	poste 4.....	30

4	Indicateurs de performance.....	31
4.1	Taux d'utilisation de chaque poste (% du temps total).....	31
4.2	Nombre de produits entrés/sortis/encours.....	32
4.3	Évolution du niveau de stock au pied du robot.....	33
4.4	Temps de cycle des produits.....	34
4.5	Évolution du nombre de palettes disponibles sur le convoyeur entre le poste 4 et le poste 1.....	34
5	Reconfigurations proposées.....	34
5.1	Reconfiguration n°1 : Optimisation du nombre de palettes.....	35
5.2	Reconfiguration n°2 : Panne du convoyeur.....	37
5.3	Reconfiguration n°3 : Découplage des postes 2 et 3.....	42
5.4	Reconfiguration n°3 : Découplage des postes 2 et 3 (cas de panne du convoyeur).....	43

#### **4 Résultats et discussion 44**

1	Configuration n°1 : optimisation du nombre de palette.....	44
1.1	Taux d'utilisation de chaque poste (% du temps total).....	45
1.2	Nombre de produit entrés/sortis/encours.....	46
1.3	Évolution du niveau de stock au pied du robot.....	47
1.4	Temps de cycle moyen.....	48
1.5	Évolution du nombre de palettes disponibles sur le convoyeur entre le poste 4 et le poste 1.....	49
2	Configuration n°2 : panne du convoyeur.....	50
2.1	Taux d'utilisation de chaque poste (% du temps total).....	50
2.2	Nombre de produit entrés/sortis/encours.....	52
2.3	Évolution du niveau de stock au pied du robot.....	53
2.4	Temps de cycle moyen.....	54
2.5	Évolution du nombre de palettes disponibles sur le convoyeur entre le poste 4 et le poste 1.....	56
3	Configuration n°3 : découplage des postes 2 et 3.....	56
3.1	Taux d'utilisation de chaque poste (% du temps total).....	57
3.2	Nombre de produit entrés/sortis/encours.....	58
3.3	Évolution du niveau de stock au pied du robot.....	59
3.4	Temps de cycle moyen.....	60
3.5	Évolution du nombre de palettes disponibles sur le convoyeur entre le poste 4 et le poste 1.....	62
4	Configuration n°4 : découplage des postes 2 et 3 (cas de panne du convoyeur).....	63
4.1	Taux d'utilisation de chaque poste (% du temps total).....	63
4.2	Nombre de produit entrés/sortis/encours.....	64
4.3	Évolution du niveau de stock au pied du robot.....	65
4.4	Temps de cycle moyen.....	66
4.5	Évolution du nombre de palettes disponibles sur le convoyeur entre le poste 4 et le poste 1.....	68
5	comparaison entre les configurations.....	68

# List of Figures

1.1	Décomposition d'un système de production .....	10
1.2	DMS designed for multiple products, Khan et al. [2021] .....	11
1.3	Architecture typique d'un RMS .....	15
1.4	les différents systèmes de production en fonction de leur capacité/fonctionnalité	16
2.1	Quatre types de mesures de performance .....	19
3.1	Logo RODIC.....	25
3.2	Disposition des postes de travail .....	26
3.3	Initialisation du nombre de palettes.....	28
3.4	Configuration de la vitesse du robot.....	28
3.5	Création de la liste références de produits.....	29
3.6	logique de contrôle du poste 1 .....	29
3.7	logique de contrôle des postes 2 et 3 .....	30
3.8	Logique de contrôle du poste 4 .....	31
3.9	Initialisation du diagramme de taux d'utilisation .....	32
3.10	Initialisation du tableau de nombre de sortis et entrés .....	32
3.11	Initialisation du tableau de nombre de produits encours.....	33
3.12	Initialisation du tableau de bord du stock .....	34
3.13	Configuration du paramètre .....	36
3.14	Configuration des scénarios de simulation .....	37
3.15	Disposition des postes de travail pour le cas de panne du convoyeur .....	38
3.16	Circulation des chariots a fourche .....	38
3.17	Configuration de la vitesse des chariot.....	39
3.18	Configuration des espaces de stockage .....	39
3.19	Logique de contrôle du poste 1.....	40
3.20	Option de l'Output des Queues .....	40
3.21	Logique de contrôle du poste 2 et 3.....	41
3.22	Logique de contrôle du poste 4 .....	42
3.23	Logique de contrôle du Transporter .....	42
3.24	Logique du contrôle des poste 2 et 3 - cas du découplage.....	43
4.1	Taux d'utilisation de chaque poste pour 4 palettes - configuration n°1.....	45
4.2	Nombre de produit entré/sorti/encours - configuration n°1.....	46
4.3	Evolution du niveau de stock pour 4 palettes et plus - configuration n°1 .....	47
4.4	Nombre moyen de produit en stock - configuration n°1 .....	48
4.5	evolution du temps de cycle moyen pour 4 palettes et plus - configuration n°1 .....	48
4.6	temps de cycle moyen - configuration n°1.....	49
4.7	Evolution du nombre de palette entre poste 4 et poste 1 - configuration n°1 .....	50
4.8	Taux d'utilisation de chaque poste pour 4 palettes - configuration n°2 .....	51
4.9	Nombre de produit entré/sorti/encours - configuration n°2 .....	52
4.10	Évolution du niveau de stock pour 4 palettes et plus - configuration n°2.....	53

4.11	Nombre moyen de produit en stock - configuration n°2 .....	54
4.12	Temps de cycle moyen des produits pour 4 palettes et plus - configuration n°2 .	54
4.13	Temps de cycle moyen des produits - configuration n°2.....	55
4.14	Évolution du nombre de palette entre poste 4 et poste 1 - configuration n°2.....	56
4.15	Taux d'utilisations de chaque poste pour 5 palettes - configuration n°3.....	57
4.16	Nombre de produit entre/sorti/encours - configuration n°3 .....	58
4.17	Evolution du nombre de produits en stock - configuration n°3 .....	59
4.18	Nombre de produit moyen en stock - configuration n°3 .....	60
4.19	Évolution du temps de cycle des produits - configuration n°3 .....	60
4.20	Temps de cycle moyen des produits -configuration n°3.....	61
4.21	Évolution du nombre de palette entre poste 4 et poste 1 - configuration n°3.....	62
4.22	Taux d'utilisation de chaque poste pour 5 palettes - configuration n°4.....	63
4.23	Nombre de produit entré/sorti/encours - configuration n°4 .....	64
4.24	Évolution du nombre moyen de produit en stock - configuration n°4 .....	65
4.25	Nombre de produit moyen en stock - configuration n°4 .....	66
4.26	Évolution du temps de cycle moyen pour 4 palettes et plus - configuration n°4) .	66
4.27	Temps de cycle moyen des produits - configuration n°4 .....	67
4.28	Evolution du nombre de palette entre le poste 4 et le poste 1 - configuration n°4	68
4.29	Nombre de produits entrés et sortis pour chaque configuration .....	69
4.30	nombre moyen de produits en stock pour chaque configuration.....	70

# List of Tables

1.1	Principales caractéristiques des RMS .....	14
1.2	Comparaison entre les DML, RMS, et FMS .....	17
4.1	Paramètre stochastique .....	44
4.2	Nombre de produits entrés/sortis/encours pour chaque scénario - configuration n°1 .....	46
4.3	Nombre de produit en stock pour chaque scénario - configuration n°1 .....	47
4.4	Temps de cycle des produits pour chaque scénario - configuration n°1 .....	49
4.5	Nombre de palette entre le poste 4 et poste 1 pour chaque scénario - configuration n°1 .....	50
4.6	Nombre de produit entré/sorti/encours pour chaque scénario - configuration n°2 .....	52
4.7	Nombre de produit en stock pour chaque scénario - configuration n°2 .....	53
4.8	Temps de cycle des produits pour chaque scénario - configuration n°2 .....	55
4.9	Nombre de palette entre le poste 4 et poste 1 pour chaque scénario - configuration n°2 .....	56
4.10	Nombre de produit entré/sorti/encours pour chaque scénario - configuration n°3 .....	58
4.11	Nombre de produit en stock pour chaque scénario - configuration n°3 .....	59
4.12	Temps de cycle des produits pour chaque scénario - configuration n°3 .....	61
4.13	Nombre de palette entre le poste 4 et poste 1 pour chaque scénario - configuration n°3 .....	62
4.14	Nombre de produit entré/sorti/encours pour chaque scénario - configuration n°4 .....	64
4.15	Nombre de produit en stock pour chaque scénario - configuration n°4 .....	65
4.16	Temps de cycle des produits pour chaque scénario - configuration n°4 .....	67
4.17	Nombre de palette entre le poste 4 et poste 1 pour chaque scénario - configuration n°3 .....	68
4.18	Nombre de produits entrés et sortis pour chaque configuration .....	69
4.19	Nombre de produits entrés, sortis et nombre moyen de produits en stock pour différentes configurations .....	69



# Introduction générale

L'industrie manufacturière contemporaine est marquée par des exigences croissantes en matière de flexibilité, d'efficacité, et de qualité. Pour répondre à ces exigences, les entreprises adoptent des systèmes de production complexes, où l'optimisation des processus et la gestion efficace des ressources deviennent primordiales. Dans ce contexte, la simulation des systèmes à événements discrets (SED) et les indicateurs clés de performance (KPI) jouent un rôle crucial dans l'amélioration continue des systèmes de production. C'est dans ce cadre que le projet RODIC a été conçu. Ce projet vise à proposer un outil d'évaluation des systèmes de production reconfigurables à travers une modélisation précise des postes de travail et un ensemble de KPI pour évaluer chaque configuration réalisée. L'objectif de ce travail est de fournir une base de référence obtenue à travers une modélisation et simulation via flexsim pour l'équipe de recherche responsable du développement de l'outil RODIC, en utilisant un cas d'étude simplifié. Ce cas d'étude permet de valider les approches du projet RODIC et de vérifier la pertinence de l'outil dans des scénarios réels.

Ce travail vise à modéliser et simuler un système de production simplifié en utilisant FlexSim pour explorer différentes configurations possibles Identifier et analyser les KPI pertinents pour ce système afin de mesurer l'impact des configurations sur la performance globale. Proposer des améliorations basées sur les résultats de simulation pour optimiser le système.

L'étude se concentre sur un système de production virtuel composé de quatre poste de travail distinctes : un poste de source de produit, considéré comme matière première, deux poste de traitement identique, un poste d'évacuation des produit finis (traités) et un convoyeur central, ce système peut être configurée avec différentes ressources et logique de contrôle, L'analyse se concentre sur quatre configurations représentatives : configuration initial, cas de panne du convoyeur, découplage des postes 2 et 3, et une configuration de découplage des poste 2 et 3 pour le cas de panne du convoyeur.

Les simulations explorent divers paramètres opérationnels, dans ce cas d'étude on a concentré sur un changement de nombre de palettes. Ce paramètre influencent directement la productivité et l'utilisation des ressources. En simulant ces configurations et en analysant les KPI correspondants, nous identifions les configurations optimales pour détecter la meilleur configuration possible de ce système.

# Chapter 1

## Généralités sur les systèmes de production reconfigurable

### 1 Introduction

Au cours du vingtième siècle, notamment après la Deuxième Guerre mondiale, le monde a été témoin d'une révolution industrielle d'une ampleur considérable, ayant un impact majeur sur tous les secteurs de l'industrie mondiale, notamment sur la production industrielle. Cette révolution s'est manifestée à travers diverses innovations telles que la production automobile de masse, l'automatisation des systèmes de production, l'avènement du lean management, l'adoption généralisée de la gestion de la qualité totale, et bien d'autres encore.

Ces avancées ont non seulement transformé les processus de production, mais ont également redéfini les normes et les attentes en matière d'efficacité, de qualité et de rentabilité dans le monde industriel. Dans ce contexte de changement et de progrès constants, les entreprises ont été amenées à rechercher des méthodes et des systèmes innovants pour répondre aux défis de la production moderne, tout en maintenant un haut niveau de performance et de compétitivité.

C'est dans ce cadre que les Systèmes de Production Reconfigurables (RMS) ont émergé comme une réponse stratégique aux besoins changeants de l'industrie moderne. Les RMS représentent une évolution significative dans la manière dont les systèmes de production sont conçus, gérés et exploités. En combinant des technologies avancées telles que l'automatisation, la robotique, l'intelligence artificielle et l'Internet des objets (IoT), les RMS offrent une flexibilité et une agilité sans précédent, permettant aux entreprises de s'adapter rapidement aux fluctuations du marché, de personnaliser la production en fonction des demandes des clients, et de maintenir une efficacité opérationnelle optimale dans un environnement industriel en constante évolution.

### 2 Définition d'un système de production

Un système est un ensemble composé de personnes, de matériel, de logiciels et de procédures, dans lequel tous ces éléments interagissent les uns avec les autres dans un environnement spécifique et sont organisés pour atteindre un certain objectif. et sont organisés pour atteindre un certain objectif. Chaque système est déterminé par la nature des éléments qui le composent, les interactions entre eux et le critère d'appartenance. Et les critères d'appartenance au système. Par exemple, un système mécatronique est un ensemble complexe et structuré de composants mécaniques, électroniques, automatiques et informatiques, en interaction permanente et assurant une fonction d'usage (ex : automobile, avion, train, etc.). Chalfoun [2014]

De manière plus spécifique, les systèmes que nous étudions sont davantage des systèmes de

production capables de fabriquer un produit. En utilisant la perspective et la définition d'un système, nous pouvons expliquer un système de fabrication comme un composite d'éléments (ressources humaines et physiques) qui peut être un ensemble de postes de travail et d'opérateurs interagissant les uns avec les autres en utilisant des matières premières et de l'énergie afin de les transformer en produits finaux qui seront servis aux clients, l'interaction entre les ressources peut être liée par différents systèmes de manutention, tels que des convoyeurs, des AGV, des chariots élévateurs ou simplement par des opérateurs.

Par conséquent, nous concluons que les systèmes de fabrication sont des systèmes très complexes à gérer et à étudier, en raison de la complexité de leur gestion, de leur configuration et de leur conception.

Pour bien comprendre un système, il est presque nécessaire de le classer en différents sous-systèmes. Dans notre cas, un système de fabrication peut être composé de trois (3) sous-systèmes différents, Le Moigne [1990], où chacun d'entre eux est responsable d'une tâche et d'une gestion opérationnelle pour assurer une gestion fluide du processus de production.

- **système de décision**

de la transmission des informations relatives à la commande aux différentes ressources ou postes de travail en utilisant les données du système d'information

- **système d'information**

responsable de la collecte de données à partir de différentes sources du système, qu'il s'agisse de sources internes ou externes, qui seront utilisées dans le processus de production

- **système physique**

responsable de la transformation des matières premières en produits finis en utilisant différentes ressources humaines et matérielles

Outre la composition interne d'un système de fabrication, il existe également des éléments externes qui interfèrent avec le système global, comme l'illustre la figure ci-dessous. 1.1 below.

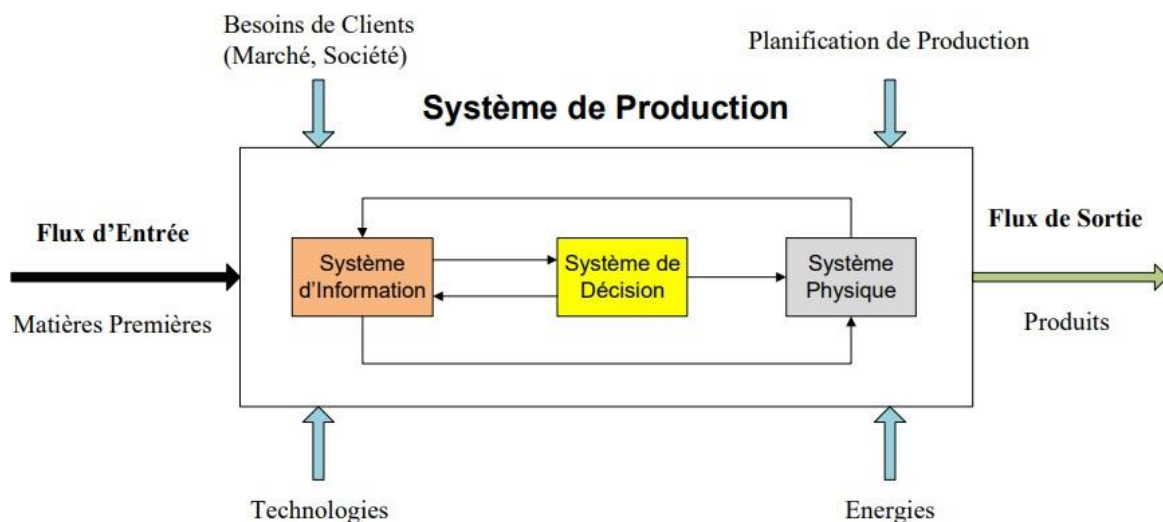


Figure 1.1: Décomposition d'un système de production

### 3 les systèmes de production traditionnels

Depuis le début de la production, de nombreux efforts de recherche ont été entrepris pour déterminer le modèle optimal pour les systèmes de production, en fonction de facteurs tels que la capacité de production, les demandes des clients ou la variabilité du marché. Vers la fin du XXe siècle, l'industrie manufacturière a connu la domination de deux systèmes de production distincts :

- **DML - ligne de production dédiée**
- **FMS - système de production flexible**

Ces deux types différents ont été essentiels pour la communauté industrielle afin de s'adapter aux différents aspects de l'évolution du marché. La plupart des industries manufacturières utilisent aujourd'hui un portefeuille de systèmes de production dédiée et flexibles pour fabriquer leurs produits. Koren et al. [1999],

#### 3.1 DML - ligne de production dédiée

également connues sous le nom de lignes de transfert Koren et al. [1999], Conçues comme une ligne de postes de travail ou de ressources qui exécutent une tâche spécifique et répétitive afin de produire plus en moins de temps, la configuration simple des DML les a rendues plus fiables et plus efficaces, bien que les avantages qu'elles présentent en termes de production d'un seul produit en volume massif, ces lignes de production ont connu un inconvénient dans leur configuration, à savoir l'incapacité de modifier la structure du système, ce problème étant apparu au XIXe siècle en raison de plusieurs changements du marché et de la nécessité pour le client de disposer de produits plus personnalisés. En termes plus simples, les DML ont moins de variété de produits à fabriquer. Un système spécialisé comprend un ou plusieurs équipements spécialisés conçus pour produire une seule pièce. 1.2. Les matières premières sont introduites dans le système et transformées pour fabriquer les produits souhaités. Khan et al. [2021]

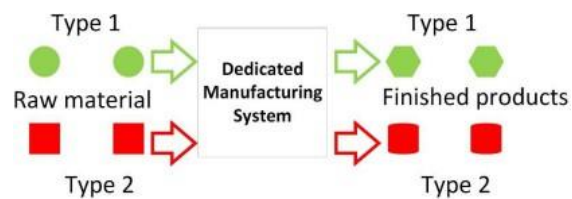


Figure 1.2: DMS designed for multiple products, Khan et al. [2021]

#### 3.2 FMS - système de production flexible

un concept de systèmes de fabrication qui a été développé pour répondre au besoin de produits sur mesure en raison de l'évolution constante du marché et des souhaits des clients en matière de produits sur mesure et personnalisés. Les systèmes de fabrication sur mesure (FMS) peuvent produire une variété de produits, avec des volumes et des mélanges modifiables, sur le même système. Koren et al. [1999], Shivanand [2006] et Khan et al. [2021] a défini le FMS comme un groupe de postes de travail qui traitent certaines tâches, inter-connectés au moyen d'un système automatisé de manutention et de stockage et contrôlés par un système de commande informatique intégré.

- **poste de travail** dans ce système, on trouve généralement des machines-outils à commande numérique par ordinateur (CNC) coûteuses et d'usage général qui effectuent des opérations d'usinage sur des familles de pièces, ces postes de travail ont un certain degré de flexibilité, ce qui signifie qu'ils ne nécessitent pas un temps de préparation ou de changement important entre des travaux ou des tâches successifs. Shivanand [2006]. mais, en raison de l'utilisation d'un seul outil sur les machines à commande numérique (poste de travail), le débit du FMS est nettement inférieur à celui du DML. Koren et al. [1999].
- **la manutention automatisée (MHS)** sont utilisés pour transporter correctement les pièces de travail et les pièces de sous-ensemble entre les postes de travail de transformation,
- **stockage** peut se faire localement au niveau du poste de travail et/ou de manière centralisée au niveau du système. Shivanand [2006]
- **système de contrôle informatique intégré** qui est la principale caractéristique des FMS, utilisée pour coordonner les activités des postes de traitement et de manutention utilisés, il est défini comme un réseau d'ordinateurs de supervision et de microprocesseurs, qui est responsable de la direction de l'acheminement des travaux, de la transmission des instructions pour chaque poste de traitement, du suivi de l'état de tous les travaux dans le système et de la surveillance de la performance des opérations et signale les problèmes qui surviennent pendant la durée du processus.
- **le job** qui est traité par poste de travail, transporté par manutention et stocké dans des dispositifs ou des palettes, et seul un nombre limité de travaux peut se trouver simultanément dans le FMS, conformément à la directive sur le contrôle de la qualité. Shivanand [2006]

## 4 système de production reconfigurable

Les RMSs, comme son nom l'indique, est principalement axé sur la reconfigurabilité, une nouvelle perspective des systèmes de production dans le monde industriel, conçue pour la capacité de changement rapide de sa structure, qu'il s'agisse d'un composant matériel ou logiciel, afin d'ajuster rapidement sa fonctionnalité pour pouvoir réagir aux changements du marché de manière rapide et efficace.

L'expert international en matière de systèmes de fabrication reconfigurables (Koren et al. [1999]) l'a défini comme suit : un système conçu pour des ajustements rapides de la capacité de production et de la fonctionnalité, en réponse à de nouvelles circonstances, par le ré-arrangement ou le changement de ses composants. Les composants peuvent être des machines ou des convoyeurs pour le système de production, des mécanismes pour les machines individuelles, de nouveaux capteurs et de nouveaux algorithmes de contrôle. Les nouvelles circonstances peuvent être l'évolution de la demande de produits, la production d'un nouveau produit sur un système existant ou l'intégration d'une nouvelle technologie de processus dans un système de fabrication existant. Ce système de production innovant permet, selon (Mehrabi et al. [2000]) :

- Le lancement d'un nouveau produit qui peut être pris très rapidement et obtenir la capacité souhaitée
- Intégration rapide d'un nouveau processus et d'une nouvelle fonction dans le système existant
- une adaptation facile aux quantités variables de produits pour le marketing de niche.

## **4.1 caractéristiques essentielles d'un système de production reconfigurable**

Ce type de système de fabrication doit être conçu d'une certaine manière qui permette la reconfiguration et l'évolutivité, et doit être créé en utilisant des modules matériels et logiciels qui peuvent être intégrés rapidement et de manière fiable afin de répondre rapidement aux changements du marché en modifiant sa structure ou ses composants. (Koren et al. [1999]), Dans le cas contraire, le processus reconfigurable sera long et peu pratique. Pour réaliser correctement la conception requise de ce type de systèmes de fabrication, il faut respecter six caractéristiques clés majeures, qui sont énumérées dans le tableau ci-dessous :

<b>Caractéristiques clés</b>	<b>Description</b>
Modularité	Capacité de tous les composants du système, tant matériels que logiciels, à fonctionner et à être facilement manipulés dans toutes les configurations possibles.
Intégrabilité	Capacité à intégrer rapidement différents modules, tant matériels que logiciels, dans le système de fabrication qui est prêt pour l'introduction future de nouvelles technologies.
Évolutivité	Capacité à modifier la capacité de production en supprimant ou en ajoutant des ressources et/ou en modifiant les composants du système.
Convertibilité	Capacité à modifier et à transformer la fonctionnalité existante du système pour l'adapter aux nouvelles exigences de production.
Diagnosticabilité	Capacité à détecter rapidement les causes des défauts des produits et des problèmes liés à la qualité ou à la fiabilité grâce à une surveillance en temps réel du système de fabrication
Personnalisation	Capacité à faire évoluer les fonctionnalités du système au fil du temps

Table 1.1: Principales caractéristiques des RMS

## 4.2 Machines reconfigurables

Machines reconfigurables (RMs) sont définies comme des ressources matérielles utilisées dans les systèmes de fabrication reconfigurables, en particulier au sein du système physique. Toutefois, ils diffèrent des systèmes de fabrication dédiés et flexibles, tels que le système d'usinage Flexible (FMS), qui est essentiellement un groupe de stations de travail CNC. La principale distinction réside dans le fait que les RMs introduisent un aspect de reconfigurabilité dans le système de fabrication, en incorporant des caractéristiques telles que la modularité, l'intégrabilité et l'évolutivité.

En outre, les RM sont conçues autour des caractéristiques communes des familles de pièces, ce qui les distingue des machines dédiées ou flexibles. Koren, Wiley [2010]. Une machine reconfigurable est une machine dont la structure peut être modifiée pour fournir une fonctionnalité alternative ou une augmentation progressive du taux de production du système afin de produire un type de produit différent, pour faire face aux changements constants du marché, la conception du RM a donc deux objectifs de base :

- Adapter la fonctionnalité de la machine à un nouveau membre d'une famille de pièces
- Augmenter le taux de production de la machine en ajoutant des ressources

La figure 1.3 représente une architecture typique de RMS proposée par Yoram Koren dans Koren et al. [1999]

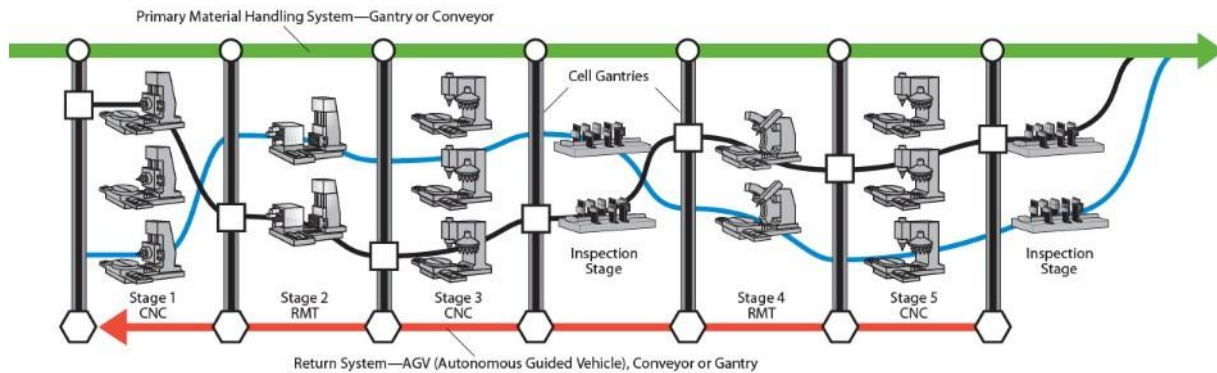


Figure 1.3: Architecture typique d'un RMS

Dans cette section, nous présentons les différentes machines reconfigurables utilisées dans un système de production reconfigurable, selon Koren Wiley [2010], il existe quatre types différents de machines reconfigurables :

- Machine-outil reconfigurable - RMTs
- Machine d'assemblage reconfigurable - RAMs
- Machines d'inspection reconfigurables - RIMs
- Fixations reconfigurables

## 5 comparaison entre les différents systèmes de production

Dans les sections précédentes, nous avons défini les systèmes de production connus dans l'histoire du monde industriel, à savoir les systèmes traditionnels (DML et FMS) et le nouveau type de système introduit par Yoram Koren (Koren et al. [1999]) (RMS). Dans cette section, nous examinerons les différences et les similitudes entre chacun de ces systèmes de fabrication, en tenant compte des différentes fonctionnalités de chaque type. Tout d'abord, tous les systèmes de fabrication ont un objectif commun : transformer les matières premières en produits finis pour répondre aux attentes des clients. Même si les besoins des clients peuvent être quelque peu imprévisibles, il est toujours important de s'assurer que nous pouvons répondre à ces besoins, qu'il s'agisse de la quantité produite, de la qualité des produits ou même de la personnalisation de la production. Dans la prochaine partie, nous examinerons de plus près chaque système afin de comprendre leur fonctionnement.



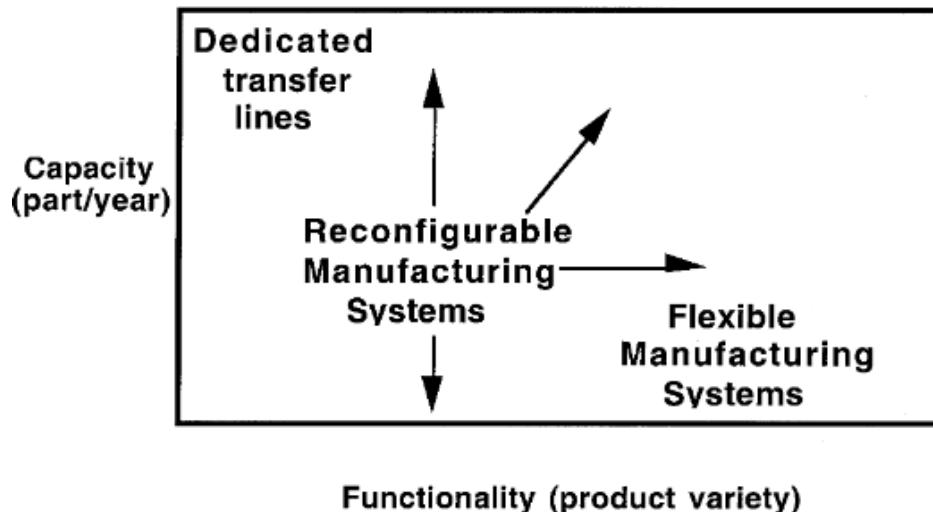


Figure 1.4: les différents systèmes de production en fonction de leur capacité/fonctionnalité

dans un premier temps, nous pouvons comparer les trois systèmes de production différents en fonction de la relation entre la capacité et la fonctionnalité, comme le montre la figure ci-dessous. 1.4 les lignes de production dédiées ont une capacité élevée mais une fonctionnalité très limitée, en raison de leur configuration non flexible et de leur ligne de production simple dans laquelle elles ne peuvent produire qu'un seul produit. Les DML sont donc rentables tant qu'elles ne produisent que quelques types de pièces et que la demande est supérieure à l'offre (Mehrabi et al. [2000]). Mais avec la saturation des marchés et la pression croissante de la concurrence mondiale, il y a des situations où les lignes spécialisées ne fonctionnent pas à pleine capacité.

D'autre part, il y a les systèmes de production flexible, un système qui a été conçu et construit pour répondre à la demande des différents clients, il peut produire différents types de produits grâce à sa fonctionnalité et à la flexibilité de sa structure ou des postes de travail disponibles, bien que le grand avantage de ce type de système, c'est qu'il ne peut pas produire une quantité importante, en d'autres termes, la capacité du système de production flexible est très faible, d'où la logique qui consiste à "l'acheter juste au cas où on en aurait besoin un jour" afin de produire un certain nombre de biens spécifiques. Toutefois, dans ces cas, le capital reste inutilisé sur le plancher de l'atelier et une grande partie de l'investissement en capital est gaspillée. (Mehrabi et al. [2000]).

Entre les deux systèmes de production se trouve le système de production reconfigurable (RMS), qui peut éliminer les inconvénients des DML et des FMS. Il vise à permettre l'ajout de la capacité supplémentaire des DML lorsque cela est nécessaire, et à ajouter la fonctionnalité supplémentaire des FMS lorsque cela est nécessaire.

Pour résumer, nous pouvons dire que les DML s'intéressent à la production de masse, les FMS sont principalement conçus pour la personnalisation. et en conclusion, le RMS combine les deux pour la personnalisation de masse.

le tableau 1.2 Les différences entre les trois types sont nombreuses et nous pouvons constater que le RMS a l'avantage sur les DML et les FMS dans toutes les caractéristiques. Koren et al. [1999], Mehrabi et al. [2000]

<b>caractéristiques</b>	<b>DML</b>	<b>RMS</b>	<b>FMS</b>
<b>Structure du système</b>	Fixe	Ajustable	Ajustable
<b>structure des machines</b>	Fixe	Ajustable	Fixes
<b>Orientation du système</b>	Pièce	Famille de pièces	Machine
<b>Flexibilité</b>	Non	Personnalisée	Général
<b>Évolutivité</b>	Non	oui	oui
<b>Outils opérationnels simultanés</b>	oui	oui	Non
<b>cout</b>	faible	Intermédiaire	élevé

Table 1.2: Comparaison entre les DML, RMS, et FMS

# Chapter 2

## Indicateurs clés de performance dans les systèmes de production

### 1 Introduction

En général, les KPI (Key Performance Indicators) sont définis comme un ensemble de mesures reflétant les performances des opérations, telles que l'efficacité, le débit, la disponibilité, du point de vue de la productivité, de la qualité et de la maintenance. Ils peuvent être extrêmement nécessaires pour mesurer les performances d'un système de production, qu'il s'agisse de pièces individuelles, de sous-pièces ou des performances de l'ensemble de l'usine.

Il existe de nombreux indicateurs de performance utilisés pour mesurer la performance de plusieurs systèmes. Chaque KPI est utilisé comme une mesure qui donne un aperçu d'un aspect spécifique d'un système de production qui aidera les parties prenantes à optimiser et améliorer le système industriel.

Dans ce chapitre, nous définissons les KPI les plus connus et les plus couramment utilisés dans les industries et ceux qui ont été utilisés dans les recherches. Nous discuterons également des différents types de ces mesures et de leur position hiérarchique, ainsi que de leur importance dans les industries d'aujourd'hui et en particulier dans les systèmes de production reconfigurables.

### 2 Définition des indicateurs clés de performance

Selon Arora and Kaur [2015], lorsque on peut mesurer ce dont on parle et l'exprimer en chiffres, on en sait quelque chose, mais lorsqu'on ne peut pas l'exprimer en chiffres, les connaissances sont maigres et insatisfaisantes ; c'est peut-être le début de la connaissance, mais on n'a guère avancé, dans sa pensée, jusqu'au stade de la science.

Selon la norme ISO 22400, les indicateurs de performance clés sont définis aussi simplement comme un niveau quantifiable d'atteinte d'un objectif critique, l'objectif devant être décrit par l'industrie afin de répondre à ses besoins. Dans les systèmes de production et les système industriel, nous pouvons définir plusieurs KPI qui permettront d'apporter un éclairage sur l'aspect le plus important du système, conformément à la norme ISO 22400 qui vise à spécifier "un cadre industriel neutre pour définir, composer, échanger et utiliser des indicateurs de performance clés (KPI) pour la gestion des opérations de fabrication [...]" pour les industries de production par lots, continues et discrètes. Elle définit un ensemble de 34 KPI pour la gestion des opérations de fabrication qui sont regroupés selon leur objectif, comme suit:

- coût, temps, qualité, flexibilité et durabilité

- avance et retard
- quantitatif et qualitatif
- maintenance, production, inventaire et qualité
- ressources
- processus, produit et production

Pour bien comprendre la signification des KPI et éviter de les confondre avec d'autres métriques, il est préférable de définir les différents types d'indicateurs de performance utilisés dans les industries (4 types) :

- Indicateurs clés de résultats (KRIs) : indique la méthode pour atteindre une perspective ou un facteur de succès critique.
- Indicateurs de résultats (RIs) : indique les résultats obtenus.
- Indicateurs de performance (PIs) : indique ce qui doit être fait pour améliorer la situation.
- Indicateurs clés de performance (KPIs) : indique ce qui doit être fait pour augmenter considérablement et optimiser la performance.

Pour comprendre pleinement la différence entre ces quatre (4) types, la figure 2.1 illustre l'analogie de l'oignon (Arora and Kaur [2015]), La peau extérieure décrit l'état général de l'oignon, la quantité de soleil, d'eau et de nutriments qu'il a reçue, ainsi que la manière dont il a été traité depuis la récolte jusqu'aux rayons du supermarché. La peau extérieure est un indicateur de résultat clé. Cependant, en épluchant les couches de l'oignon, nous trouvons davantage d'informations. Les couches représentent les différents indicateurs de performance et de résultat, et le cœur représente l'indicateur de performance clé.

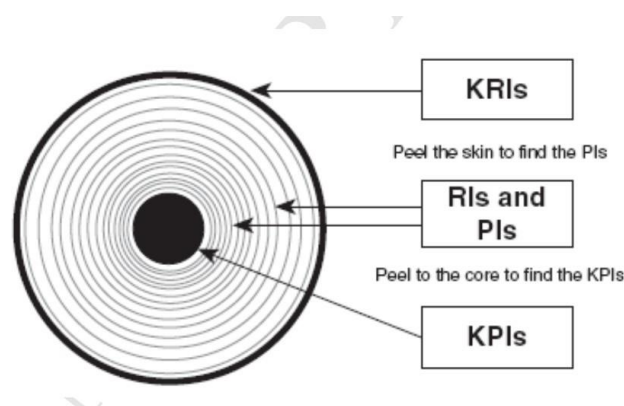


Figure 2.1: Quatre types de mesures de performance

## 2.1 Caractéristiques des KPI efficaces (SMART)

Pour être véritablement utiles et efficaces, les KPI doivent être définis selon le modèle SMART. Ce modèle garantit que les indicateurs sont conçus de manière à maximiser leur pertinence et leur utilité. voir Parmenter [2015] et Luecke and Hall [2006].

### **Spécifiques (Specific)**

Un KPI doit être clair et précis, définissant exactement ce qui doit être mesuré et dans quel contexte. Par exemple, "augmenter la productivité" est trop vague, alors que "augmenter la productivité de l'atelier de 10% en six mois" est spécifique.

### **Mesurables (Measurable)**

Il doit être possible de quantifier le KPI de manière objective. Les métriques utilisées doivent permettre une évaluation claire des progrès réalisés. Par exemple, mesurer le nombre de produits fabriqués par heure est un KPI mesurable.

### **Atteignables (Achievable)**

Les objectifs fixés doivent être réalistes et atteignables avec les ressources et le temps disponibles. Un KPI trop ambitieux pourrait démotiver les équipes, tandis qu'un objectif trop facile n'encouragerait pas les efforts nécessaires pour l'amélioration.

### **Réalistes (Realistic)**

Le KPI doit être pertinent par rapport aux objectifs de l'organisation et aligné avec ses capacités et ressources actuelles. Il doit refléter des aspirations qui, tout en étant ambitieuses, sont réalisables dans le contexte actuel de l'entreprise.

### **Temporellement définis (Time-bound)**

Chaque KPI doit avoir une échéance claire. Cela crée un sens de l'urgence et permet de planifier des étapes intermédiaires pour atteindre l'objectif final. Par exemple, "réduire le taux de défauts de 5% d'ici la fin de l'année" est un KPI temporellement défini.

## **3 Types des indicateurs de performance clés**

Dans ce qui suit, on définit quelques types d'indicateurs clés de performance utilisés pour l'analyse et l'évaluation des systèmes industriels.

### **3.1 KPI financiers**

#### **Retour sur investissement (ROI)**

Le retour sur investissement mesure le gain ou la perte générée sur un investissement par rapport au montant initial investi. C'est un indicateur crucial pour évaluer la rentabilité des projets et des initiatives dans une organisation.

#### **Coûts opérationnels**

Les coûts opérationnels incluent toutes les dépenses liées au fonctionnement quotidien de l'entreprise. La surveillance de ces coûts permet de contrôler et d'optimiser les dépenses pour améliorer la rentabilité.

## **3.2 KPI de performance opérationnelle**

### **Productivité**

La productivité mesure l'efficacité avec laquelle les ressources de l'entreprise sont utilisées pour produire des biens ou des services. Cet indicateur est essentiel pour identifier les opportunités d'amélioration dans les processus de production.

### **Temps de cycle**

Le temps de cycle représente la durée nécessaire pour compléter un processus ou une opération spécifique, de son début à sa fin. Il est crucial pour évaluer et optimiser les flux de travail et les délais de production.

## **3.3 KPI de qualité**

### **Taux de défaut**

Le taux de défaut indique la proportion de produits ou de services qui ne répondent pas aux normes de qualité établies. Un faible taux de défaut est généralement synonyme de haute qualité et de satisfaction client.

### **Satisfaction client**

La satisfaction client mesure la perception des clients par rapport aux produits ou services fournis par l'entreprise. C'est un indicateur clé pour évaluer la performance globale de l'entreprise du point de vue des consommateurs.

## **3.4 KPI de flexibilité**

### **Temps de reconfiguration**

Le temps de reconfiguration mesure la durée nécessaire pour modifier ou adapter les processus de production en réponse à des changements de la demande ou des conditions du marché. Cet indicateur est important pour évaluer la capacité d'adaptation de l'entreprise.

### **Adaptabilité**

L'adaptabilité évalue la capacité de l'entreprise à répondre efficacement aux changements internes et externes. Elle est essentielle pour maintenir la compétitivité dans un environnement dynamique.

## **3.5 KPI de durabilité**

### **Consommation énergétique**

La consommation énergétique mesure la quantité d'énergie utilisée par les processus de production et les opérations de l'entreprise. Réduire cette consommation est crucial pour diminuer les coûts et l'impact environnemental.

## **Impact environnemental**

L'impact environnemental évalue les effets des activités de l'entreprise sur l'environnement, y compris les émissions de gaz à effet de serre, la gestion des déchets et l'utilisation des ressources naturelles. Cet indicateur est de plus en plus important pour les entreprises engagées dans des pratiques durables.

## **4 rôle des indicateurs de performances clés**

Les indicateurs clés de performance (KPI) jouent un rôle crucial dans l'analyse et l'optimisation des systèmes industriels, les indicateurs clés de performance sont des outils indispensables pour piloter de manière continue les systèmes industriels dans un objectif d'excellence opérationnelle. D'après plusieurs articles, Voici les principaux rôles des KPI dans ce domaine:

- Mesurer les performances

Les KPI permettent de quantifier et mesurer de manière objective les performances des équipements, des processus et des opérations industrielles. Ils fournissent des données chiffrées sur des aspects clés comme l'efficacité, la productivité, la qualité et les coûts.

- Identifier les goulots d'étranglement

En suivant des KPI comme le taux de rendement, le temps de cycle ou les temps d'arrêt, il est possible d'identifier les goulots d'étranglement et les zones à améliorer dans les processus de production.

- Contrôler la qualité

Des indicateurs comme le taux de défauts, le rendement au premier passage ou le coefficient de fiabilité permettent de suivre et d'améliorer la qualité des produits

- Optimiser les coûts

L'analyse de KPI liés aux coûts (coût de production par unité, coût de la non-qualité, coût de maintenance, etc.) permet d'identifier les sources de gaspillage et d'optimiser les coûts opérationnels.

- Suivre les progrès

Le suivi régulier des KPI dans le temps permet de mesurer les progrès réalisés suite aux actions d'amélioration mises en œuvre et d'ajuster si nécessaire[1][2].

- Prise de décision

Les KPI apportent une vision chiffrée et objective pour appuyer la prise de décisions stratégiques et opérationnelles, comme l'allocation des ressources ou les investissements.

## **5 Importance des indicateurs clés de performance dans les RMS**

Cette section explorera pourquoi les KPI sont cruciaux dans les systèmes de fabrication reconfigurables (RMS).

## 5.1 Optimisation des processus

Les KPI permettent d'identifier les domaines nécessitant des améliorations et d'optimiser les processus pour accroître l'efficacité et réduire les coûts.

## 5.2 Suivi de la performance en temps réel

Les KPI fournissent des données en temps réel qui aident les gestionnaires à prendre des décisions rapides et éclairées pour maintenir ou améliorer la performance des systèmes de production.

## 5.3 Évaluation de la flexibilité et de l'agilité

Dans les RMS, la capacité à s'adapter rapidement aux changements est essentielle. Les KPI mesurent la flexibilité et l'agilité des systèmes, aidant ainsi à évaluer leur capacité de reconfiguration.

## 5.4 Amélioration continue

Les KPI facilitent une culture d'amélioration continue en fournissant des points de référence pour mesurer les progrès et identifier les opportunités de perfectionnement.

# 6 Les KPI utilisés pour évaluer les RMS

Dans cette section, on détaillera les différents indicateurs clés de performance utilisés dans l'évaluation des systèmes de production reconfigurables.

## 6.1 Productivité

- Taux de production : le rapport du nombre de produits finis par l'unité de temps.
- Productivité : le rapport entre le nombre de produits finis et le temps de production total.
- Efficacité globale de l'équipement (OEE) : elle comprend la mesure de la disponibilité, de la performance et de la qualité des équipements.

## 6.2 Qualité

- Taux de défaut : Pourcentage de produits défectueux par rapport à la production totale.
- Coût de la non-qualité : Coût associé aux produits non conformes, y compris les rebuts et les retours.

## 6.3 Flexibilité

- Temps de changement : Temps nécessaire pour passer d'une configuration de production à une autre.
- Nombre de reconfigurations réussies : Nombre de changements de configuration réalisés avec succès dans une période donnée.



## 6.4 Coût

- Coût par unité : Coût total pour produire une unité de produit. autrement dit, c'est le rapport entre le cout total de production et le nombre de produit
- Coût de maintenance : Coût associé à l'entretien et aux réparations des équipements.

# Chapter 3

## Cas d'étude simplifié RODIC

### 1 Présentation RODIC

Les systèmes de production reconfigurables (RMS) sont actuellement considérés comme l'une des voies les plus prometteuses dans l'objectif d'adaptabilité des entreprises face à de fortes incertitudes. L'idée directrice des RMS est de réussir à modifier à la fois la structure physique et la structure du système de pilotage d'un système de production afin de lui permettre de s'adapter à une évolution de son environnement ou de ses objectifs. Pour obtenir ce résultat, les systèmes de production doivent être conçus sous une forme modulaire, et une configuration correspond donc à un assemblage de ces modules, qu'ils soient logiciels ou matériels. Plusieurs phases successives sont effectuées lors d'une reconfiguration :

1. détection du besoin de reconfiguration,
2. conception des configurations alternatives,
3. choix de la configuration à appliquer,
4. arrêt de la production,
5. reconfiguration,
6. redémarrage de la production.



Figure 3.1: Logo RODIC

Le projet RODIC a pour objectif d'améliorer ce processus en proposant un outil permettant à un opérateur en charge de la reconfiguration d'évaluer plus simplement et plus rapidement les configurations qu'il souhaite tester (phase 3). La force principale du projet RODIC est de réussir à croiser trois disciplines scientifiques distinctes : la psychologie cognitive pour l'analyse cognitive de l'activité de l'opérateur et la définition de l'interaction à mettre en place avec l'outil,

le génie industriel pour la contextualisation des travaux, la conception des configurations et la définition des indicateurs de performance en vis-à-vis de l'architecture d'entreprise et le génie logiciel pour la phase de vérification, de génération et d'évaluation des configurations proposées.

Le projet RODIC développera deux cas d'application complémentaires. Premièrement, un cas industriel virtuel sera proposé, traitant de systèmes majoritairement automatisés, permettant de travailler sur des indicateurs de performance validés industriellement. Un second cas sera développé au sein d'une usine-école sur un système totalement manuel. Les développements seront intégrés à demeure à l'usine-école afin d'en faire une vitrine du projet.

Le projet RODIC, financé par l'Agence Nationale pour la Recherche, vise à proposer un outil d'évaluation de performance de systèmes de production reconfigurables utilisant une approche couplée génie industriel, génie logiciel et psychologie cognitive. L'objectif est de contribuer à l'amélioration du processus de configuration d'un système de production reconfigurable en assistant l'opérateur humain dans ses choix et ainsi accélérer le processus Agence Nationale de la Recherche [2024].

## 2 Description du système de production étudié

Le système physique considéré ici (Fig. 0) est imaginaire, et n'a jamais été réellement déployé en atelier. Voici la description à partir de laquelle le reste de l'étude a été menée.

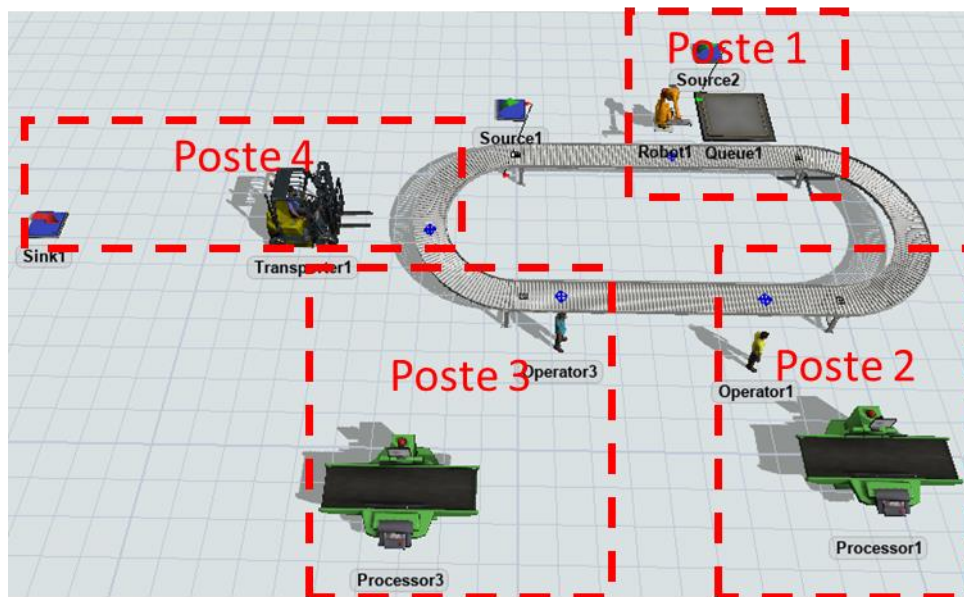


Figure 3.2: Disposition des postes de travail

le système est principalement constitué d'un ensemble de postes de travail et une boucle de convoyeurs à accumulation sur laquelle circulent des palettes. Les palettes sont toujours sur le convoyeur, et avancent à vitesse constante de 1m/s. Des bloqueurs sont installés devant chaque poste de travail afin de permettre au palettes de s'arrêter devant chaque poste pour que les opérations de production se déroule dans les meilleures conditions mécaniques possible.

Le premier poste de travail dans ce système de production est équipé de 3 ressources fonctionnelles, un robot poli-articulé 6 axes, un espace de stockage et une source de produit. la source transmet les produit un par un vers le stock suivant une loi normal de moyenne 14,25 et un écart type de 3, afin de simuler le comportement d'un système réel, le stock de capacité 1000 pièce qui fonctionne avec la stratégie FIFO (First In, First Out) est situé au près du robot pour faciliter le déplacement des produit, le robot prend un par un des produits dans un stock

et les mets dans la palette lorsque cette dernière est disponible et arrêtée au poste. la prise d'un produit nécessite 5 secondes, et le dépôts sur la palette 5 secondes supplémentaires. Le robot place 2 produits sur chaque palette, puis la palette est libérée et avance sur le convoyeur vers le prochain poste de travail.

Le deuxième poste de travail, situé 15m50 après le premier poste, constitué d'un opérateur et une machine de traitement des produits. dès que la palette chargées de deux produits arrive, L'opérateur humain prend un produit, puis va le déposer sur une machine de traitement 1 pour un traitement de 10 minutes déterministes, située à 5m du point de prise. a savoir que la palette est libérée dès que l'opérateur a pris le produit et avance au poste suivant qui est le poste 3. L'opérateur traite le produit sur la machine 1, puis vient la déposer sur la palette, qui a donc avancé pendant le temps de traitement. Le troisième poste de travail, similaire au poste de traitement précédent constitué d'un opérateur et une seconde machine de traitement des produit, situé 6m après le deuxième poste, l'opérateur humain prend le second produit, puis va le déposer sur une machine de traitement 2 située à 5.6m du point de prise. L'opérateur traite le produit sur la machine, puis vient la déposer sur la palette. Lorsque la palette a reçu les 2 produits traités au niveau des deux poste de travail, elle est libérée et avance au dernier poste de travail. a la fin de la chaîne de production, un quatrième poste de travail, situé 5m10 après le troisième poste, composé d'un chariot de transfert, ce dernier vient retirer les 2 produits un par un, et les dépose dans un stock final (sink). L'opération totale dure 18s (arrivée de la palette pleine jusqu'à départ de la palette vide). Lorsque le chariot prend le deuxième produit la palette est libérée au même instant, de ce fait, la palette vide retourne au premier poste, situé à 10m du quatrième poste de travail, pour recommencer la séquence.

### **3 description du modèle de simulation**

#### **3.1 Initialisation**

Une Source1 a été créée, permettant d'introduire les palettes sur le convoyeur au début de la simulation. En allant dans les propriétés de la source, et en cliquant sur « Edit Table », on a accès au nombre de palettes disponibles à l'initialisation du modèle. La source est connectée au convoyeur 5m20 avant le premier poste de travail. Les palettes vides intègrent le système dès le début de la simulation, ce qui simule le fait qu'elles soient présentes dès l'initialisation.

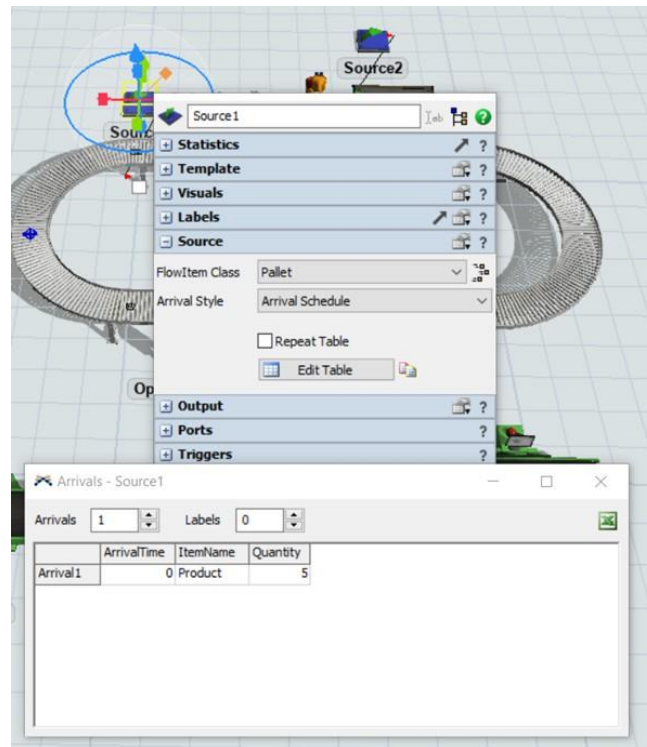


Figure 3.3: Initialisation du nombre de palettes

### 3.2 poste 1

Le premier poste de travail a été modélisé par une source de produits Source2, un stock tampon Queue2 (capacité infinie), un robot Robot1 et un point de décision DP4 situé à 5m20 du début du convoyeur rectiligne. Le temps de déplacement du robot est fixé dans son onglet Robot

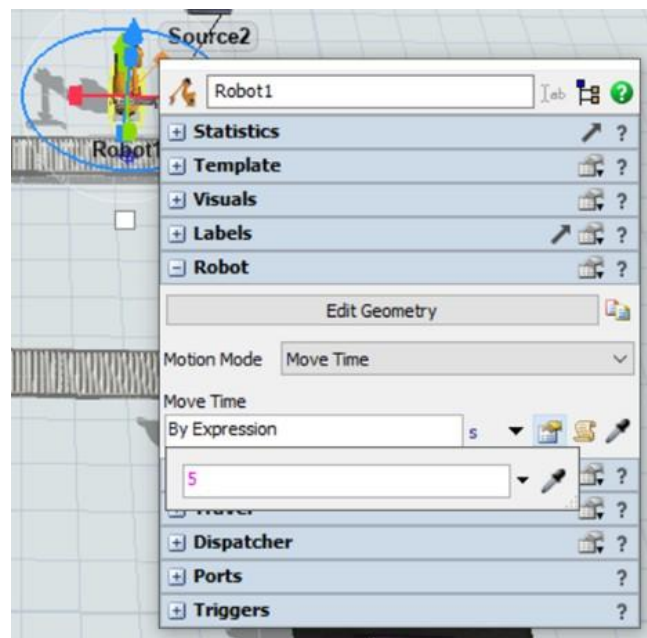


Figure 3.4: Configuration de la vitesse du robot

Une logique de contrôle a été créée dans le processflow pour piloter le comportement et les interactions de ces éléments. Cette logique se comporte globalement comme un réseau de Petri, à lire de haut en bas. A la création des produits dans la Source2, ils sont automatiquement

déposés dans la Queue1. A leur arrivée dans la Queue, une Liste Interne (List) est alimentée par des pointeurs aux objets Produits (Fig.3). Un jeton est créé dans le bloc Source, à l'entrée de chaque produit dans la Queue1. Le bloc Push to List permet d'insérer la référence de l'objet dans List. Puis le jeton est détruit dans le bloc Sink.

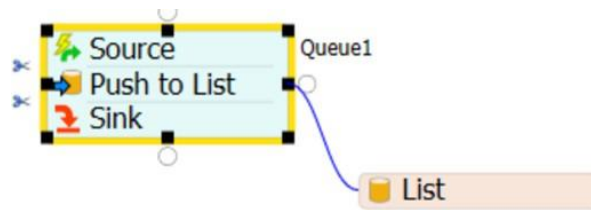


Figure 3.5: Création de la liste références de produits

Un jeton est créé dans le bloc Source, à l'arrivée d'une palette sur le DP4. Le bloc Custom Code permet d'arrêter la palette sur le convoyeur (ce qui modélise l'action du bloqueur). Ainsi, il ne peut y avoir qu'une seule palette sur le DP4 à chaque fois, donc un seul jeton présent à la fois dans ces blocs. On choisit ensuite un produit au hasard dans le stock en tirant (bloc Pull from List) de la liste une référence au pointeur correspondant. On demande ensuite au robot de prendre ce produit par le bloc Load, puis on lui demande de le poser sur la palette par le bloc Unload. On recommence une seconde fois le cycle (Pull from List, Load, Unload) pour déposer un second produit. Si, à un moment de ces 2 cycles, il n'y a plus de produit dans la Queue, alors la List est vide, et l'opération Pull from List échoue. Dans ce cas, un pulling continu est mis en place afin de tirer un pointeur vers le premier produit aussitôt qu'il entrera dans la Queue. Enfin, un bloc Custom Code libère la palette sur le convoyeur.

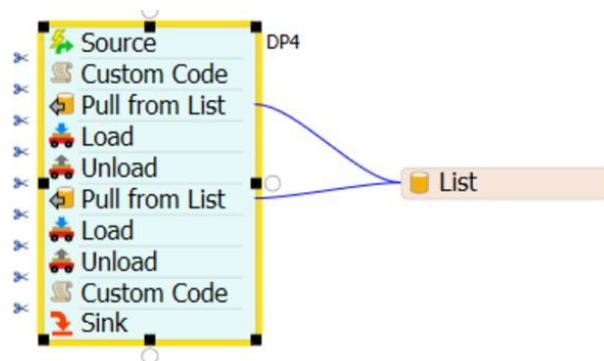


Figure 3.6: logique de contrôle du poste 1

### 3.3 poste 2 et 3

Les postes 2 et 3 ont des fonctionnements relativement symétriques et couplés. Chaque poste est constitué d'un opérateur (Operator1 pour Poste2 et Operator3 pour Poste3), d'une machine (Processor1 pour Poste2 et Processor3 pour Poste3) et d'un Decision Point (DP3 pour Poste2 et DP1 pour Poste3). Une ressource logique a également été créée dans le process flow (nommée OP1 pour Poste2 et OP3 pour Poste3) afin de modéliser la capacité unitaire de chaque opérateur. Le jeton est créé à l'arrivée de la palette sur le DP correspondant du poste. Le bloc Custom Code permet de stopper la palette. Le bloc Assign Labels permet de créer une propriété du jeton appelée itempris, et qui pointe vers le premier produit disponible sur la palette. Le bloc Acquire permet de demander l'accès à la ressource (OP1 ou OP3 respectivement) et ainsi vérifier la disponibilité de l'opérateur. On demande ensuite à l'opérateur de prendre le produit

référencé par itempris (Load), on libère la palette sur le convoyeur (Custom Code) uniquement sur le poste2, puis on dépose le produit sur la machine correspondante (Unload). Le bloc Wait for Event permet de bloquer le jeton jusqu'à l'évènement de fin de traitement du produit par la machine. Puis l'opérateur prend le produit (Load) et va le déposer sur la palette (Unload). Enfin, on libère la ressource (OP1 ou OP3) afin de permettre à une prochaine palette d'être traitée. Une synchronisation est ensuite opérée entre les 2 logiques, afin de valider la fin du dépôt par chacun des 2 opérateurs sur la palette. On libère alors la palette (Custom code) et on détruit les jetons (Sink).

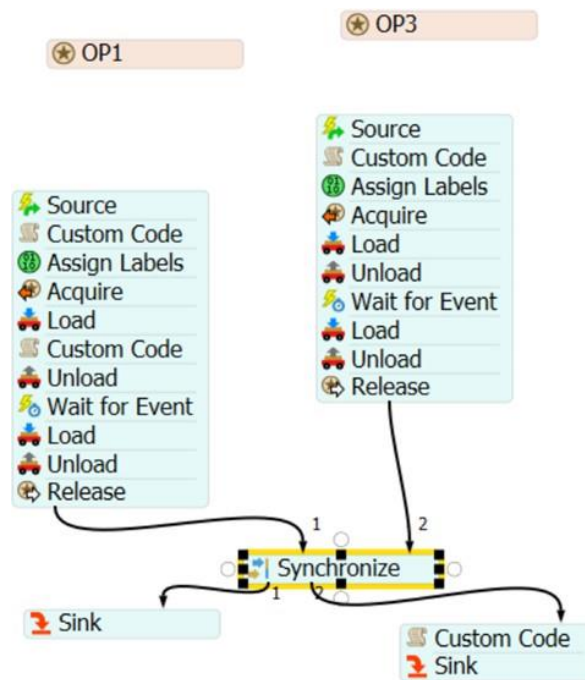


Figure 3.7: logique de contrôle des postes 2 et 3

### 3.4 poste 4

Le Poste4 a une structure assez simple, constituée d'un Decision Point (DP2), d'un transporteur (Transporter1) et d'une sortie de produits (Sink1). La logique de contrôle (Fig.6) ressemble à celle des postes précédents. Le jeton est créé à l'arrivée de la palette sur le DP correspondant du poste. Le bloc Custom Code permet de stopper la palette. Le bloc Assign Labels permet de créer une propriété du jeton appelée itempris, et qui pointe vers le premier produit disponible sur la palette. On demande ensuite au transporteur de prendre le produit référencé par itempris (Load), puis on demande au transporteur de déposer le produit dans le Sink (Unload). Le bloc Assign Label permet de référencer de nouveau le premier produit de la palette, qui est donc le second car le premier a été précédemment enlevé. On demande enfin au transporteur de prendre le produit référencé par itempris (Load), on libère la palette (Custom code) à la fin de la prise, on demande au transporteur de déposer le produit dans le Sink (Unload) et on détruit les jetons (Sink).

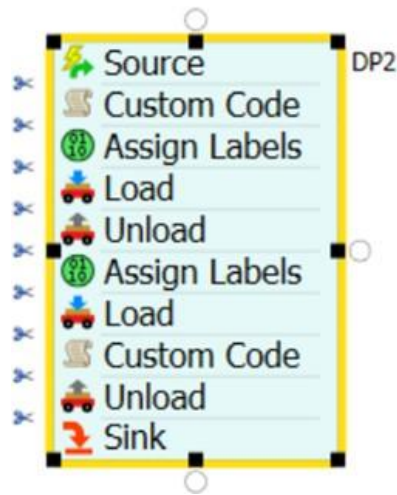


Figure 3.8: Logique de contrôle du poste 4

## 4 Indicateurs de performance

Le cas d'étude a été d'abord pensé pour son côté fonctionnel. De ce fait les KPI ci-dessous sont quelque peu artificiels, mais représentatifs de ce que l'on pourra retrouver sur des cas plus complexes. Les indicateurs de performance suivants pourront être évalués :

### 4.1 Taux d'utilisation de chaque poste (% du temps total)

Le taux d'utilisation est l'un des indicateurs de performance les plus utilisés dans les systèmes de production pour mesurer l'efficacité des ressources matérielles utilisées, dans le cas de ce système « SimplifiedUsedCase », le taux d'utilisation permet d'avoir des résultats sur chaque poste en plusieurs états, tel que :

- Poste en attente de produit
- Poste en attente de palette
- Poste en production (participant à la transformation du produit)

Afin de présenter ces résultats sur un tableau de bord (dashboard) dédié à l'utilisation des postes, un dashboard de type (State) est utilisé, qui permet d'avoir des résultats sur l'état d'utilisation des équipements ou des ressources pour chaque poste de travail. 4 (State) sont utilisés pour les 4 postes de travail, dont chaque State présente l'ensemble des ressources présentes dans chaque poste.



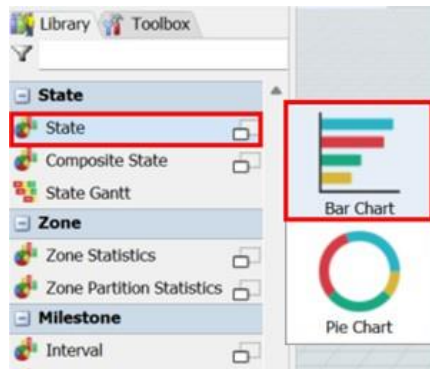


Figure 3.9: Initialisation du diagramme de taux d'utilisation

## 4.2 Nombre de produits entrés/sortis/encours

Cet indicateur offre une information essentielle pour toute analyse d'un système de production, indiquant le nombre de produits traités. qui concerne les entrées, les sorties et les produits en cours de traitement (WIP) durant la simulation. Ces trois résultats nous permettent, pour chaque configuration réalisée, de déterminer le nombre de produits qui ont été traités par rapport au nombre entrés. Il est important que le système de production soit stable, ce qui signifie que le nombre d'entrées doit être égal au nombre de sorties. Pour y parvenir, le système doit minimiser les goulots d'étranglement et les files d'attente. Ce KPI contribue à l'analyse et à l'optimisation des choix de reconfiguration à utiliser. Afin d'obtenir ce résultat, un tableau de bord de type 'output' qui calcule le nombre de produits entrés au poste 1 (source2) et sortis au poste 4 (sink1) est mis en place. En outre, un tableau de bord de type 'Composite WIP' est ajouté, choisissant comme objet d'entrée (source2) au poste 1 et comme objet de sortie (sink1) au poste 4

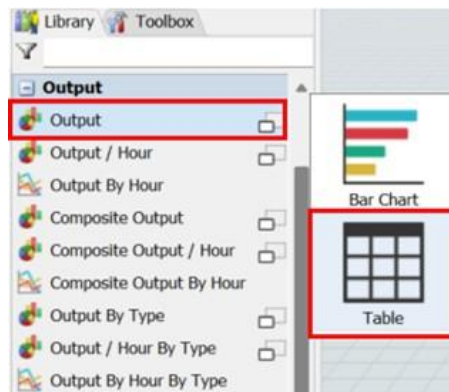


Figure 3.10: Initialisation du tableau de nombre de sortis et entrés

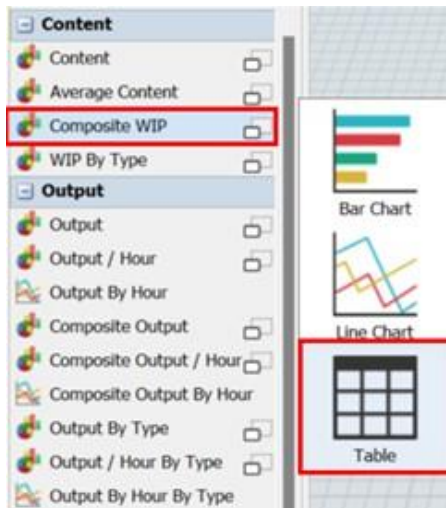


Figure 3.11: Initialisation du tableau de nombre de produits encours

### 4.3 Évolution du niveau de stock au pied du robot

Cet indicateur permet d'avoir une information qui détermine l'efficacité du système pour chaque configuration, l'efficacité concerne le nombre de produit en attente dans le stock, plus la quantité de produit s'augmente au fils du temps plus ça cause un problème pour la performance du système, et pareil pour le nombre maximum de produit stocké sur toute la durée de simulation du système

le KPI en question offre des informations précises pour toute la durée de simulation sur :

- La quantité de produits au fil du temps
- Le stock maximum

Afin d'introduire cet indicateur de performance, il faut utiliser le tableau de bord de type (content) et par la suite, le queue 2 qui est le stock au pied du robot est sélectionné comme un objet de calcul. A noter qu'il est utilisé deux types de tableaux de bord 3.12, le premier est de type Line Chart (graphe) qui offre une visualisation sur la quantité de produits au fil du temps et le second est de type table (tableau) qui présente tous les valeurs statistiques qui concerne l'espace de stockage.

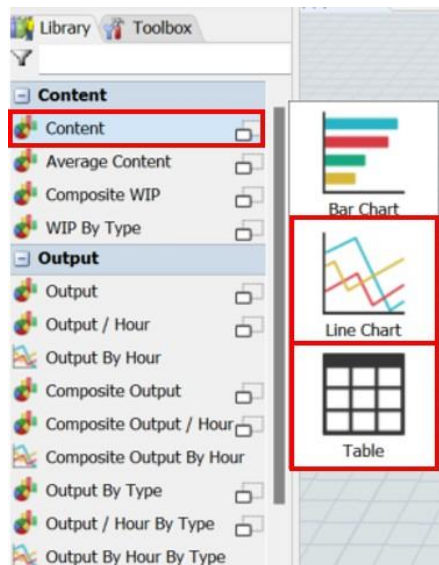


Figure 3.12: Initialisation du tableau de bord du stock

#### 4.4 Temps de cycle des produits

Cet indicateur de performance décrit le temps moyen passé par un produit entre son entrée et sa sortie du système, en commençant par une création du produit à la source2 du poste 1, le produit passera par tous les poste du système jusqu'à sa sortie au sink1 du poste 4. Afin d'avoir les résultats de cet indicateur, le dashboard (composite Staytime) est mis en place, il prend 2 objet pour appliquer son calcul, des objets d'entrées et des objet de sorties, dans le cas de ce système de production, la source2 qui génère les produits à traiter est considérée comme l'objet d'entrée, tandis que le sink1 est sélectionné comme un objet de sortie. De cette façon, le dashboard nous présente le temps moyen que chaque produit a pris entre ces deux objets

#### 4.5 Évolution du nombre de palettes disponibles sur le convoyeur entre le poste 4 et le poste 1

Cet indicateur est particulièrement important, car il décrit la présence ou l'absence des palettes entre le dernier poste (poste 4) et le premier poste (poste 1) du cycle du produit, et cela est décisif car c'est la sortie du système et son début. Ce qui signifie l'arrivé, ou d'une autre façon c'est le taux d'arrivé des palettes au poste 1. A noter que, ce qui concerne plus l'analyse de ce système par ce KPI est l'absence et la présence des palette à côté du poste 1, car l'existence permet la bonne circulation des produits sur tous le cycle du système, par contre le manque des palettes sur ce passage induit des problèmes d'attente des produits sur le stock et une baisse d'usage des ressources matérielles du système

### 5 Reconfigurations proposées

Ici encore, le système n'a pas été pensé directement pour de la reconfiguration, donc les configurations proposées ici sont assez artificielles. De ce fait, leur pertinence « métier » est à relativiser. A noter que tous les modèles Flexsim réalisés sont configuré pour 8 heures de simulation et 10 réplifications, avec un temps de préchauffage (warm-up) de 600 secondes (10 minutes).

## 5.1 Reconfiguration n°1 : Optimisation du nombre de palettes

Cette reconfiguration arrive lors de l'évolution des paramètres de la loi normale régissant l'arrivée des composants sur le Poste 1. L'opérateur en charge de cette modification veut alors pouvoir modifier le nombre de palettes initialement disponible sur le système, afin de vérifier la stabilité et la productivité du système.

### Explication

Afin de réaliser cette reconfiguration sur le model initial de flexsim, il est nécessaire de faire un paramétrage de l'expérimenter, où il ajoute une nouvelle « experiment », qui permet d'initialiser les nombres de scénarios et de réplication à exécuter. Le concept de « experimenter » de Flexsim permet d'avoir non seulement des résultats de simulation pour différentes valeurs d'un paramètre précis du model en utilisant des « scénarios », mais aussi d'initialiser le nombre de réplication à exécuter, cela permet d'avoir des résultats plus proches de la réalité et donc plus fiable. En utilisant les deux paramétrages ensemble dans une seule « experiment », le résultat obtenu sera sur l'ensemble des scénarios initialisés et dont chaque scénario il y aura des résultats de chaque réplication. De plus, pour pouvoir utiliser le changement des scénarios et de modifier un paramètre d'un objet ou d'un item, il est nécessaire de créer un nouveau paramètre unique pour l'ensemble des scénarios désirés, ce paramètre va avoir comme valeur celle du paramètre de l'objet qu'on souhaite modifier. Dans le cas de cette reconfiguration, les différents scénarios à initier sont le nombre de palette à utiliser sur le système qui sortent de « source 1 ». Un nombre  $n$  de palette, où  $n \in [1 : 10]$ . De plus, un nombre de réplication de 10 à exécuter pour chaque scénario, par conséquent, un paramètre nommé nombre\_de\_palettes est créé de type nombre entier, une limite inférieure de 1, une limite supérieure à 10 et une référence sur la quantité des arrivées de la source 1, l'objet de ce paramètre est de Définir la valeur de la quantité référencée.

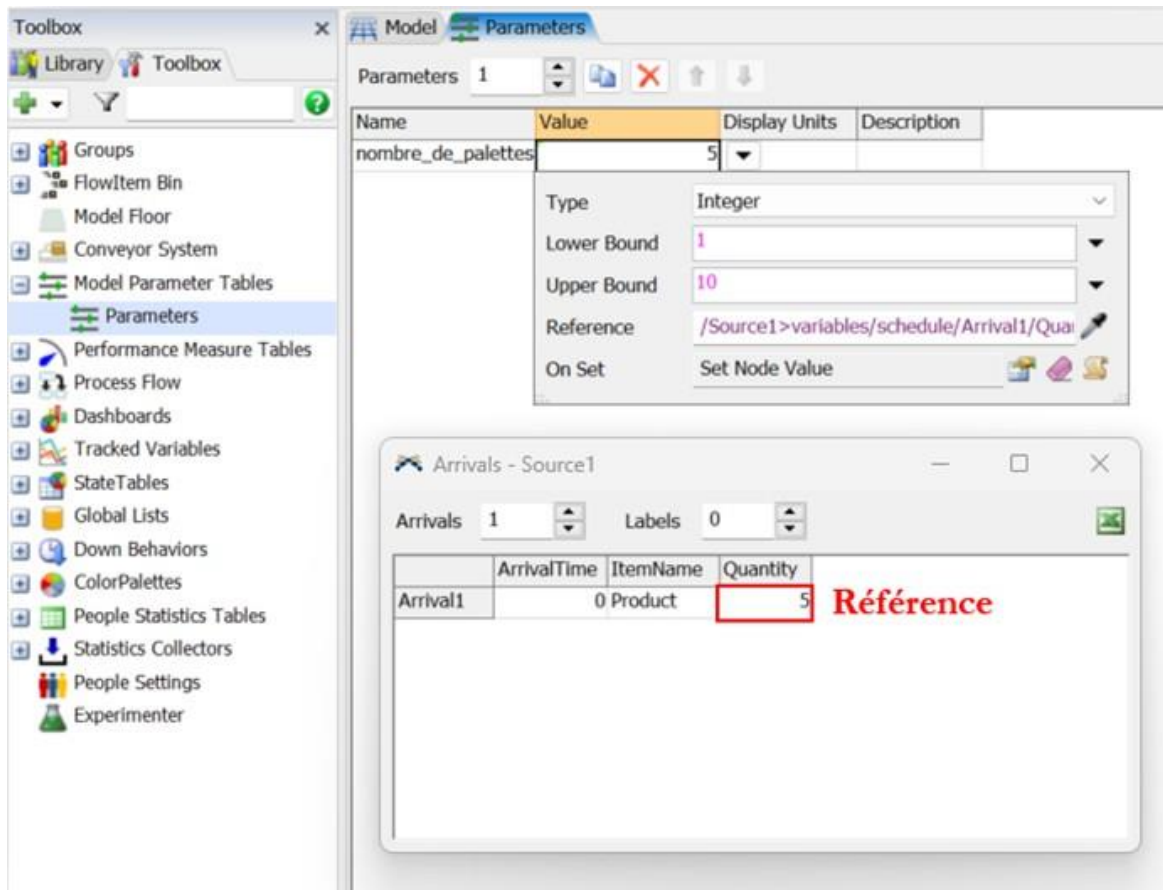


Figure 3.13: Configuration du paramètre

Afin d'utiliser ce paramètre au niveau de « experimenter », une « experiment » est ajoutée et le paramètre nombre\_de\_palettes est ensuite sélectionné, pour qu'il puisse avoir des changements par les scénarios qui vont être ajoutée, comme il a été déjà décrit, le nombre de palette est compris entre 1 et 10. D'après cela, 10 scénarios ont été créer, nommée de 1 à 10 'palette' et pour chaque nom de scénario, une valeur pareille est attribuée. De plus, un nombre de 10 réplifications et un temps de préchauffage de 10 minutes ont été assigner afin d'avoir des résultats plus fiables.

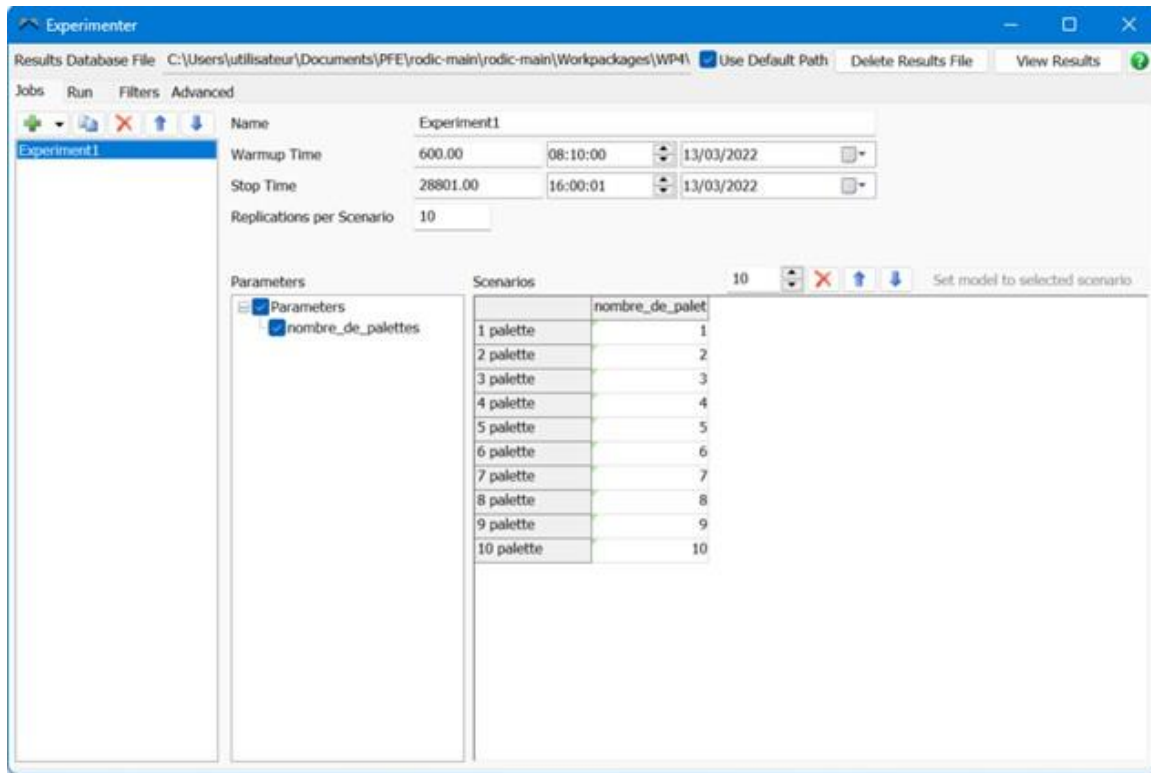


Figure 3.14: Configuration des scénarios de simulation

## 5.2 Reconfiguration n°2 : Panne du convoyeur

Cette reconfiguration arrive lors d'une panne sur le convoyeur. Dans ce cas, quatre chariots à fourche sont utilisés pour déplacer les palettes. On considèrera pour simplifier que :

- les chariots prennent et déposent aux mêmes endroits que dans la configuration utilisant le convoyeur
- les temps de déplacement des chariots à fourche d'un endroit à l'autre du convoyeur sont 1,5 fois plus lents que ceux du convoyeur (temps de prise et de dépose de la palette compris) lorsqu'ils sont pleins et les mêmes que ceux du convoyeur lorsqu'ils sont vides (au retour globalement)

### Explication

Afin de réaliser cette reconfiguration, il est primordial de faire des modifications sur le model physique est logique du système. En premier lieu, la modification à apporter au côté physique est au niveau structural, il s'agit non seulement de supprimer le convoyeur et le remplacer par des chariots a fourches qui vont transporter les palette d'un point à un autre, mais aussi il est nécessaire de changer les points de dépôt et de prise des palettes par des espaces de stockage (Queues)

Et la deuxième modification à faire sur le model initial est sur du model logique du système (process flow) où on utilise des blocs de type task sequence, afin de permettre au différent chariots à fourche de transporter les palettes d'un point à un autre

### Description : Ensemble du nouveau système

Comme déjà expliqué, la reconfiguration va engendrer des modifications radicales sur le système, voici la description des ses modification

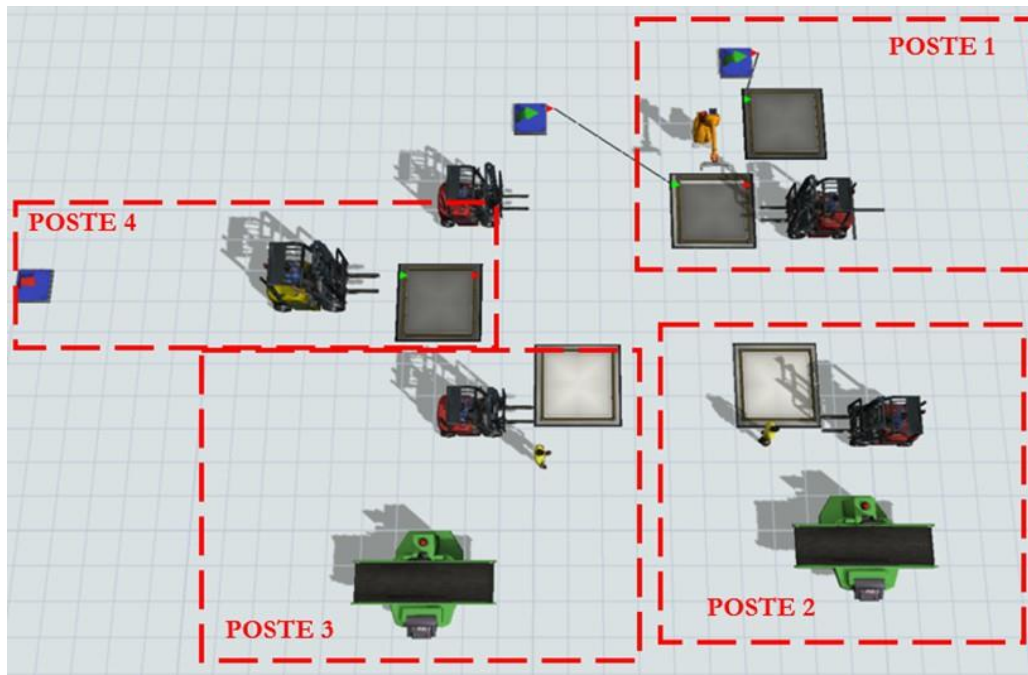


Figure 3.15: Disposition des postes de travail pour le cas de panne du convoyeur

Le système a un changement principal sur son système de maintenance, appart les 4 chariots à fourche ajoutés, des queues de stockage sont déployer au même endroit des décision points précédents (configuration initial), leur fonction consiste à ajouter un espace de stockage pour la prise et le dépôt de palette auprès de chaque poste de travail. le trajet de chaque chariot va donc être un aller-retour d'un queue à un autre, chaque chariot fait un aller en transportant la palette et un retour sans la palette comme illustrer dans la photo ci-dessous.

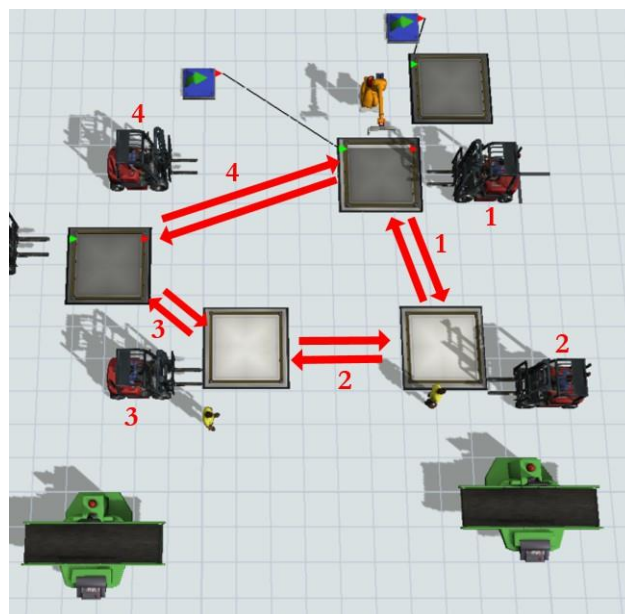


Figure 3.16: Circulation des chariots a fourche

Chaque chariot possède la même vitesse de déplacement  $V = 0,67 \text{ m/s}$  (1,5 plus lent que la vitesse du convoyeur), et une accélération et décélération égale à  $0 \text{ m/s}$



Figure 3.17: Configuration de la vitesse des chariot

De plus, les queues sont configurées a capacité de stockage de 1000 pièces, et de distribution par défaut ; premier servi premier sorti (FIFO)

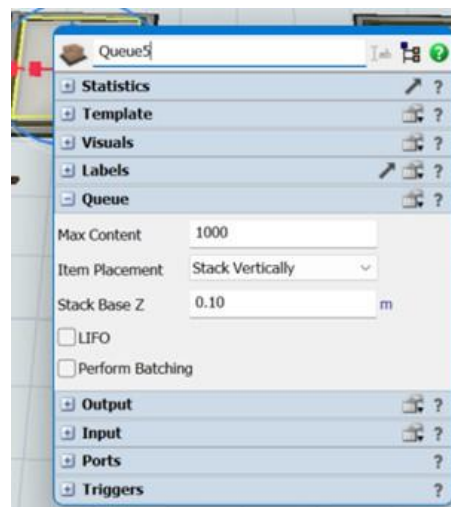


Figure 3.18: Configuration des espaces de stockage

Dans ce qui suit, les différentes modifications qui ont été apporter pour chaque poste de travail sont expliquées

### **Initialisation**

La Source1 est gardé par le même paramétrage, qui permet d'introduire les palettes, sauf que l'introduction se fait sur un espace de stockage nommé Buffer1 de capacité de stockage 1000 situé au poste 1, pour permettre à toutes les palettes d'être présentes au début de la simulation. Pour ce faire, la Source1 est connecté par une connexion 'A' de la source vers le Buffer1.

### **Poste 1**

Qui est responsable du dépôt de deux produits sur la palette une fois arrivé. Dès que les palette sont arrivées au Buffer1, ils sont transmis par pièce à un autre espace de stockage



nommé Queue3 de capacité 1, ce dernier est superposé sur le Buffer1, l'objectif est de préparer une seule palette pour le dépôt des produits, d'une autre manière, pour que le robot met les deux produits sur la seule palette disponible au Queue3, une fois les produit sont placées, un chariot a fourche (Transporter2) prend la palette chargée du Queue3 pour la déposer au Queue4 du poste 2.

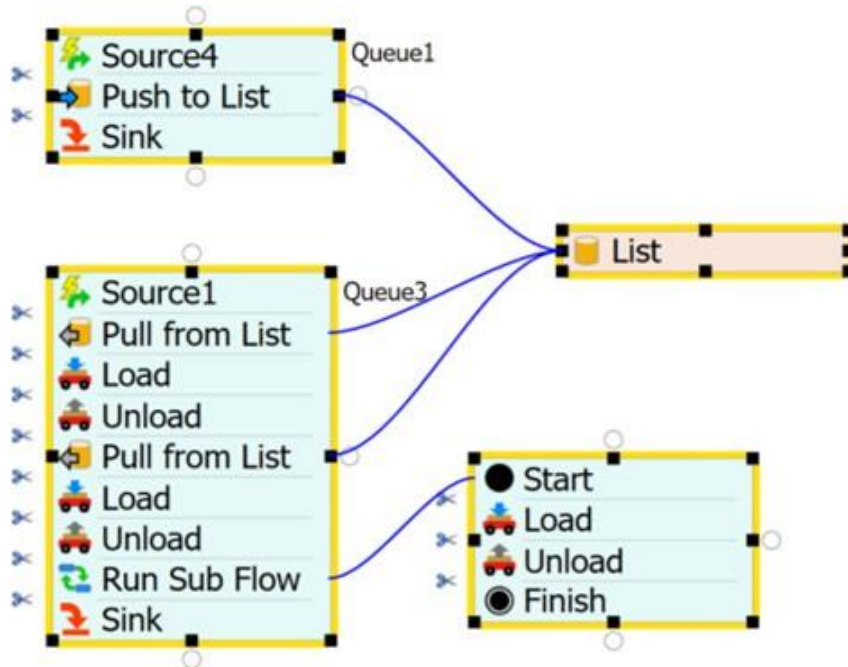


Figure 3.19: Logique de contrôle du poste 1

### Poste 2 et 3

Les postes 2 et 3, comme le model initial, ont des fonctionnements relativement symétriques et couplés. Chaque poste est constitué d'un opérateur (Operator1 pour Poste2 et Operator3 pour Poste3), d'une machine (Processor1 pour Poste2 et Processor3 pour Poste3) et d'un espace de stockage (Queue4 pour Poste2 et Queue5 pour Poste3) de capacité 1000 pièces. Les mêmes ressources logiques sont maintenues dans le process flow (nommée OP1 pour Poste2 et OP3 pour Poste3) afin de modéliser la capacité unitaire de chaque opérateur. Le jeton est créé à l'arrivée de la palette sur le Queue correspondant du poste. Le bloc Custom Code a été supprimé, une autre logique a été modéliser pour que la palette puisse arrêter aux Queues correspondantes ; sur l'onglet 'output' de chaque Queue, l'option envoyer au port (send to port) a été mis comme ne pas envoyer l'item (Do not release item) au lieu de premier disponible (First available), de cette façon chaque palette entrante à le Queue va être bloqué jusqu'à que le jeton créé arrive au bloc Load du Transporteur correspondant.



Figure 3.20: Option de l'Output des Queues

Le bloc Assign Labels permet de créer une propriété du jeton appelée itempris, et qui pointe vers le premier produit disponible sur la palette. Le bloc Acquire permet de demander l'accès

à la ressource (OP1 ou OP3 respectivement) et ainsi vérifier la disponibilité de l'opérateur. On demande en premier temps à l'opérateur1 de prendre le produit référencé par itempris (Load), on libère la palette vers le Queue5 par le bloc (Run Sub Flow) qui correspond à l'activité du Transporteur3 (Load – Unload), Le bloc Wait for Event permet de bloquer le jeton jusqu'à l'évènement de fin de traitement du produit par la machine. Puis l'opérateur prend le produit (Load) et le dépose sur la palette (Unload) située au Queue5. Enfin, on libère la ressource (OP1) afin de permettre à une prochaine palette d'être traitée. Les mêmes activités vont se répéter pour la logique du poste 3 et l'opérateur3, Une synchronisation est ensuite opérée entre les 2 logiques, afin de valider la fin du dépôt par chacun des 2 opérateurs sur la palette. On libère alors la palette (Run Sub Flow) qui va utiliser le Transporter4 qui prend la palette chargée après le traitement sur les deux proces 1 et 2 pour la mettre dans le prochain espace de stockage nommé buffer4 du poste 4, et on détruit les jetons (Sink).

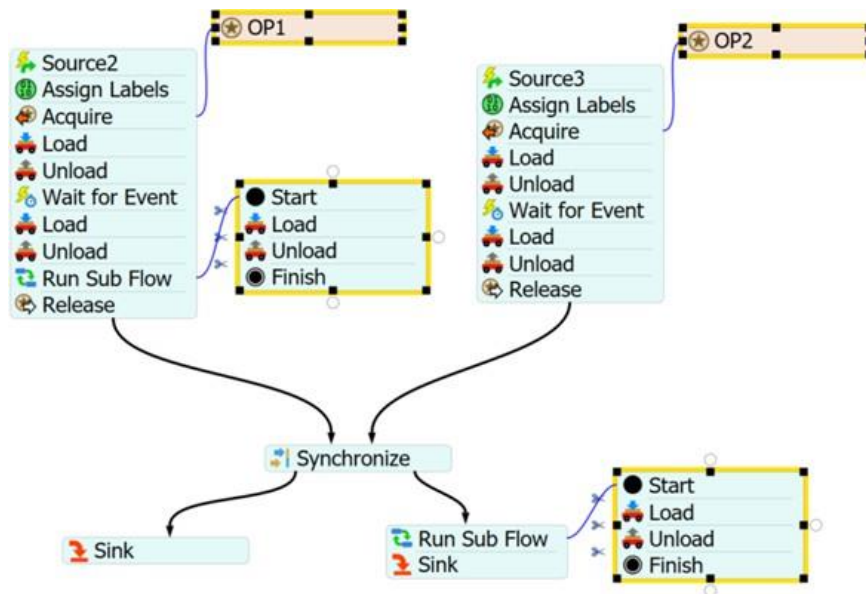


Figure 3.21: Logique de contrôle du poste 2 et 3

**Poste 4** Le dernier poste de travail est constitué d'un transporteur (Transporter5), d'une sortie de produits (Sink1) et de deux queues superposer l'un sur l'autre, le premier Queue appelé (buffer4) de capacité 1000 pièces, il reçoit les palettes arrivées du poste 3 puis il les transmettent vers le second Queue appelé (Queue6 T5) de capacité de stockage égale à 1 pièce et d'option, une fois une palette chargée soit disponible sur ce dernier, le jeton est créé et un Label (token.Node) est attribuer a cet évènement pour l'utiliser au niveau du bloc Custom Code qui permet de stopper la palette dans le (Queue6 T5) par un Code Snipet (stopobject(token.Node,1), Le bloc Assign Labels permet de créer une propriété du jeton appelée itempris, et qui pointe vers le premier produit disponible sur la palette. On demande ensuite au Transporter5 de prendre le produit référencé par itempris (Load), puis on demande au transporteur de déposer le produit dans le Sink (Unload). Le bloc Assign Label permet de référencer de nouveau le premier produit de la palette, qui est donc le second car le premier a été précédemment enlevé. On demande une deuxième fois au transporteur de prendre le produit référencé par itempris (Load) et le déposer dans le Sink (Unload) sans attendre l'achèvement de cette dernière activité, on libère la palette vide (Custom code) à la fin de la prise par un autre Code Snipet (resumeobject(token.Node,1);) pour aller au prochain espace de stockage nommé Queue2 qui est superposer sur les deux derniers du poste 4

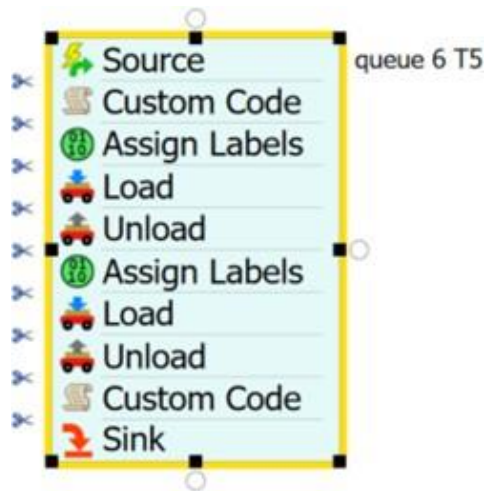


Figure 3.22: Logique de contrôle du poste 4

Dès que la palette vide soit disponible au Queue2, un autre chariot a fourche nommé Transporter1 contrôlé par une simple logique, prend la palette de ce dernier stock vers le premier espace de stockage du système, qui est Buffer1 du poste 1



Figure 3.23: Logique de contrôle du Transporter

### 5.3 Reconfiguration n°3 : Découplage des postes 2 et 3

Cette reconfiguration est proposée lorsque l'on souhaite alléger la charge de travail de l'opérateur du poste 2. L'objectif est de diminuer la distance parcourue par produit, et donc diminuer son propre temps de cycle. En contrepartie, pour lui permettre de diminuer les distances de déplacement, on supprime la possibilité pour la palette de se déplacer du poste 2 au poste 3 pendant le traitement du produit sur la machine 1. La reconfiguration est donc purement logique, sans reconfiguration matérielle.

Comme mentionnée au-dessus, il s'agit d'une reconfiguration complètement logique, donc il est bien évident que n'importe quel changement qu'il doit être apporté soit uniquement au niveau du process flow général du système. la reconfiguration prend en compte un découplage des deux poste 2 et 3, dont il faut changer le comportement de la palette sur le convoyeur au niveau du poste 2, d'après cela, une modification sur la logique du contrôle des poste 2 et 3, plus précisément sur la logique du poste 2, en changeant la position du bloc Custom Code qui libère la palette sur le convoyeur, en le positionnant après le deuxième bloc Unload de l'opérateur qui concerne le dépôt du produit traité sur la palette, de cette façon, le découplage fonctionnera comme prévu.

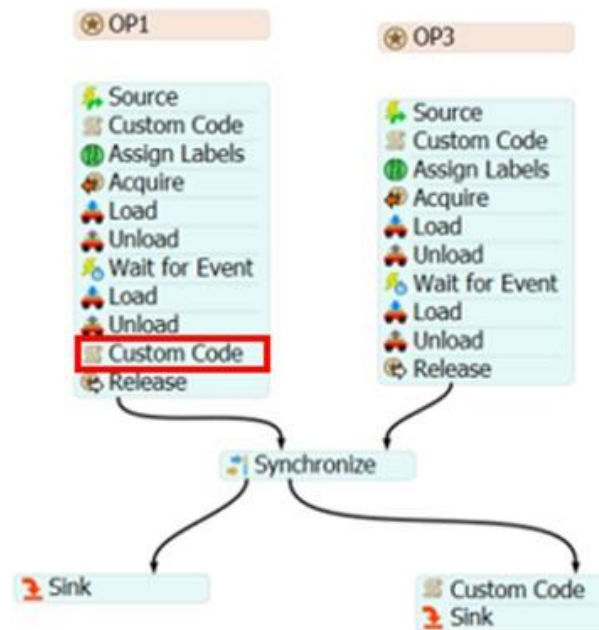


Figure 3.24: Logique du contrôle des poste 2 et 3 - cas du découplage

#### 5.4 Reconfiguration n°3 : Découplage des postes 2 et 3 (cas de panne du convoyeur)

Cette configuration est ainsi proposée pour alléger la charge de travail de l'opérateur du poste 2, dans le cas où on aura une panne au niveau du convoyeur (reconfiguration n°2). L'objectif est de minimiser la distance parcourue par le produit et donc réduire son temps de cycle, Le principe est le même que la 3ème reconfiguration, qui est de ne pas déplacer la palette du poste 2 au poste 3 pendant le traitement du produit sur la machine 1, et attendre jusqu'à la fin de traitement pour que l'opérateur 1 remet le produit traité sur la palette pour qu'elle soit libérer. La modification sera purement logique sur la reconfiguration de panne du convoyeur.

la reconfiguration prend en compte un découplage des deux poste 2 et 3, dont il faut changer le comportement de la palette sur le Queue4 qui correspond au poste 2, d'après cela, une modification sur la logique du poste 2 à été apporté, en changeant la position du bloc Run Proces Flow qui permet au Transporter2 de transporter la palette du poste 2 vers le poste 3, en le positionnant après le deuxième bloc Unload de l'opérateur qui concerne le dépôt du produit traité sur la palette, de cette façon, le découplage fonctionnera comme prévu.

# Chapter 4

## Résultats et discussion

Dans cette partie, on présente les différents résultats obtenus pour chaque configuration modéliser, l'ensemble des paramètres utiliser pour les modèles de configuration sont des paramètres à valeur stochastique, ce qui signifie que la notion de l'aléatoire est prise en compte dans les modèles associés à ces résultats, ce qui va nous donner des résultats plus proches à la réalité. Le tableau suivant 4.1 démontre la valeur de chaque paramètre utilisé.

Table 4.1: Paramètre stochastique

<b>Paramètre</b>	<b>Valeur (secondes)</b>
Temps d'arrivées des palette - initialisation -	0
Temps entre deux arrivées des produits - poste 1 -	Loi normal (14.25 ; 3.0)
Temps de première arrivée - poste 1 -	0
Temps de traitement du process - poste 2 -	10
Temps de traitement du process - poste 3 -	10

### 1 Configuration n°1 : optimisation du nombre de palette

Pour la configuration initial, le nombre optimal de palette a utiliser pour avoir des meilleurs résultats de performance est 4 palettes

## 1.1 Taux d'utilisation de chaque poste (% du temps total)

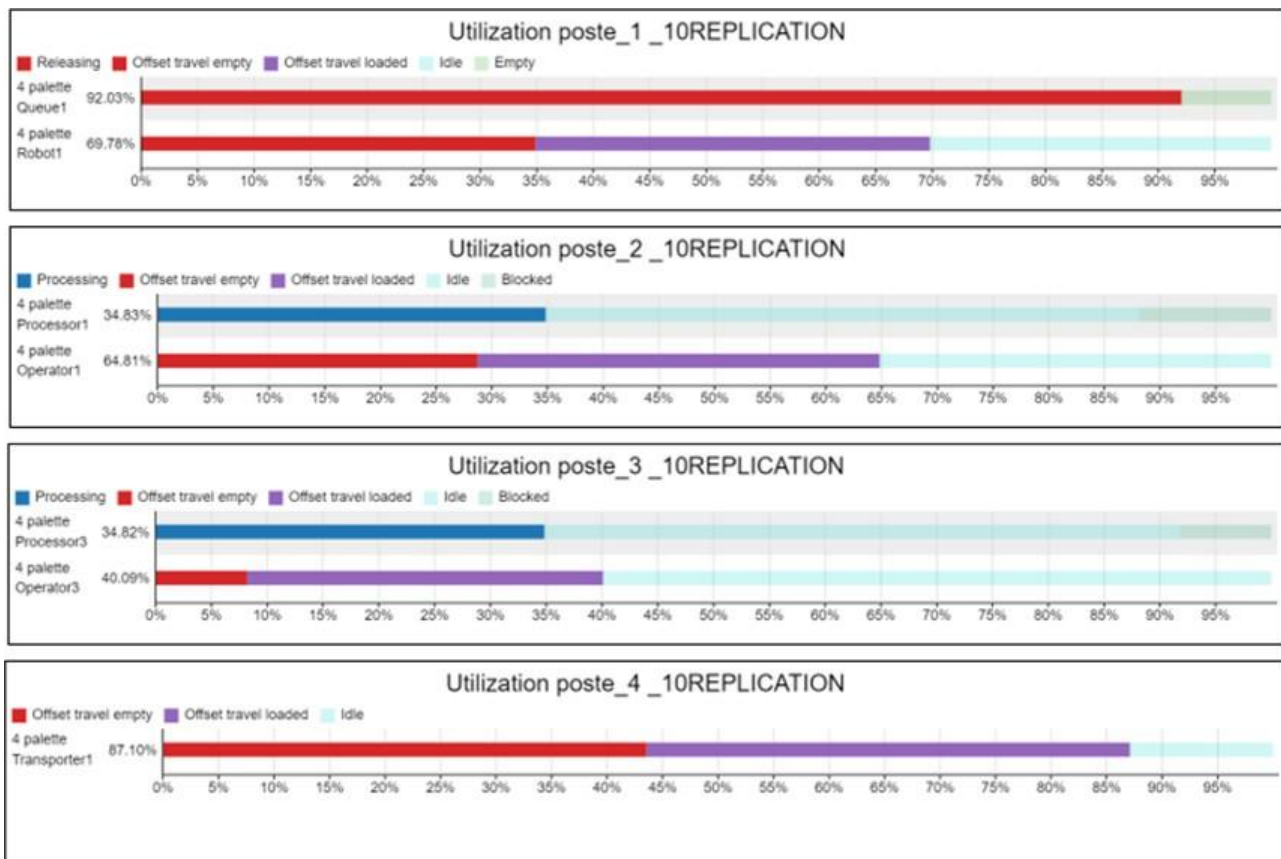


Figure 4.1: Taux d'utilisation de chaque poste pour 4 palettes - configuration n°1

D'après les résultats du taux d'utilisation des quatre postes du système de production réalisés, et pour un paramètre de quatre palettes, on constate qu'au niveau du poste 1, l'espace de stockage au bord du robot « Queue1 » est la ressource la plus utilisée parmi toutes les ressources disponibles dans le système, atteignant une utilisation de plus de 92%. Cela est peut seulement être expliqué par le manque de palette disponible au niveau du poste 1, et comme cette ressource est en constante réception des produits qui arrivent de la source 2 suivant la loi normale de moyenne 14.25, cette dernière est en cours d'utilisation pendant toute la durée de la simulation (8 heures). Car le taux d'arrivée des palettes est en constante diminution par rapport au temps d'arrivée des. De plus, la deuxième ressource du poste 1, « Robot », a été utilisée à près de 70% du temps total de simulation. Cela montre une utilisation élevée du robot, car son taux d'utilisation est réparti en trois valeurs presque identiques : repos, voyage chargé, et voyage libre et lors du voyage le robot est en état d'utilisation.

Pour les deux postes de traitement, poste 2 et poste 3, on observe une similarité du taux d'utilisation entre les quatre ressources, sauf pour l'opérateur 1 du poste 2. Ce dernier possède un taux d'utilisation plus élevé car la distance qu'il parcourt est relativement grande par rapport à la distance parcourue par l'opérateur 3 du poste 3, cette différence de taux d'utilisation peut justifier le cas de la sur-utilisation du stock du poste 1.

Et pour le dernier poste qui consiste d'une seule ressource « transporteur », est utilisé d'une façon efficace car son taux d'utilisation qui est égale à 87% pour 8 heures de travail n'indique pas un manque d'utilisation de cette ressource.

## 1.2 Nombre de produit entrés/sortis/encours

Table 4.2: Nombre de produits entrés/sortis/encours pour chaque scénario - configuration n°1

Scénario	Nombre d'entrées	Nombre de sortis	WIP
1 Palette	1523,8	554,9	1000,1
2 Palette	1978,5	1108,9	890,8
3 Palette	1978,5	1662,8	327
4 Palette	1978,5	1967,8	17,6
5 Palette	1978,5	1967,8	17,6
6 Palette	1978,5	1967,8	17,6
7 Palette	1978,5	1967,8	17,6
8 Palette	1978,5	1967,8	17,6
9 Palette	1978,5	1967,8	17,6
10 Palette	1978,5	1967,8	17,6

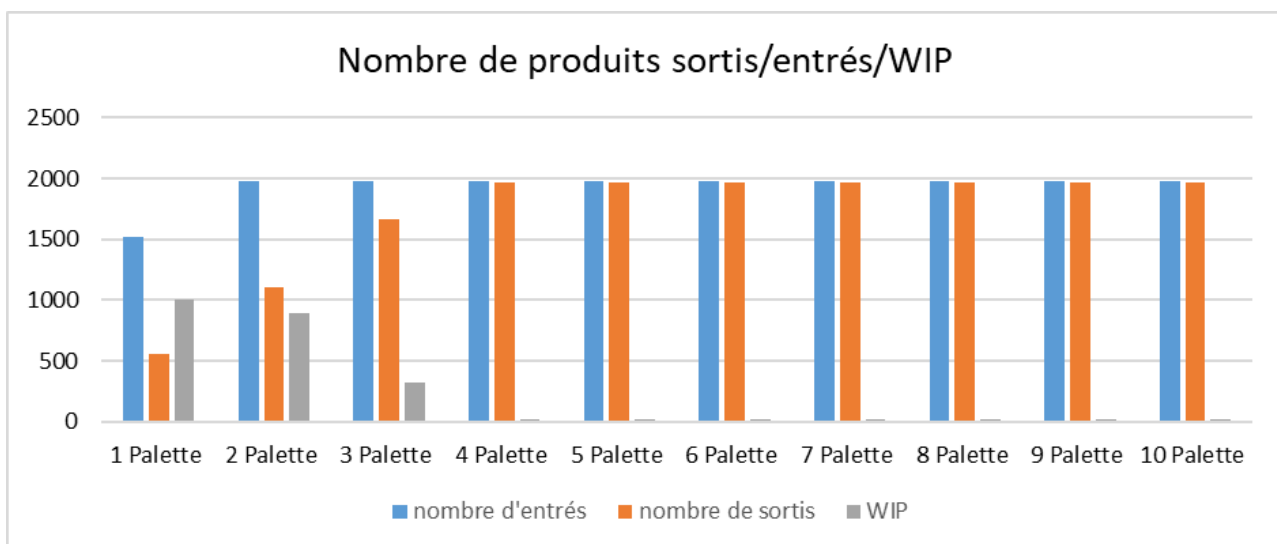


Figure 4.2: Nombre de produit entré/sorti/encours - configuration n°1

Le nombre de produit finis est considéré comme l'indicateur le plus significatif et représentatif de performance d'un système de production, pour notre cas, les résultats obtenues décrivent le nombre de produit finis en tenant compte du nombre d'entrées pour chaque scénario réalisé, en d'autres termes, pour chaque nombre de palette initialiser en commençant par 1 palette jusqu'à 10 palettes.

D'après la figure 3 et le tableau qui indique le nombre de produit entrés, sortis été en cours a la fin de simulation pour chaque scénario, on constate que le système de production est devenu stable a partir de 4 palette initialiser, au-dessous de ce nombre, le système ne se comporte pas d'une façon efficace. On peut remarquer à cause de la différence aperçue entre le nombre d'entrées et de sortis du système, qui s'augmente a chaque fois le paramètre du nombre de palette est réduit, jusqu'au cas d'une seule palette (1) où la différence entre l'input et l'output été de 969 produits en cours dans le système Pour un paramètre de quatre palettes et plus, on observe que toutes les données se sont stabilisées, y compris le nombre d'encours (WIP), qui représente le nombre de produits restants à la fin de la simulation. En d'autres termes, c'est la différence entre le nombre d'entrées et le nombre de sorties. La légère augmentation du WIP

s'explique par le temps de warm-up de 10 minutes initialisé au début. Ce dernier n'implique pas le calcul statistique des indicateurs durant les dix premières minutes du système.

### 1.3 Évolution du niveau de stock au pied du robot

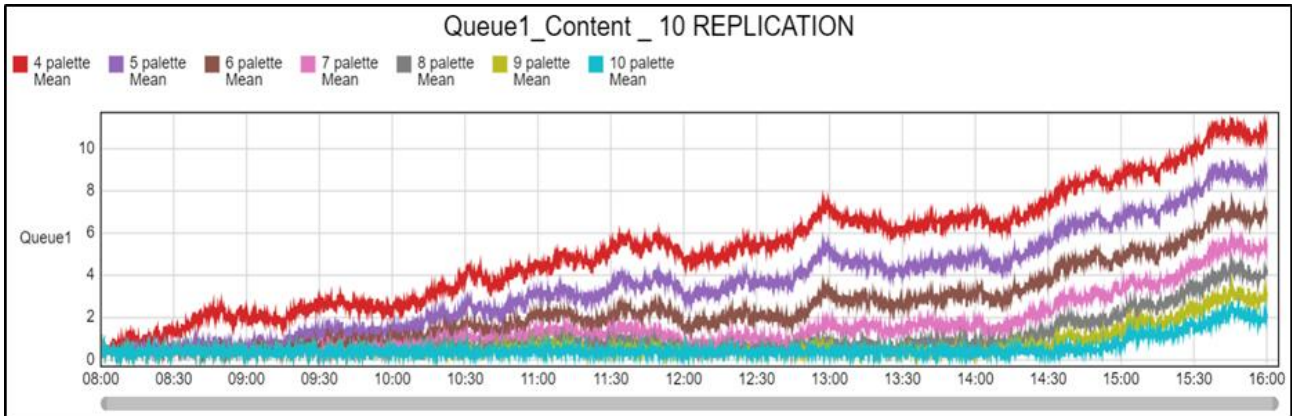


Figure 4.3: Evolution du niveau de stock pour 4 palettes et plus - configuration n°1

En analysant la figure ci-dessous, qui présente l'évolution du nombre de produits en stock au poste 1 pour un scénario de quatre palettes et plus, on observe une augmentation constante du nombre de produits en stock pendant la simulation. Plus le nombre de palettes utilisées augmente, plus le nombre de produits en attente dans le stock diminue. En d'autres termes, on peut dire que lorsqu'on augmente le nombre de palette dans le système, ces derniers vont être disponible devant le poste 1 d'une façon plus fréquente. Cependant, le comportement du système, qui implique un retard dans l'arrivée des palettes vides, finit toujours par augmenter le nombre de produits en stock. Cela indique que cette augmentation des produits en attente est due à un goulot d'étranglement dans l'un des postes de travail des retards de palettes se produisant dans un poste qui suit le poste 1.

Table 4.3: Nombre de produit en stock pour chaque scénario - configuration n°1

Scénario	Nombre de produit MAX	Nombre de produit MIN	Nombre de produit MOYEN
1 Palette	1000	29,9	668,57
2 Palette	888,7	17,9	451,45
3 Palette	322,9	5,9	163,07
4 Palette	14,4	0,2	5,34
5 Palette	12,4	0	3,72
6 Palette	10,4	0	2,48
7 Palette	8,4	0	1,57
8 Palette	6,6	0	1,02
9 Palette	5,1	0	0,7
10 Palette	3,8	0	0,54



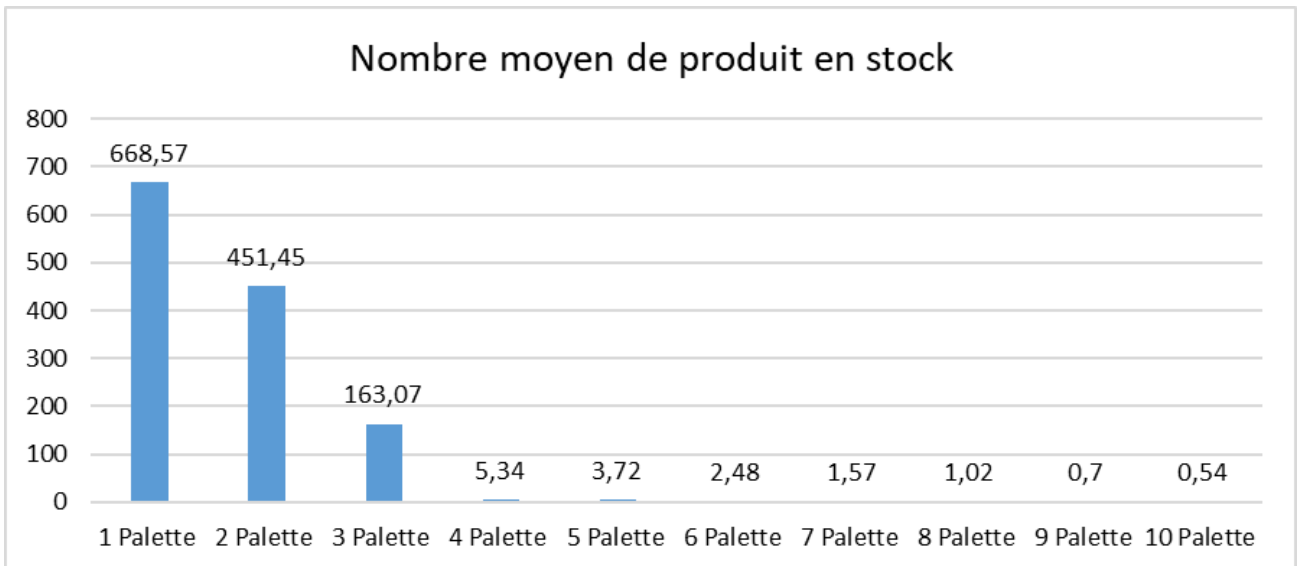


Figure 4.4: Nombre moyen de produit en stock - configuration n°1

L'interprétation des résultats du tableau ci-dessous solidifie l'idée de nombre optimale de palette a utilisé pour avoir un système de production stable qui est de 4 palettes, cependant, et comme déjà discuté, l'augmentation de ce nombre induit a des résultats temporairement plus fiables en termes de nombre de produit en attente dans le stock.

## 1.4 Temps de cycle moyen

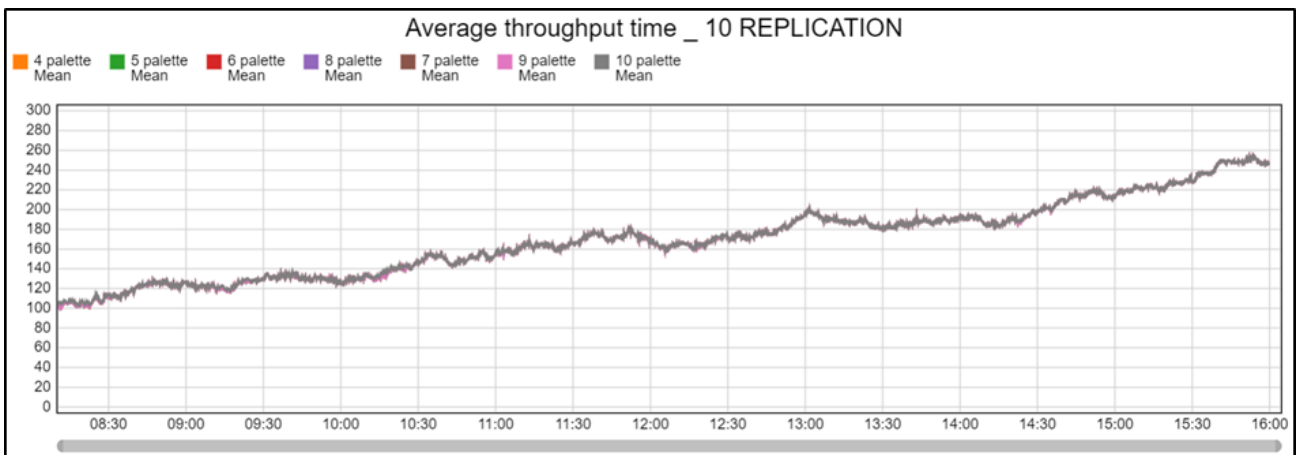


Figure 4.5: evolution du temps de cycle moyen pour 4 palettes et plus - configuration n°1

Ce graphe représente le temps de cycle moyen de chaque produit, en commençant par la source2 jusqu'au sink1, en passant par les postes de traitement, le temps de déplacement, et par l'espace de stockage du poste 1, qui est le plus important dans cet indicateur. En effet, la configuration réalisée entraîne une attente de plusieurs produits au niveau du stock. Étant donné que la file d'attente fonctionne avec la stratégie FIFO (First In, First Out), les produits arrivés en premier seront utilisés en premier par le robot, tandis que les produits en attente verront leur temps de cycle augmenter progressivement. Cela explique l'augmentation continue du temps de cycle au cours de la simulation.

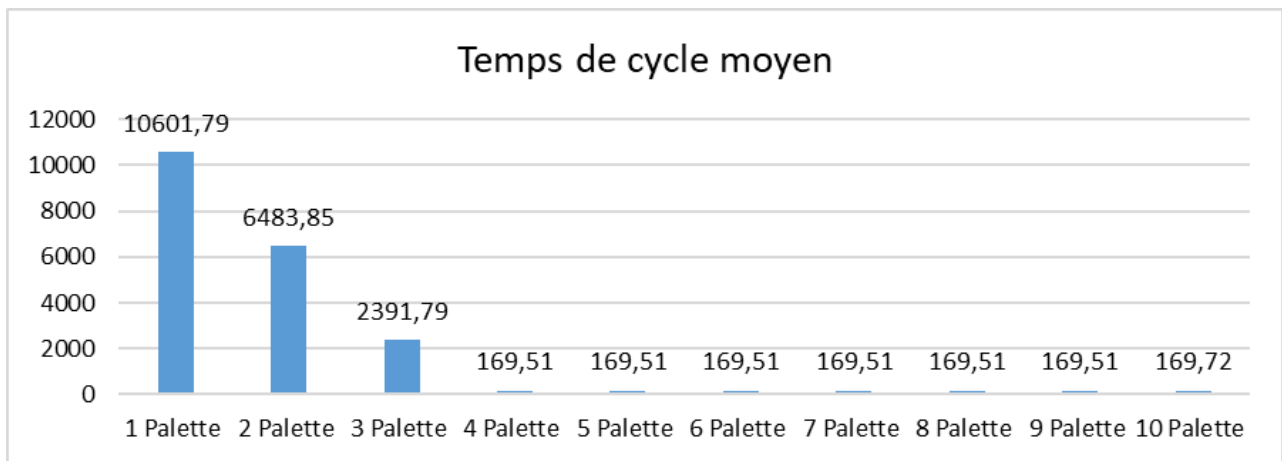


Figure 4.6: temps de cycle moyen - configuration n°1

Table 4.4: Temps de cycle des produits pour chaque scénario - configuration n°1

Scénario	Temps de cycle moyen	Temps de cycle max	Temps de cycle min
1 Palette	10601,79	20716,4	449,92
2 Palette	6483,85	12672,66	308,09
3 Palette	2391,79	4644,93	161,05
4 Palette	169,51	291,41	90,82
5 Palette	169,51	291,41	90,82
6 Palette	169,51	291,41	90,82
7 Palette	169,51	291,41	90,82
8 Palette	169,51	291,41	90,82
9 Palette	169,51	291,41	90,82
10 Palette	169,72	291,41	91,32

Les résultats ci-dessous présente les valeurs exactes su temps de cycle des produits pour chaque scénario, allant de 1 palette jusqu'à 10 palettes. D'où on constate une autre affirmation du nombre de palette optimale a utilisé pour des résultats stables en terme du temps de cycle. D'une façon plus technique, l'utilisation de 4 palettes et plus, permet d'avoir autant de palette disponible auprès du poste 1, afin de les utilisées pour déplacer les produits sur le convoyeur central, et diminuer le temps d'attente des produits en stock et ce qui implique de diminuer le temps de cycle de ces derniers

### 1.5 Évolution du nombre de palettes disponibles sur le convoyeur entre le poste 4 et le poste 1

La raison principale pour laquelle nous avons utilisé cet indicateur est de déterminer si, à un moment donné, le nombre de palettes entre les deux postes tombe à zéro. Si cela se produit, les produits en stock au poste 1 auront un temps d'attente plus long, ce qui entraînera un goulot d'étranglement au poste 1, posant des problèmes sur l'efficacité et l'utilisation des autres ressources.

La figure ci-dessous montre l'évolution du nombre de palettes dans le convoyeur entre le poste 4 et le poste 1 pour les scénarios de quatre palettes et plus. On constate que, durant le temps de simulation, le nombre de palettes finit toujours par diminuer sans jamais atteindre zéro. Cette diminution est expliquée par le fait que d'autres postes arrêtent la circulation des

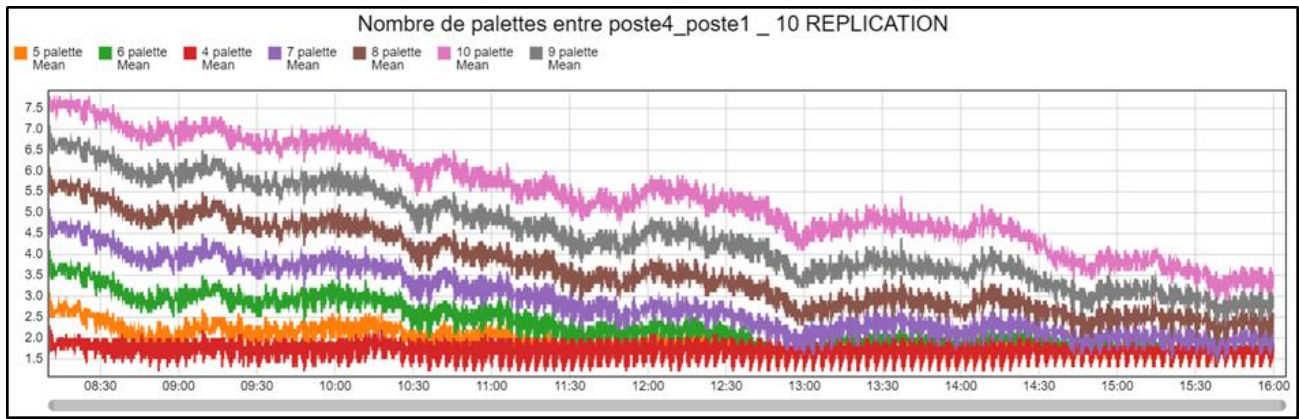


Figure 4.7: Evolution du nombre de palette entre poste 4 et poste 1 - configuration n°1

palettes sur le convoyeur. Ainsi, les palettes n'arrivent pas en même quantité que au début de la simulation. Le nombre de palettes diminue jusqu'à se stabiliser à un niveau précis.

Table 4.5: Nombre de palette entre le poste 4 et poste 1 pour chaque scénario - configuration n°1

Scénario	Nombre de palette moyen	Nombre de palette MAX	Nombre de palette MIN
1 Palette	0,48	1	0
2 Palette	0,96	2	0
3 Palette	1,44	2	1
4 Palette	1,73	2,9	1
5 Palette	1,94	3,8	1
6 Palette	2,33	4,8	1
7 Palette	2,89	5,8	1
8 Palette	3,62	6,8	1
9 Palette	4,47	7,8	1,2
10 Palette	5,39	7,9	1,6

Le tableau ci-dessous présente les différents résultats du nombre de palettes entre le poste 4 et le poste 1 à la fin de la simulation. Pour chaque scénario réalisé, on constate que l'utilisation de 1 ou 2 palettes implique, à un moment donné, un manque de palettes entre les deux postes, selon les résultats du nombre minimal de palettes. Ces résultats renforcent l'idée que la gestion du nombre de palettes dans ce système est primordiale. Selon cet indicateur, le nombre de palettes nécessaire pour éviter un manque est de 3, cependant cette information ne précise pas le nombre de palette optimal à utiliser dans l'ensemble du système de production

## 2 Configuration n°2 : panne du convoyeur

Pour cette configuration, le nombre optimal de palette à utiliser pour avoir des meilleurs résultats de performance est 4 palettes

### 2.1 Taux d'utilisation de chaque poste (% du temps total)

Dans la figure ci-dessous, on constate les différents taux d'utilisation des ressources utilisées dans ce cas de configuration, où on ajoute les 4 chariots élévateurs qui servent à transporter

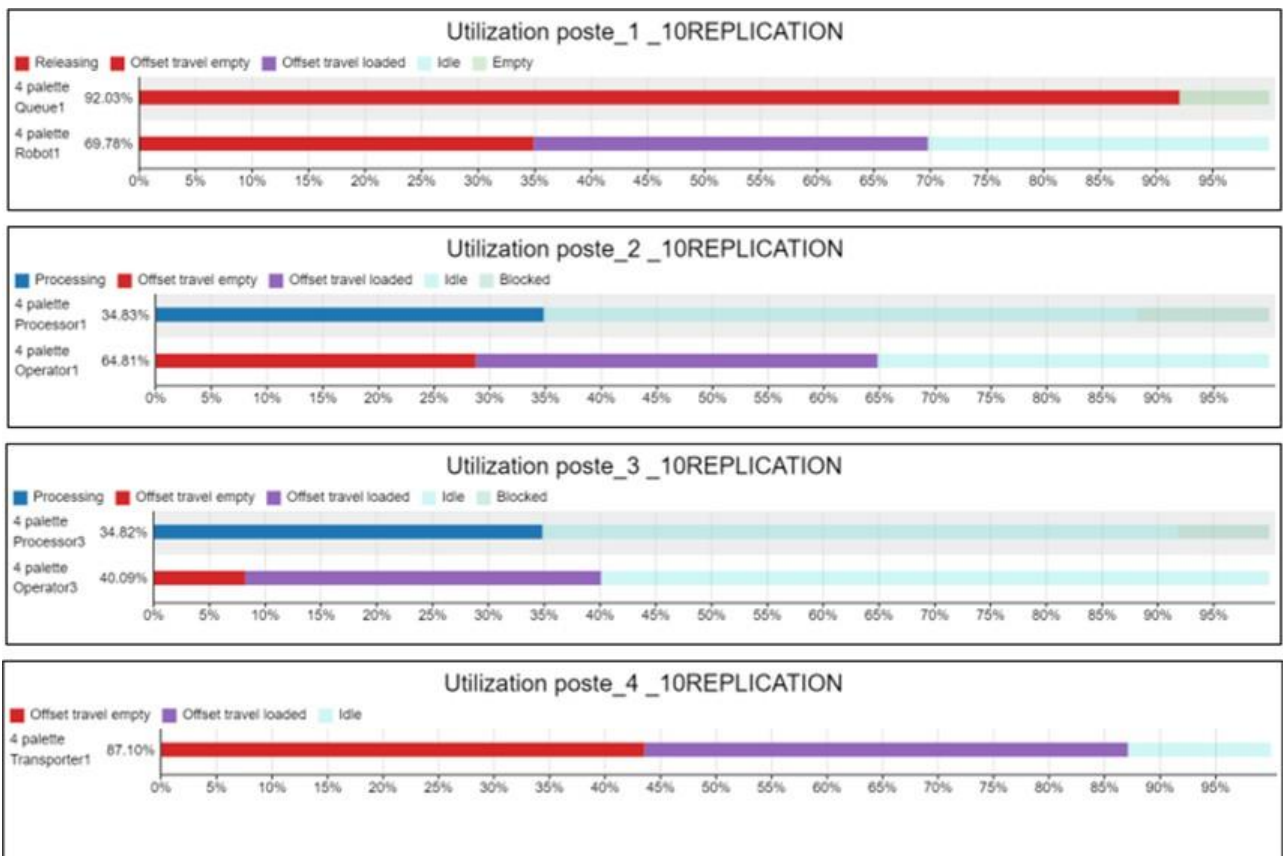


Figure 4.8: Taux d'utilisation de chaque poste pour 4 palettes - configuration n°2

les palettes d'un poste de travail à un autre. En analysant les résultats des taux des ressources des différents postes, on déduit qu'une petite différence est apparue par rapport aux taux d'utilisation de la configuration initiale. Par exemple, l'espace de stockage des produits au poste 1 possède un taux d'utilisation élevé, ainsi que les ressources des deux postes de traitement 2 et 3, où l'on trouve que leurs taux sont presque identiques à ceux de la première configuration. De ce fait, on conclut que le remplacement du convoyeur central par les 4 chariots élévateurs a été efficace en termes de taux d'utilisation des ressources. De plus, en dehors des ressources standards du système, nous avons préféré analyser le comportement des transporteurs ajoutés par leur taux d'utilisation durant la simulation. Les résultats montrent que ces derniers n'ont pas été utilisés à leur capacité maximale en raison de la courte distance qui existe entre chaque poste et un autre.

## 2.2 Nombre de produit entrés/sortis/encours

Table 4.6: Nombre de produit entré/sorti/encours pour chaque scénario - configuration n°2

Scénario	Nombre d'entrées	Nombre de sortis	WIP
1 Palette	1487,8	519	1001
2 Palette	1978,5	1037	963,7
3 Palette	1978,5	1555,2	435,7
4 Palette	1978,5	1968,7	16,6
5 Palette	1978,5	1968,7	16,6
6 Palette	1978,5	1968,7	16,6
7 Palette	1978,5	1968,7	16,6
8 Palette	1978,5	1968,7	16,6
9 Palette	1978,5	1968,7	16,6
10 Palette	1978,5	1968,7	16,6

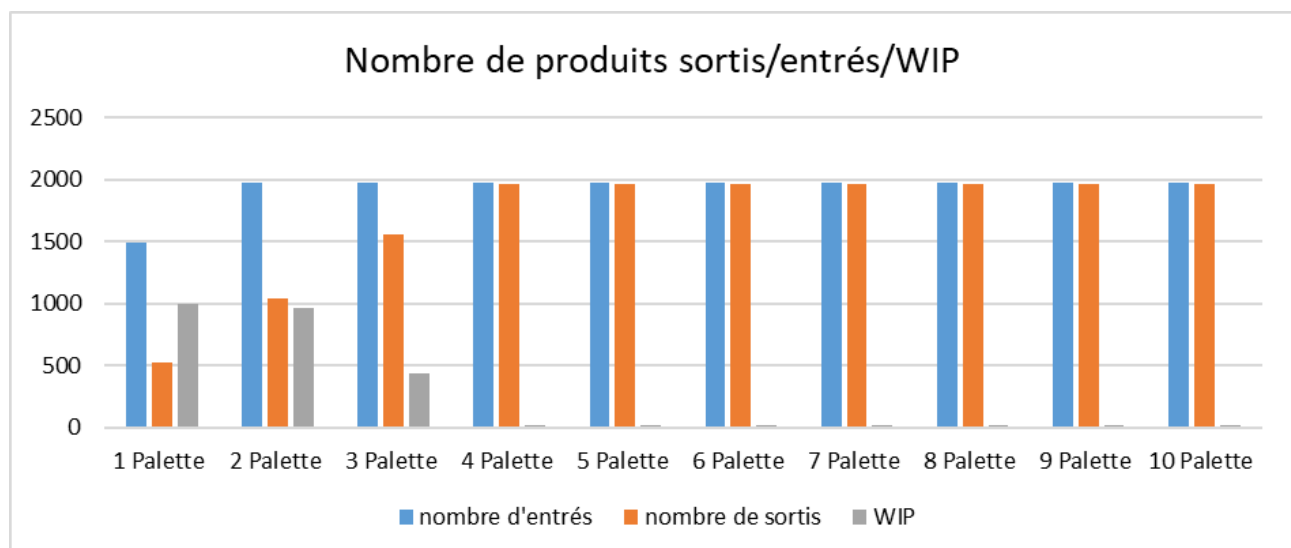


Figure 4.9: Nombre de produit entré/sorti/encours - configuration n°2

Comme déjà discuté, cet indicateur est primordial pour faire une analyse globale de la performance du système de production. La figure ci-dessous présente la différence entre les entrées

et les sorties durant le temps de simulation pour chaque scénario de nombre de palettes défini. On constate des résultats très similaires à ceux de la configuration initiale, où le nombre de palettes nécessaire pour avoir une stabilité du système est de 4 palettes. On peut dire que le changement du convoyeur par les chariots élévateurs n'a pas abouti à des résultats différents. Autrement dit, les chariots initialisés ont réalisé le même travail avec la même efficacité que le convoyeur, voire une légère amélioration des résultats selon le tableau du nombre de produits sortis, où l'on constate une petite augmentation de 10 produits finis pour la même durée de simulation, qui est de 8 heures

### 2.3 Évolution du niveau de stock au pied du robot

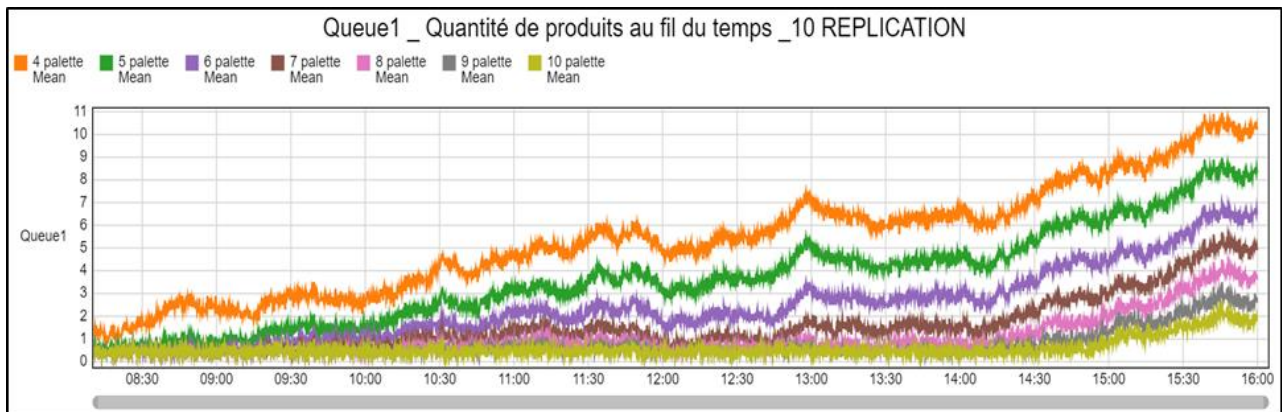


Figure 4.10: Évolution du niveau de stock pour 4 palettes et plus - configuration n°2

Dans la figure ci-dessous, qui présente l'évolution du nombre de produit au niveau du stock du poste 1 pour les scénarios de 4 palettes et plus, on observe ainsi une similarité d'évolution du stock de la configuration initial, qui est une constante augmentation du nombre de produit au niveau du stock durant le temps de simulation, plus le nombre de palette utilisé est augmenter plus le nombre de produit en attente dans le stock diminue. A noter que, identiquement à la première configuration, cette augmentation des produits en attente dans le stock est due à un problème au niveau des poste de travail, qui pose un retards d'arrivé des palettes au poste 1.

Table 4.7: Nombre de produit en stock pour chaque scénario - configuration n°2

Scénario	Nombre de produit MAX	Nombre de produit MIN	Nombre de produit MOYEN
1 Palette	1000	30,2	677,13
2 Palette	960,7	18,2	488,41
3 Palette	431,3	7,6	218,45
4 Palette	14,1	0,1	5,34
5 Palette	12,1	0	3,67
6 Palette	10,1	0	2,43
7 Palette	8,1	0	1,55
8 Palette	6,3	0	1,03
9 Palette	4,8	0	0,73
10 Palette	3,6	0	0,59

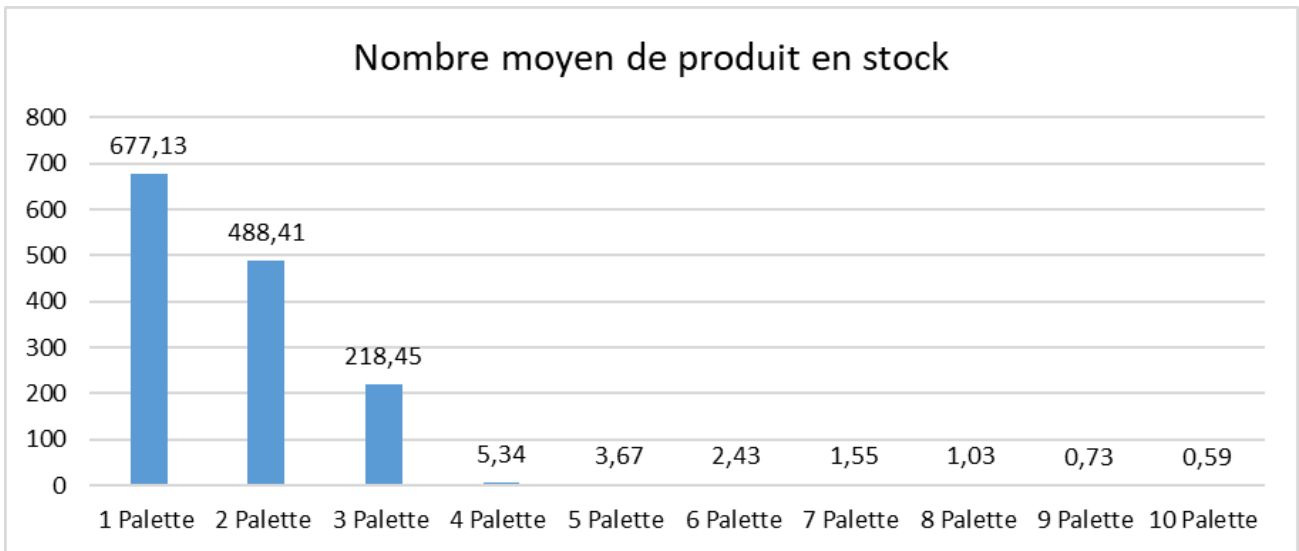


Figure 4.11: Nombre moyen de produit en stock - configuration n°2

Ces deux figures appuient sur l'idée de l'utilisation d'un nombre optimal de palette dans ce système, pareil au cas précédent, la configuration initiale, on déduit pour ce cas que le nombre de palette minimal utilisé pour avoir les meilleurs résultats est de 4 palettes, ici, les résultats sont présentés comme le nombre moyen de produit en stock, qui est largement grand pour les premiers scénarios de 1, 2 et 3 palettes dans le système, et les résultats se stabilisent pour les scénarios de 4 palettes et plus. Le même cas peut être interprété les résultats du nombre maximal de produits en stock, où on constate de grandes valeurs pour les premiers scénarios de 1, 2 et 3 palettes dans ce cas ; nombre maximal produit en stock, et une diminution et une stabilité des valeurs pour les scénarios de 4 palettes et plus. Cependant, l'apparition de produits en stock dans les résultats de nombre de produit minimal peut sembler illogique, mais on peut justifier cette apparition par le fait d'avoir mis un temps de préchauffage de 10 minutes (warm-up time) avant le début de simulation, si ce dernier n'a pas été initialisé, le nombre de produit minimal aura été 0 produit pour tous les scénarios réalisés.

## 2.4 Temps de cycle moyen

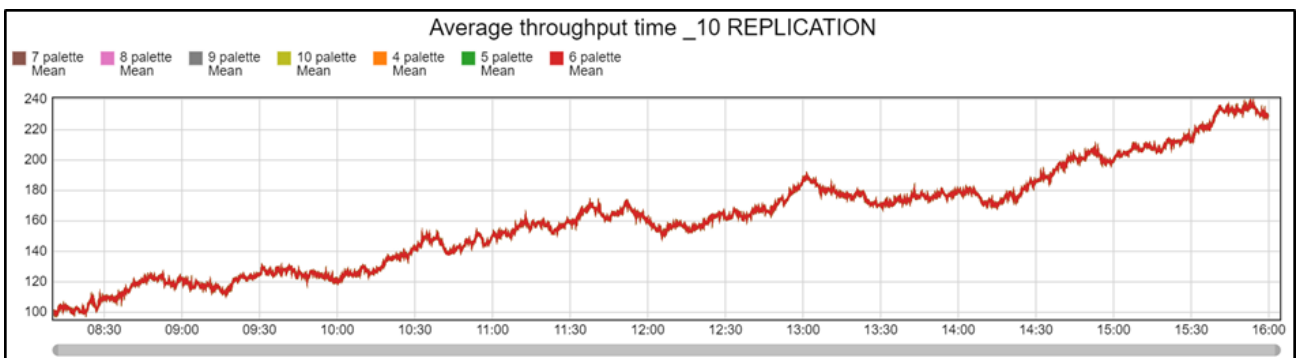


Figure 4.12: Temps de cycle moyen des produits pour 4 palettes et plus - configuration n°2

Identiquement à l'évolution du nombre de produit en stock, l'évolution du temps de cycle moyen des produits dans ce système possède la même allure, ou on observe une constante augmentation

du temps du cycle, ce qui implique l'existence d'un problème au niveau des postes de travail et que la reconfiguration réalisée n'a pas abouti à une résolution de ce problème.

Table 4.8: Temps de cycle des produits pour chaque scénario - configuration n°2

Scénario	Temps de cycle moyen	Temps de cycle max	Temps de cycle min
1 Palette	10841,2	21240,73	478,52
2 Palette	7004,5	13702,16	337,83
3 Palette	3176,34	6176,69	189,85
4 Palette	161,11	278,47	86,82
5 Palette	161,11	278,47	86,82
6 Palette	161,11	278,47	86,82
7 Palette	161,11	278,47	86,82
8 Palette	161,11	278,47	86,82
9 Palette	161,11	278,47	86,82
10 Palette	161,11	278,47	86,82

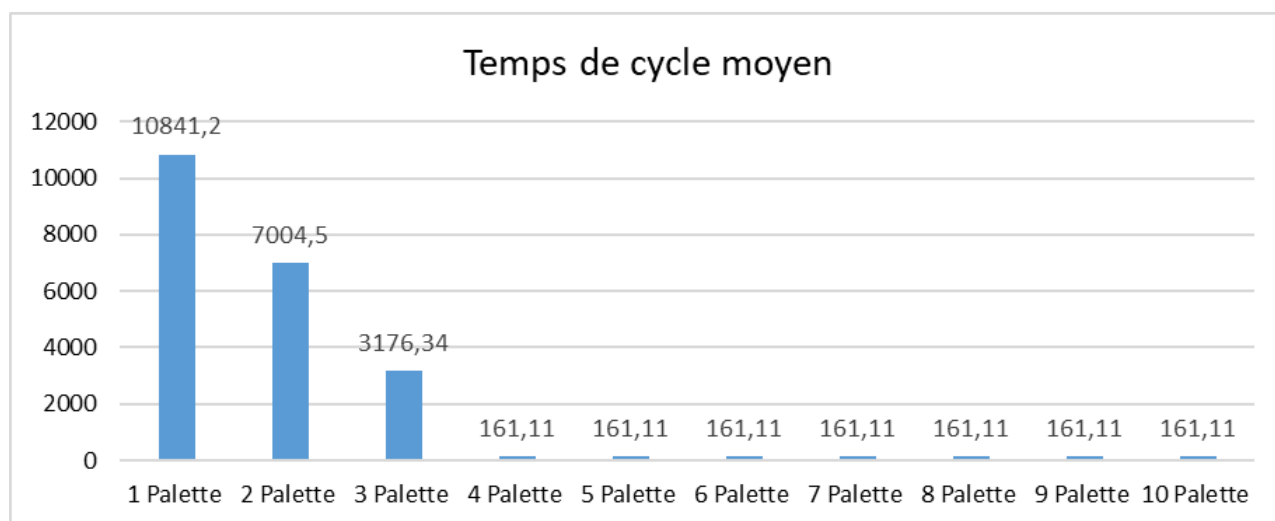


Figure 4.13: Temps de cycle moyen des produits - configuration n°2

L'analyse des résultats de ces figures ci-dessous est pratique la même que celle de l'évolution du nombre de produit en stock, car elle souligne les résultats obtenus du nombre de palette optimale à utiliser dans ce système de production.



## 2.5 Évolution du nombre de palettes disponibles sur le convoyeur entre le poste 4 et le poste 1

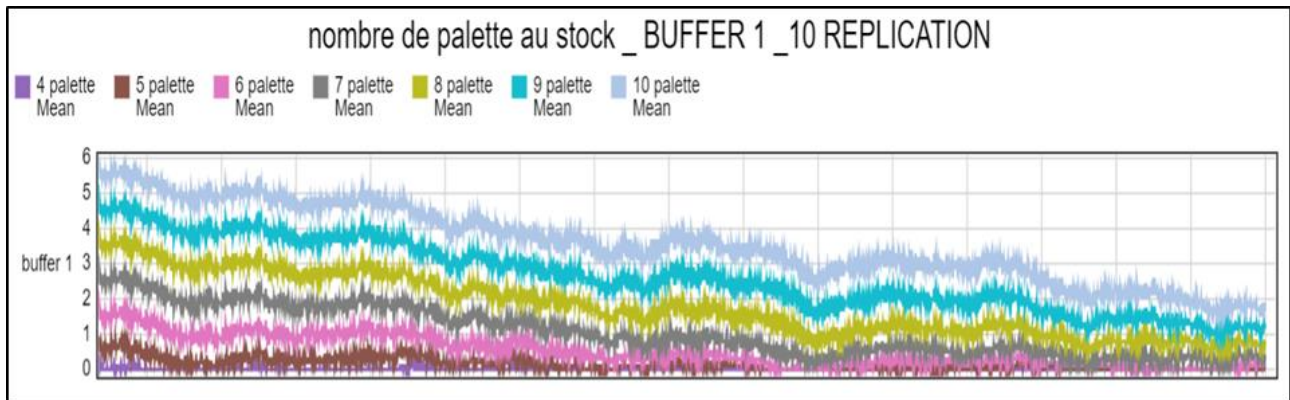


Figure 4.14: Évolution du nombre de palette entre poste 4 et poste 1 - configuration n°2

Table 4.9: Nombre de palette entre le poste 4 et poste 1 pour chaque scénario - configuration n°2

Scénario	Nombre de palette moyen	Nombre de palette MAX	Nombre de palette MIN
1 Palette	0,48	1	0
2 Palette	0,96	2	0
3 Palette	1,44	2	1
4 Palette	1,73	2,9	1
5 Palette	1,94	3,8	1
6 Palette	2,33	4,8	1
7 Palette	2,89	5,8	1
8 Palette	3,62	6,8	1
9 Palette	4,47	7,8	1,2
10 Palette	5,39	7,9	1,6

Les résultats obtenus dans ces figures, dépend de l'évolution du nombre de palette au niveau du espace de stockage situé au poste 2, cet espace est responsable de l'accumulation des palettes vide disponible auprès du poste 1, dans ce cas, il est utilisé pour révéler l'évolution du nombre de palette auprès du même poste de travail. de ce fait, l'objectif est de déterminer si a un moment donnée durant la simulation le nombre de palette en stock soit nul, ce qui poser un problème pour la gestion de flux des produit En analysant ces résultats, on observe la même évolution de nombre de palette de la configuration initial, d'où le nombre de palettes finit toujours par diminuer sans jamais atteindre une valeur nulle. Ceci démontre encore une fois que qu'un problème de décalage ou retard des palette au niveau des poste de travail.

## 3 Configuration n°3 : découplage des postes 2 et 3

Les résultats de cette reconfiguration démontrent que le nombre de palette optimal est égale à 5 palettes

### 3.1 Taux d'utilisation de chaque poste (% du temps total)

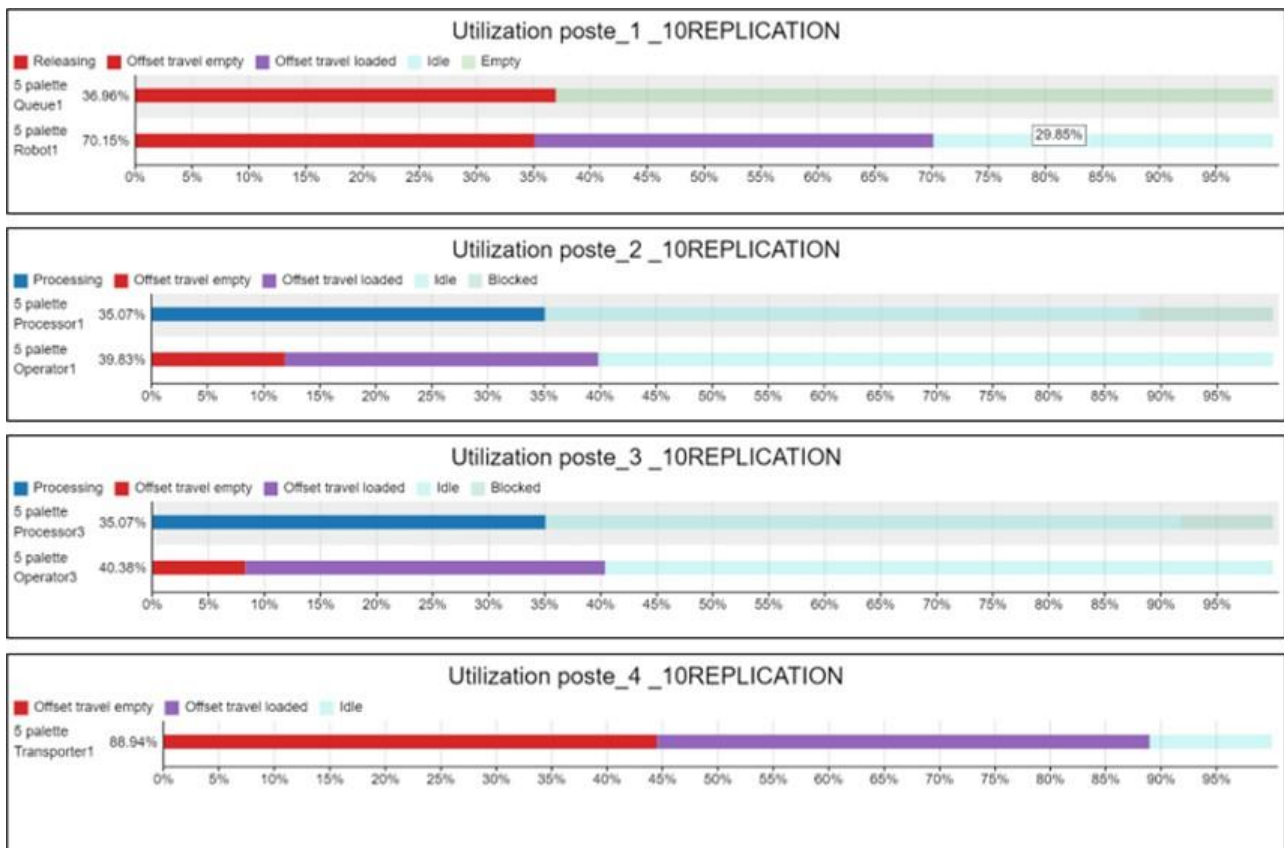


Figure 4.15: Taux d'utilisations de chaque poste pour 5 palettes - configuration n°3

D'après les résultats du taux d'utilisation des ressources pour le scénario de 5 palettes, on constate une large différence dans l'utilisation de l'espace de stockage du poste 1 par rapport à la première et la deuxième configuration, où les deux postes de traitement ont été couplé et le comportement du premier opérateur été différent de son comportement du cas de cette configuration. De ce fait, le système de production, après ce découplage n'a pas eu de problème de retard ou de décalage des palettes qui arrivent au poste 1 et le taux d'utilisation du stock est devenue près de 37% pour 8 heures de simulation. En revanche, le robot manipulateur n'a pas connu du changement sur son taux d'utilisation où il a resté a près de 70%, ce qui explique que cette reconfiguration n'a induit que à l'amélioration des résultats car cette dernière ressource travail avec la même efficacité et de même, une meilleure utilisation du stock des produits. De plus, les résultats de taux d'utilisation des ressources des deux postes de traitement 1 et 2 démontrent que cette reconfiguration a effectivement allégé la charge de travail sur l'opérateur 1 du poste 2, d'où on constate une large diminution de son taux d'utilisation et être similaire a celle du deuxième opérateur. En résumé, on peut conclure que par ce découplage les deux postes de traitement sont utilisés par la même cadence. Enfin, le taux d'utilisation du transporteur du dernier poste de travail n'a pas changer pour cette reconfiguration, ce qui signifie que le taux d'arrivé des palettes chargées au poste 4 n'a pas connue de changement, et ce qui justifie le même taux d'utilisation pour toute la configuration.

### 3.2 Nombre de produit entrés/sortis/encours

Table 4.10: Nombre de produit entré/sorti/encours pour chaque scénario - configuration n°3

scénario	Nombre d'entrées	Nombre de sortis	WIP
1 Palette	1465,8	496	1002
2 Palette	1971,5	992,4	1001,7
3 Palette	1978,5	1488,4	504,7
4 Palette	1978,5	1973,7	12,3
5 Palette	1978,5	1978,1	7,4
6 Palette	1978,5	1978,1	7,4
7 Palette	1978,5	1978,1	7,4
8 Palette	1978,5	1978,1	7,4
9 Palette	1978,5	1978,1	7,4
10 Palette	1978,5	1978,1	7,4

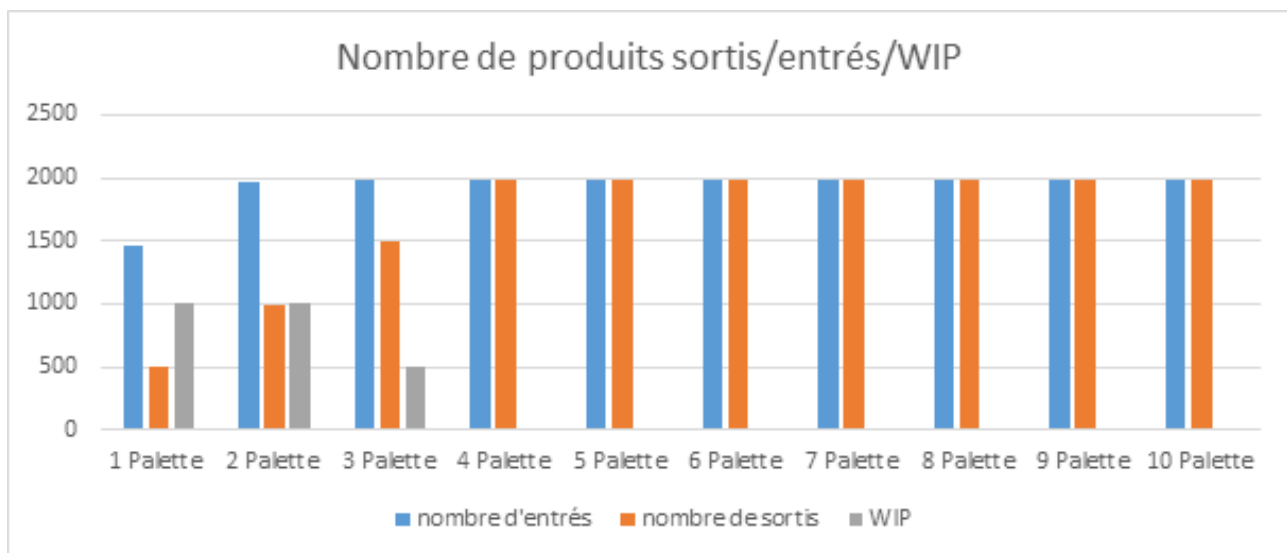


Figure 4.16: Nombre de produit entre/sorti/encours - configuration n°3

D'après les résultats obtenus concernant le nombre de produits entrés et finis de production, on peut déduire, dans un premier temps, que le nombre optimal de palettes à utiliser est de quatre palettes pour ce cas de découplage des postes de traitement, puisque ces résultats sont identiques en termes de nombre d'entrées et de sorties du système. Cependant, si l'on observe les valeurs des encours pour le cas de quatre palettes, on découvre une légère augmentation de cinq produits en cours par rapport aux valeurs des encours pour le cas de cinq palettes et plus. Par conséquent, on ne peut pas directement déterminer le nombre optimal de palettes à utiliser à partir de cet indicateur de performance. Il est important de noter que les résultats des encours pour les scénarios réalisés peuvent sembler illogiques. En effet, l'initialisation d'un warm-up conduit à un manque de valeurs statistiques des entrées du système au début de chaque simulation.

### 3.3 Évolution du niveau de stock au pied du robot

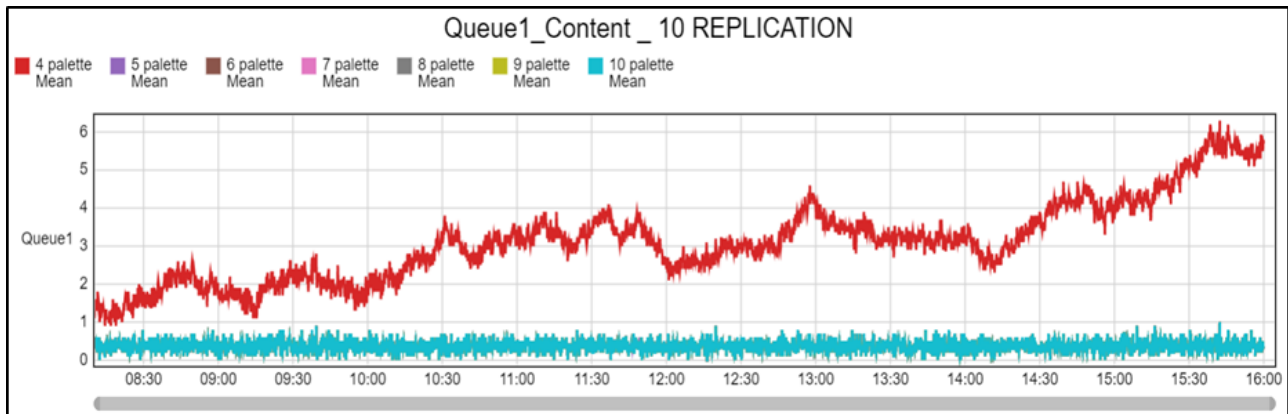


Figure 4.17: Evolution du nombre de produits en stock - configuration n°3

L'analyse de l'évolution de ce stock est primordiale pour bien évaluer la performance globale de ce système, car c'est le point qui détermine l'efficacité de la configuration choisie. En analysant le figure ci-dessous, qui présente l'évolution du nombre moyen de produits en stock pour le scénario de quatre palettes et plus, on constate que, pour le cas de quatre palettes dans le système découplé, le nombre moyen de produits en attente est en constante augmentation. Comme pour les dernières configurations réalisées, cette augmentation est due à un nombre insuffisant de palettes nécessaires pour la bonne circulation des produits dans cette configuration. Cependant, pour les scénarios de cinq palettes et plus, on observe une stabilité constante du nombre moyen de produits en stock au fil du temps. Cela est dû au changement de comportement du système en général grâce au découplage des postes de traitement. Avec ce changement et l'utilisation d'au moins cinq palettes dans le système, le problème du goulot d'étranglement a été résolu, éliminant ainsi les attentes en stock. En conclusion, on peut déduire que le nombre optimal de palettes à utiliser est de cinq, et que le goulot d'étranglement se situait au niveau du poste 2, où l'opérateur était sur-utilisé pendant le temps de simulation.

Table 4.11: Nombre de produit en stock pour chaque scénario - configuration n°3

Scénario	Nombre de produit MAX	Nombre de produit MIN	Nombre de produit MOYEN
1 Palette	1000	30,2	682,43
2 Palette	999,7	19,4	511,94
3 Palette	500,8	9,2	253,65
4 Palette	10,2	0	3,1
5 Palette	2	0	0,37
6 Palette	2	0	0,37
7 Palette	2	0	0,37
8 Palette	2	0	0,37
9 Palette	2	0	0,37
10 Palette	2	0	0,37

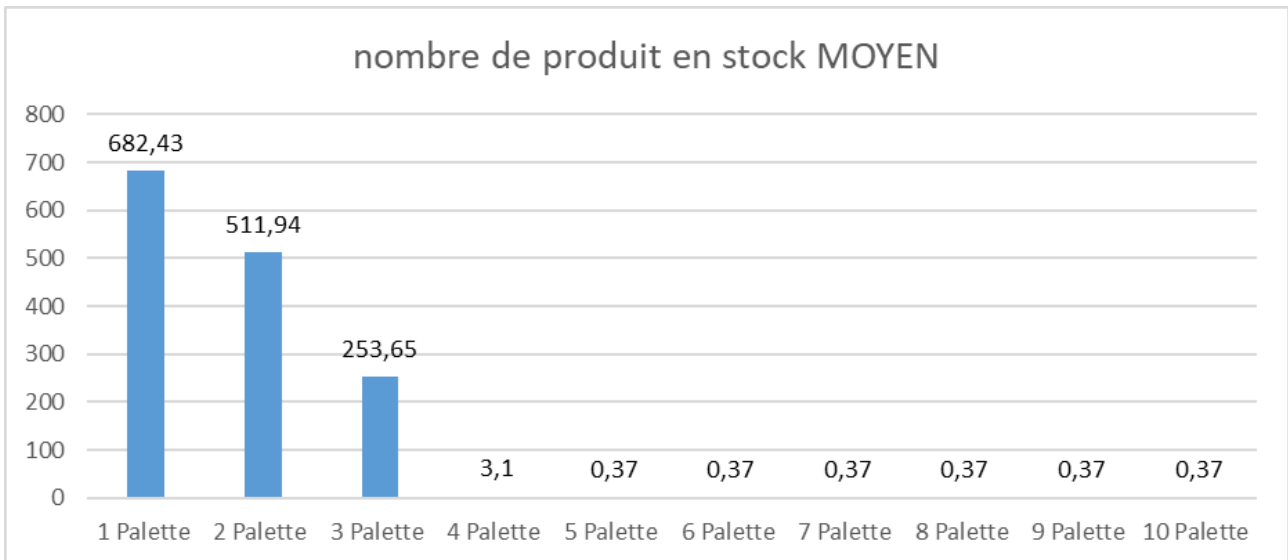


Figure 4.18: Nombre de produit moyen en stock - configuration n°3

Les figures ci-dessous présentent les valeurs statistiques du nombre de produits en stock à la fin de la simulation. On constate une similarité des résultats par rapport aux configurations précédentes, sauf que cette configuration de découplage nécessite au minimum cinq palettes pour obtenir une stabilité des résultats concernant le maximum, le minimum, et le nombre moyen de produits en stock.

### 3.4 Temps de cycle moyen

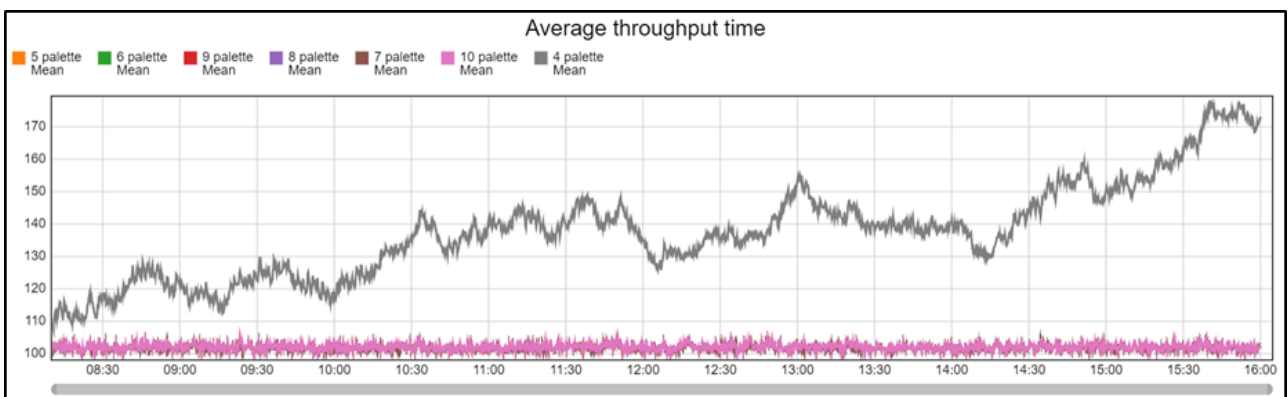


Figure 4.19: Évolution du temps de cycle des produits - configuration n°3

Similaire aux résultats précédents sur l'évolution du niveau moyen de stock au poste 1, les produits suivent la même logique en ce qui concerne leurs temps de cycle. Dans le scénario avec quatre palettes, on observe que le temps de cycle des produits augmente progressivement. Cette augmentation est due à une insuffisance de palettes, ce qui provoque des retards dans la circulation des produits. En conséquence, les produits passent plus de temps en attente dans le stock, ce qui allonge leur temps de cycle total. Le système, en ne disposant pas d'un nombre suffisant de palettes pour un flux continu et efficace, voit son efficacité réduite. En revanche, dans les scénarios utilisant cinq palettes ou plus, le temps de cycle des produits tend à se stabiliser. Pour n'importe quel nombre de palette choisi, la circulation des produits devient

plus fluide, en réduisant les temps d'attente dans les stocks. Cela se traduit par une diminution du temps de cycle des produits, démontrant que le système fonctionne de manière plus efficace avec cette reconfiguration.

Table 4.12: Temps de cycle des produits pour chaque scénario - configuration n°3

Scénario	Temps de cycle moyen	Temps de cycle max	Temps de cycle min
1 Palette	11035,41	21540,4	524,88
2 Palette	7362,9	14352,53	360,62
3 Palette	3687,21	7166,11	210,39
4 Palette	137,88	231,48	97,24
5 Palette	101,91	115,89	97,21
6 Palette	101,91	115,89	97,21
7 Palette	101,91	115,89	97,21
8 Palette	101,91	115,89	97,21
9 Palette	101,91	115,89	97,21
10 Palette	102,14	117,26	97,21

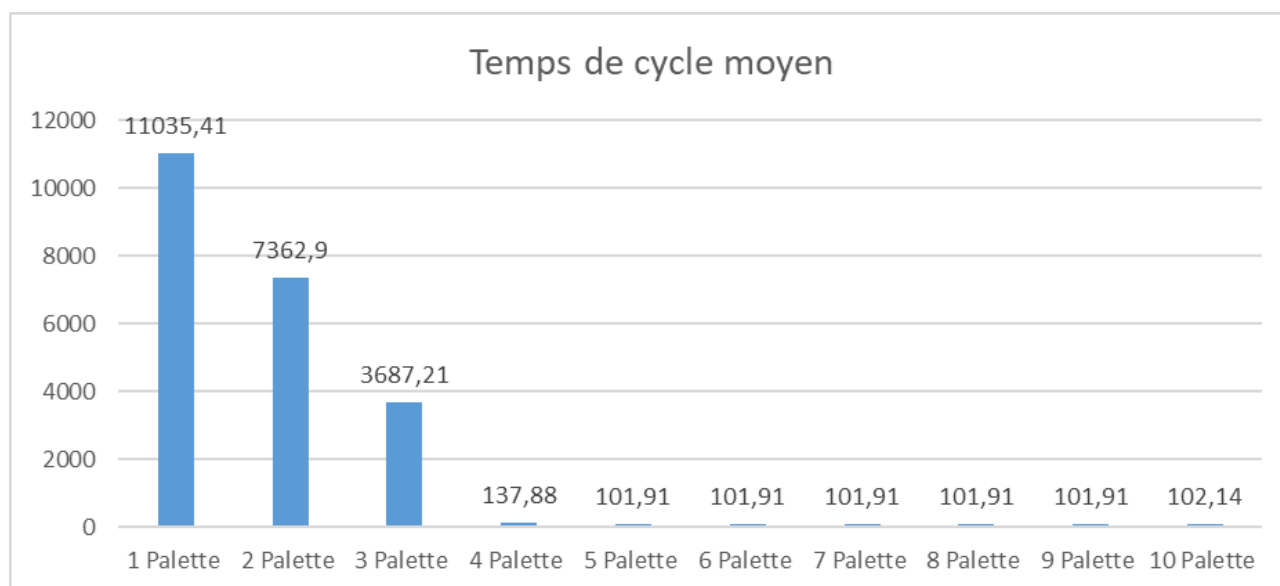


Figure 4.20: Temps de cycle moyen des produits -configuration n°3

Les résultats ci-dessous démontrent et affirment, comme pour le dernier indicateur, que l'utilisation de quatre palettes dans cette configuration ne conduit pas à des résultats optimaux. On observe une légère augmentation du temps de cycle moyen. Pour obtenir des résultats stables et efficaces en termes de temps de cycle moyen, il est nécessaire d'utiliser un minimum de cinq palettes afin de minimiser le temps de cycle. En résumé, on peut dire que le découplage des postes de traitement dans ce système, associé à un nombre suffisant de palettes — soit au moins cinq palettes — élimine le goulot d'étranglement au poste 2 et assure une meilleure utilisation des ressources. Ainsi, les résultats montrent que pour assurer une performance optimale du système, un minimum de cinq palettes est nécessaire. Ce nombre permet de stabiliser non seulement le niveau moyen de stock, mais aussi le temps de cycle des produits, garantissant un flux de production efficace et sans interruptions.

### 3.5 Évolution du nombre de palettes disponibles sur le convoyeur entre le poste 4 et le poste 1

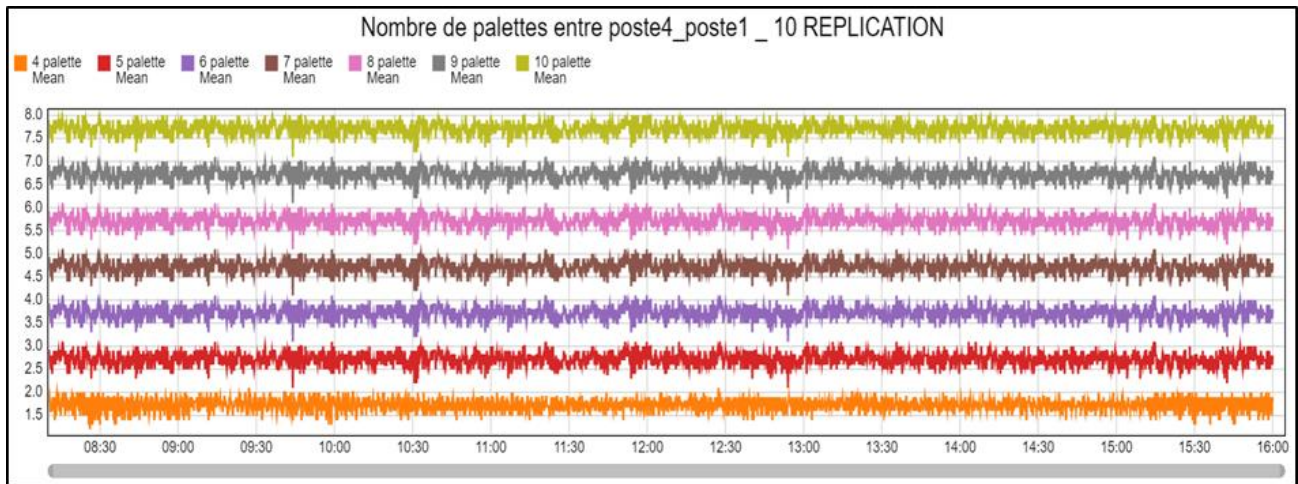


Figure 4.21: Évolution du nombre de palette entre poste 4 et poste 1 - configuration n°3

Contrairement aux résultats précédents de l'évolution du nombre de palettes entre le poste 4 et le poste 1 pour le cas du système couplé, les résultats ici démontrent une stabilité du nombre moyen de palettes pour chaque scénario réalisé. Dans le système découplé, le comportement similaire des postes de traitement permet une circulation plus efficace et plus fluide des palettes. La figure ci-dessous montrent que, pour chaque scénario réalisé avec quatre palettes ou plus, le nombre moyen de palettes reste stable tout au long de la simulation. Cette stabilité indique que le système découplé est capable de maintenir un flux de production continu sans les interruptions fréquentes observées dans le système couplé.

Table 4.13: Nombre de palette entre le poste 4 et poste 1 pour chaque scénario - configuration n°3

Scénario	Nombre de palette moyen	Nombre de palette MAX	Nombre de palette MIN
1 Palette	0,43	1	0
2 Palette	0,86	2	0
3 Palette	1,29	2	0,2
4 Palette	1,73	3	1
5 Palette	2,72	4	1,6
6 Palette	3,72	5	2,5
7 Palette	4,72	6	3,5
8 Palette	5,72	7	4,5
9 Palette	6,72	8	5,5
10 Palette	7,71	8 6,5	

La figure ci-dessous illustre l'évolution du nombre de palettes pour chaque scénario à travers des valeurs statistiques. On peut observer une augmentation proportionnelle au nombre de palettes dans le système. De plus, contrairement aux configurations précédentes, le nombre moyen de palettes n'est égal à zéro dans aucun scénario, ce qui souligne une fois de plus l'efficacité du découplage des deux postes de traitement dans ce système. Cette stabilité indique que le système découplé est capable de maintenir un flux continu de palettes, évitant les

interruptions et les temps d'attente excessifs, et contribuant ainsi à une meilleure performance globale du système.

## 4 Configuration n°4 : découplage des postes 2 et 3 (cas de panne du convoyeur)

Les résultats de cette reconfiguration démontrent que le nombre de palette optimal est égale à 5 palettes

### 4.1 Taux d'utilisation de chaque poste (% du temps total)

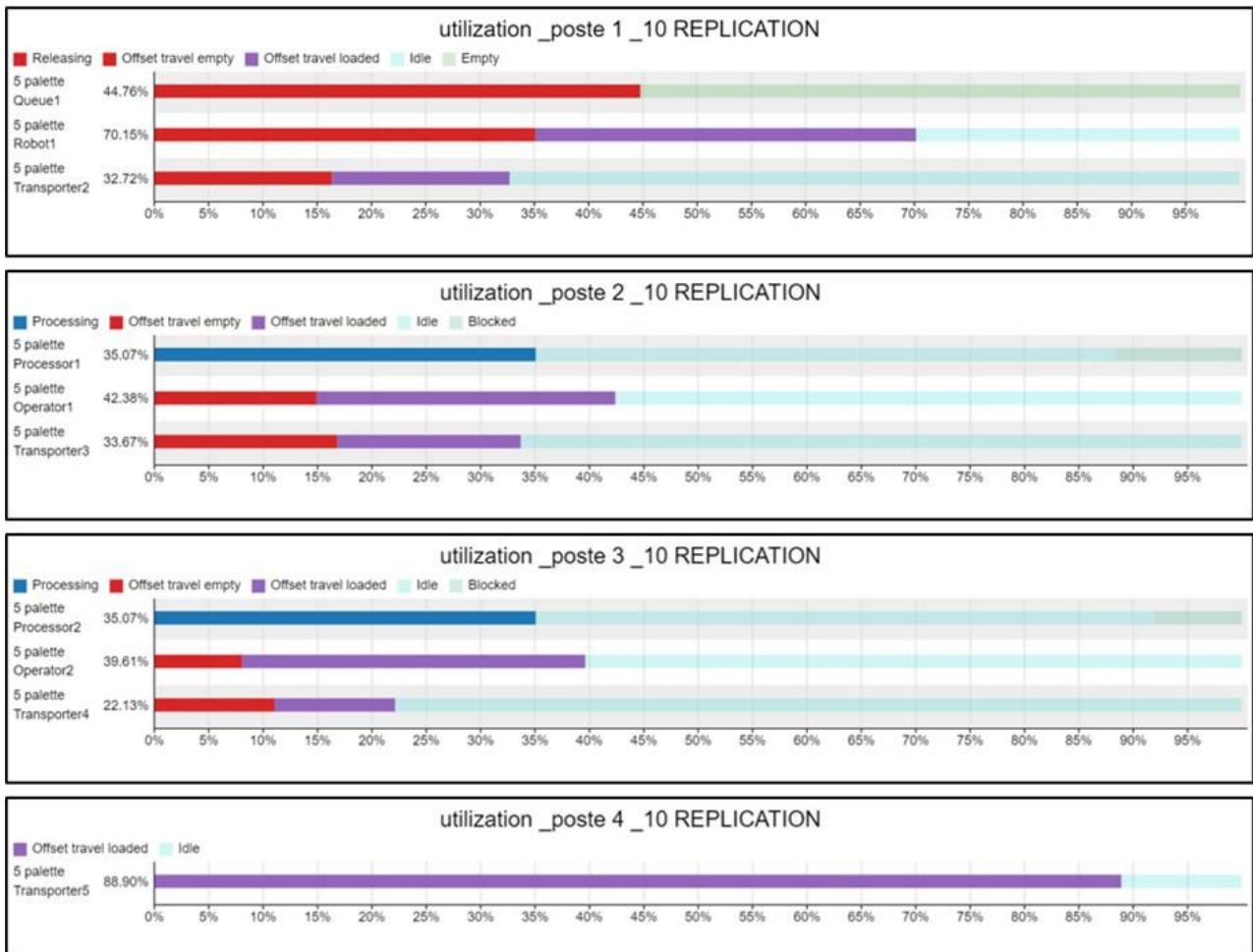


Figure 4.22: Taux d'utilisation de chaque poste pour 5 palettes - configuration n°4

D'après la figure ci-dessous, qui présente le taux d'utilisation de chaque ressource dans le système pour la dernière configuration, on peut déduire que ces résultats sont largement similaires à ceux obtenus dans la configuration précédente. Par exemple, l'espace de stockage des produits au poste 1 est utilisé moins de la moitié du temps, ce qui représente une amélioration par rapport aux configurations du système couplé où le stock était surchargé. De plus, le taux d'utilisation des ressources aux postes de traitement 2 et 3 reste presque identique, et le transporteur du poste 4 est fortement utilisé, atteignant 88%. En résumé, cette reconfiguration n'a pas entraîné de changement significatif dans l'utilisation des ressources pour le cas du système



découplé (3ème configuration). Les résultats confirment que le découplage des postes de traitement, associé à l'utilisation de transporteurs, maintient une utilisation efficace des ressources tout en améliorant certains aspects tels que la gestion des stocks.

## 4.2 Nombre de produit entrés/sortis/encours

Table 4.14: Nombre de produit entré/sorti/encours pour chaque scénario - configuration n°4

Scénario	Nombre d'entrées	Nombre de sortis	WIP
1 Palette	1431,8	462,2	1002
2 Palette	1905,8	926,2	1004
3 Palette	1978,5	1390,2	604,7
4 Palette	1978,5	1854,3	132,9
5 Palette	1978,5	1978,1	7,4
6 Palette	1978,5	1978,1	7,4
7 Palette	1978,5	1978,1	7,4
8 Palette	1978,5	1978,1	7,4
9 Palette	1978,5	1978,1	7,4
10 Palette	1978,5	1978,1	7,4

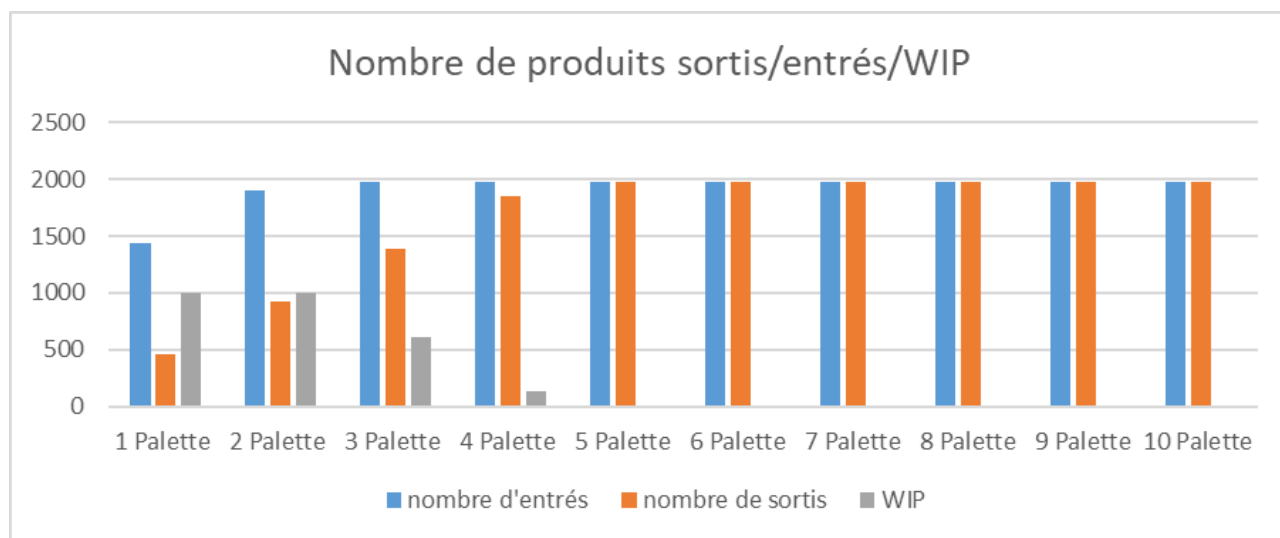


Figure 4.23: Nombre de produit entré/sorti/encours - configuration n°4

Comme expliqué précédemment, cet indicateur est crucial pour évaluer le système et chaque configuration en particulier. En analysant les deux figures ci-dessous, on constate que la valeur optimale du nombre de produits sortis pour cette configuration n'a pas changé par rapport à la configuration précédente, qui concerne le système découplé avec convoyeur. Cependant, pour le cas de quatre palettes, on observe une légère diminution du nombre de produits sortis. Cette baisse est probablement due au nombre limité de transporteurs disponibles, qui est de quatre chariots élévateurs, posant des problèmes de manque de palettes, étant donné que leur nombre est égal à celui des transporteurs disponibles. Pour les scénarios avec cinq palettes ou plus, le nombre de produits sortis est toujours égal au nombre de produits entrés dans le système, se stabilisant à 1978 produits finis. Cela montre que l'augmentation du nombre de palettes permet

de maintenir un flux constant et efficace, sans interruptions, assurant ainsi une performance optimale du système.

### 4.3 Évolution du niveau de stock au pied du robot

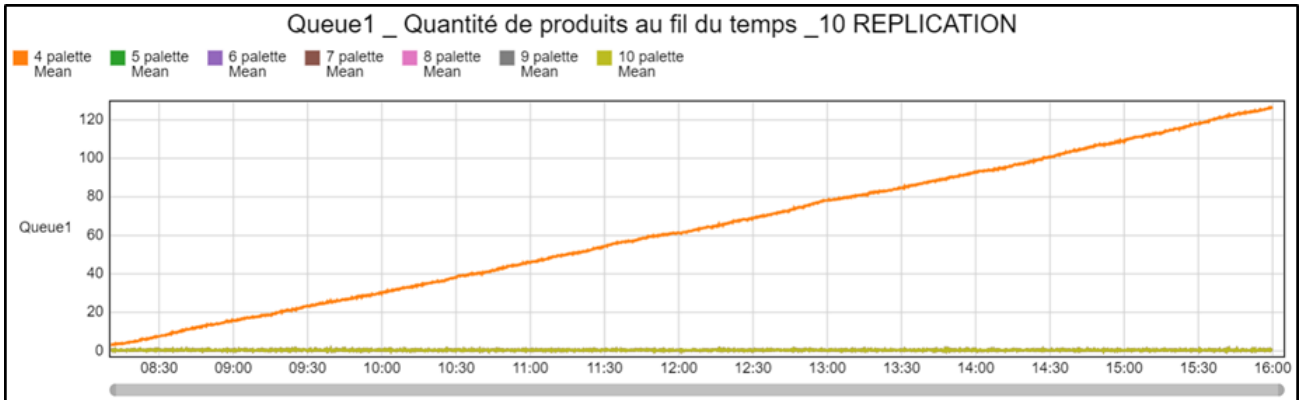


Figure 4.24: Évolution du nombre moyen de produit en stock - configuration n°4

L'analyse de l'évolution de ce stock est nécessaire pour bien évaluer la performance de ce système, car c'est le point qui détermine l'efficacité de la configuration choisie. En analysant la figure ci-dessous, qui présente l'évolution du nombre moyen de produits en stock pour le scénario de quatre palettes et plus, on constate que, pour le cas de quatre palettes, le nombre moyen de produits en attente dans le stock augmente de manière linéaire. Cette augmentation est due au manque de palettes nécessaires pour faire circuler les produits en attente au poste 1. Cependant, pour les scénarios de cinq palettes ou plus, on observe une stabilité constante du nombre moyen de produits en stock au fil du temps. Cela est dû à l'ajustement du comportement général du système grâce au découplage des postes de traitement. Avec cette modification, ainsi que le remplacement efficace du convoyeur central par quatre chariots élévateurs et l'utilisation d'au moins cinq palettes dans le système, le problème des attentes est éliminé. En conclusion, on peut déduire que l'utilisation des chariots élévateurs a impliqué des changements mineurs mais significatifs dans le système découplé, améliorant ainsi la circulation des produits et réduisant les temps d'attente.

Table 4.15: Nombre de produit en stock pour chaque scénario - configuration n°4

Scénario	Nombre de produit MAX	Nombre de produit MIN	Nombre de produit MOYEN
1 Palette	31,9	1000	689,63
2 Palette	21,8	1000	543,14
3 Palette	11,8	599,2	304,16
4 Palette	2,1	127,3	63,34
5 Palette	0	2	0,45
6 Palette	0	2	0,45
7 Palette	0	2	0,45
8 Palette	0	2	0,45
9 Palette	0	2	0,45
10 Palette	0	2	0,45

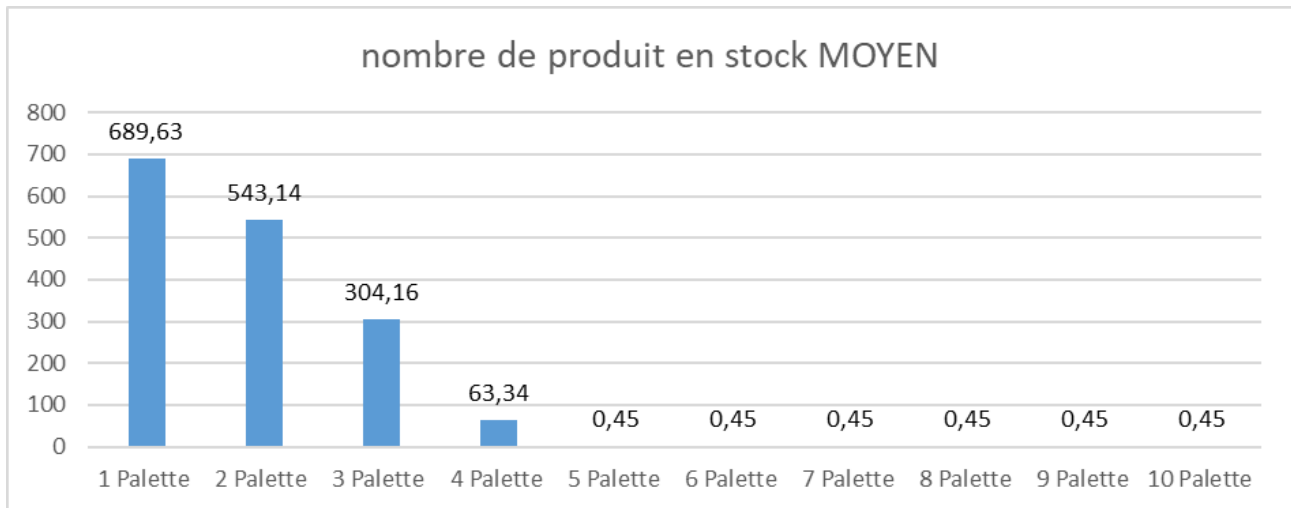


Figure 4.25: Nombre de produit moyen en stock - configuration n°4

#### 4.4 Temps de cycle moyen

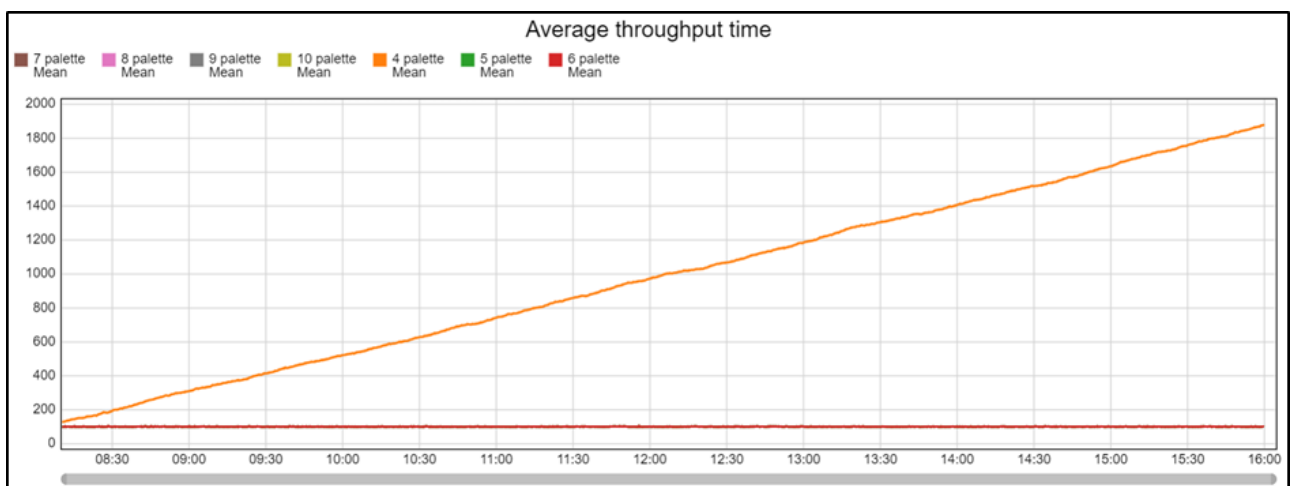


Figure 4.26: Évolution du temps de cycle moyen pour 4 palettes et plus - configuration n°4)

De manière similaire à l'évolution du nombre moyen de produits en attente dans le stock, le temps de cycle des produits, comme présenté ci-dessous, suit une tendance distincte en fonction du nombre de palettes utilisées dans le système. Avec quatre palettes, le temps de cycle augmente linéairement, indiquant des inefficacités et des retards dus à un nombre insuffisant de palettes. En revanche, avec cinq palettes ou plus, le temps de cycle reste stable tout au long de la simulation, ce qui montre que le système fonctionne de manière fluide et efficace.

Ainsi, les résultats indiquent clairement que l'utilisation d'au moins cinq palettes est essentielle pour assurer un fonctionnement fluide et efficace du système. Cela permet de stabiliser non seulement le niveau moyen de produits en stock, mais également le temps de cycle des produits, garantissant ainsi une production régulière et sans interruptions. Cette approche améliore considérablement la performance globale du système, réduisant les délais et augmentant la productivité.

Table 4.16: Temps de cycle des produits pour chaque scénario - configuration n°4

Scénario	Temps de cycle moyen	Temps de cycle max	Temps de cycle min
1 Palette	11257,5	21962,99	540,79
2 Palette	7818,31	15269,96	357,82
3 Palette	4398,75	8555,61	240,43
4 Palette	988,64	1882,69	123,07
5 Palette	101,05	114,97	96,34
6 Palette	101,05	114,97	96,34
7 Palette	101,05	114,97	96,34
8 Palette	101,05	114,97	96,34
9 Palette	101,05	114,97	96,34

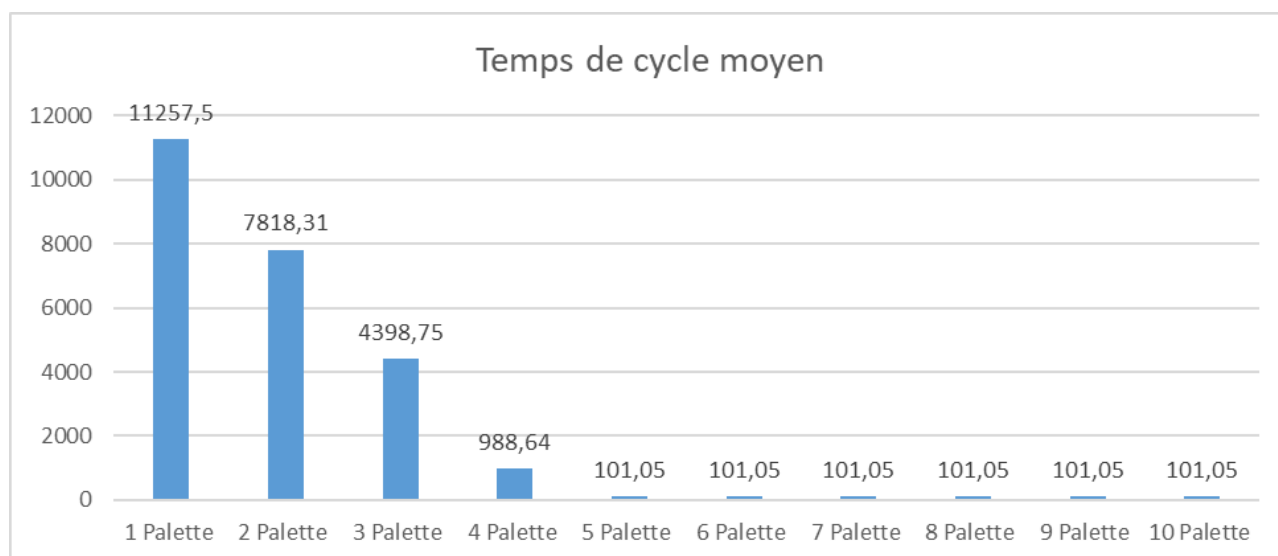


Figure 4.27: Temps de cycle moyen des produits - configuration n°4

Les résultats ci-dessous démontrent de manière statistique les informations obtenues par le graphe de l'évolution du temps de cycle. On constate que le temps de cycle moyen dans ce système découplé, en utilisant cinq palettes ou plus, est de 101,05 secondes par produit. Il est important de noter que cette valeur est la plus faible parmi toutes les configurations réalisées. Cela souligne l'efficacité du système découplé avec au moins cinq palettes, qui permet d'optimiser le temps de cycle et d'améliorer la performance globale de la production

## 4.5 Évolution du nombre de palettes disponibles sur le convoyeur entre le poste 4 et le poste 1

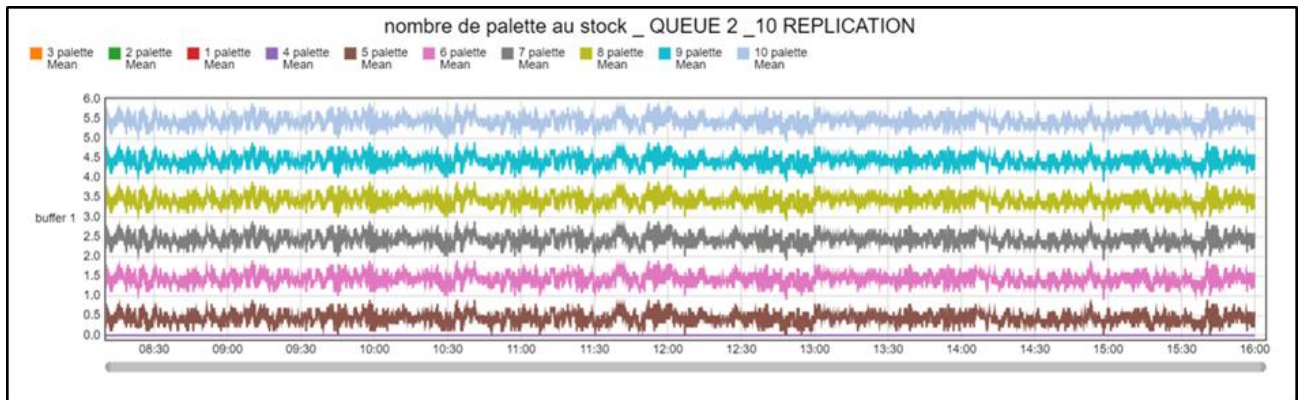


Figure 4.28: Evolution du nombre de palette entre le poste 4 et le poste 1 - configuration n°4

D'après le résultats ci-dessous, qui présente l'évolution du nombre de palette dans le stock qui se situe entre le poste 4 et 1, on constate que c'est presque une stabilité identique de nombre de palette par rapport au résultats du système découplé, ce qui souligne l'efficacité de la configuration réalisé dans ce cas-là, en changeant le convoyeur central par des transporteurs.

Table 4.17: Nombre de palette entre le poste 4 et poste 1 pour chaque scénario - configuration n°3

Scénario	Nombre de palette moyen	Nombre de palette MAX	Nombre de palette MIN
1 Palette	0	1	0
2 Palette	0	1	0
3 Palette	0	1	0
4 Palette	0	1	0
5 Palette	0,59	2	0
6 Palette	1,58	3	0,3
7 Palette	2,58	4	1,3
8 Palette	3,58	5	2,3
9 Palette	4,58	6	3,3
10 Palette	5,58	7	4,3

## 5 comparaison entre les configurations

dans cette partie on vas faire une comparaison de résultats pour chaque configuration réalisée, en fixant le nombre de palettes utilisées dans le système a 5 palette. les résultats qui ont été pris en considération été seulement le nombre de produit sortis, le nombre de produit entrés au système et le nombre moyen de produit en stock du poste 1, afin de déterminer la configuration optimal de ce système simplifié, les résultats sont illustrer dans les figure ci-dessous.

Table 4.18: Nombre de produits entrés et sortis pour chaque configuration

Configuration	Nombre de produits entrés	Nombre de produits sortis
config 1	1978,5	1967,8
config 2	1978,5	1968,7
config 3	1978,5	1978,1
config 4	1978,5	1978,1

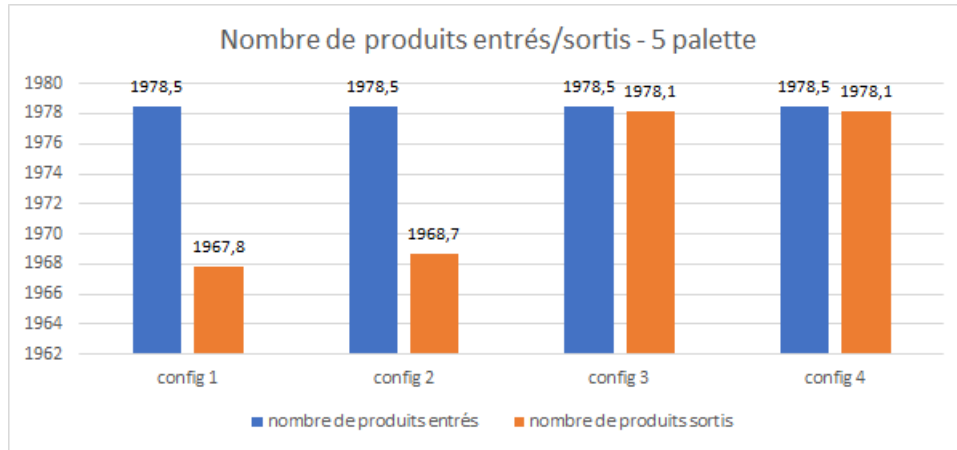


Figure 4.29: Nombre de produits entrés et sortis pour chaque configuration

Les résultats présentés ci-dessus montrent une comparaison entre le nombre de produits entrés et sortis pour chaque configuration du système. Nous pouvons en déduire que, pour un nombre fixe de palettes égal à 5, les configurations 3 et 4 offrent des résultats plus fiables pour ce système simplifié. La différence entre les produits entrés et sortis dans ces configurations est minime, ce qui démontre l'efficacité du découplage réalisé sur ce système. Par exemple, pour la configuration 3, le nombre de produits entrés est de 1978,5 et celui des produits sortis est de 1978,1, ce qui indique une différence négligeable de seulement 0,4 produit. Cela reflète une stabilité et une performance améliorée par rapport aux autres configurations.

Table 4.19: Nombre de produits entrés, sortis et nombre moyen de produits en stock pour différentes configurations

Configuration	Nombre moyen de produits en stock
config 1	3,72
config 2	3,67
config 3	0,37
config 4	0,45

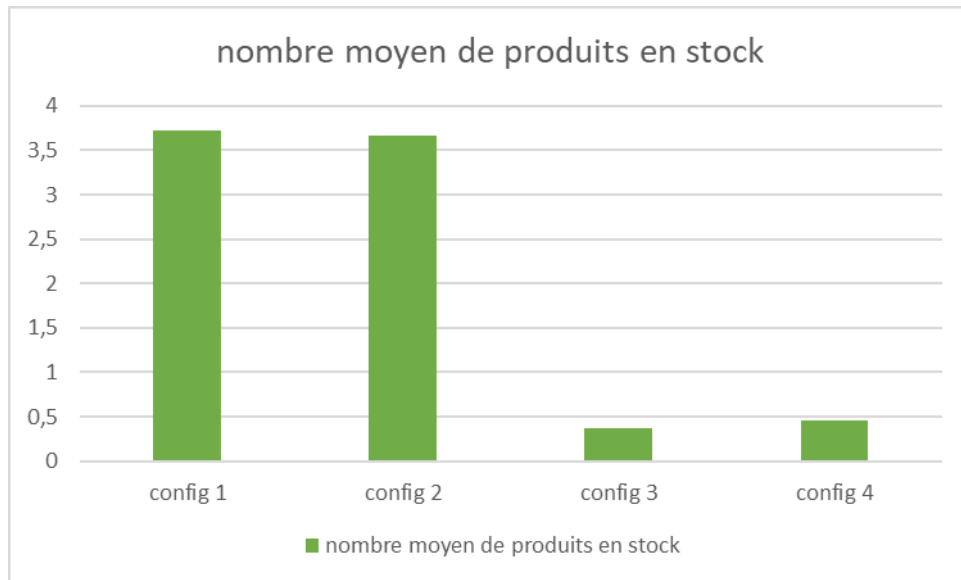


Figure 4.30: nombre moyen de produits en stock pour chaque configuration

Comme expliqué précédemment, les résultats de ce KPI sont cruciaux pour évaluer l'efficacité des configurations. Les configurations 3 et 4 montrent des performances particulièrement fiables, avec des valeurs moyennes de produits en stock de 0,37 et 0,45 respectivement. Cela indique une bonne circulation des flux de produits entre les différents postes, en améliorant l'efficacité globale du système et réduisant ainsi les temps de cycle des produit, car ce dernier est relié d'une façon direct avec le nombre de produit en attente.

# Conclusion générale

L'optimisation des systèmes de production représentent des défis majeurs pour l'industrie manufacturière contemporaine. Le projet RODIC a été conçu pour adresser ces enjeux en proposant un outil d'évaluation des systèmes de production reconfigurables. À travers la modélisation et la simulation précises effectuées dans FlexSim, ce projet offre une base solide pour l'analyse des configurations des postes de travail et l'évaluation des performances grâce à des indicateurs clés de performance (KPI).

En se basant sur un cas d'étude simplifié, cette analyse de cas a permis de poser une base de référence pour les approches du projet RODIC et d'illustrer l'impact de chaque configuration sur la performance des systèmes de production. Les différentes simulations réalisées ont montré comment les variations d'un seul paramètre, telles que le nombre de palettes, peut influencer la productivité et l'efficacité du système. ainsi, Les résultats obtenus ont permis d'identifier la configurations optimales, offrant des perspectives précieuses pour l'amélioration continue et l'optimisation des systèmes de production reconfigurables.



# Bibliography

- Abdul Salam Khan, Khawer Naeem, and Raza Ullah Khan. A comparison between dedicated and flexible manufacturing systems: Optimization and sensitivity analysis. *Mehran University Research Journal Of Engineering & Technology*, 40(1):130–139, 2021.
- Imad Chalfoun. *Conception et déploiement des Systèmes de Production Reconfigurables et Agiles (SPRA)*. Theses, Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, September 2014. URL <https://theses.hal.science/tel-01247600>.
- Jean-Louis Le Moigne. *La modélisation des systèmes complexes*. Paris: Bordas, 1990.
- Yoram Koren, Uwe Heisel, Francesco Jovane, Toshimichi Moriwaki, Gumter Pritschow, Galip Ulsoy, and Hendrik Van Brussel. Reconfigurable manufacturing systems. *CIRP annals*, 48(2):527–540, 1999.
- HK Shivanand. *Flexible manufacturing system*. New Age International, 2006.
- M. Mehrabi, A. Ulsoy, and Yoram Koren. Reconfigurable manufacturing systems: Key to future manufacturing. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 11, 08 2000. doi: 10.1023/A:1008930403506.
- John Wiley. *Reconfigurable Machines*, chapter 8, pages 205–226. John Wiley Sons, Ltd, 2010. ISBN 9780470618813. doi: <https://doi.org/10.1002/9780470618813.ch8>. URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9780470618813.ch8>.
- Amishi Arora and Sukhbir Kaur. Performance assessment model for management educators based on kra/kpi. In *International conference on technology and business management*, volume 23, 2015.
- David Parmenter. *Key Performance Indicators: Developing, Implementing, and Using Winning KPIs*. Wiley, 2015.
- Richard Luecke and Brian J. Hall. *Performance Management: Measure and Improve the Effectiveness of Your Employees*. Harvard Business Review Press, 2006.
- Agence Nationale de la Recherche. *Projet RODIC: RObustesse des Dispositifs Implants Complexes*, 2024. URL [https://anr.fr/Projet-ANR-21-CE10-0017#:~:text=Le%20projet%20RODIC%20a%20pour,souhaite%20tester%20\(phase%20iii\)](https://anr.fr/Projet-ANR-21-CE10-0017#:~:text=Le%20projet%20RODIC%20a%20pour,souhaite%20tester%20(phase%20iii)). Consulté le 15 juin 2024.