

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRY OF HIGHER EDUCATION  
AND SCIENTIFIC RESEARCH



المدرسة العليا في العلوم التطبيقية  
École Supérieure en  
Sciences Appliquées

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

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

المدرسة العليا في العلوم التطبيقية  
-تلمسان-

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur

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 YUCEF	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 d'assemblage (LivingPackets) via FlexSim, le travail est basé sur une évaluation des effets de reconfiguration pour ce système par un changement de ressources de manutention (robots et opérateurs) en utilisant des métriques comme la productivité, le taux de défauts, et l'utilisation des ressources. Nous avons aussi examiné les impacts des paramètres tels que le nombre de palettes et les temps opératoires. Les résultats montrent que l'ajustement précis de ces paramètres et des ressources 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 an assembly system (LivingPackets) via FlexSim, the work is based on an evaluation of the effects of reconfiguration for this system by changing handling resources (robots and operators) using metrics such as productivity, defect rate, and resource utilisation. We also examined the impacts of parameters such as the number of pallets and operation times. The results show that fine-tuning these parameters and resources 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

باستخدام محاكاة RODIC تستكشف هذه الأطروحة تحسين أنظمة الإنتاج القابلة لإعادة التشكيل لمشروع من خلال محاكاة تكوينات مختلفة لنظام (KPIs) ومؤشرات الأداء الرئيسية (DES) نظام الأحداث المنفصلة ، يستند العمل على تقييم آثار إعادة التشكيل لهذا النظام من FlexSim عبر (LivingPackets) التجميع خلال تغيير موارد المناولة (الروبوتات والمشغلين) باستخدام مقاييس مثل الإنتاجية ومعدل العيوب واستخدام الموارد. كما قمنا بفحص تأثيرات المعلمة مثل عدد المنصات وأوقات العمليات. أظهرت النتائج أن الضبط الدقيق لهذه المعلمة والموارد يؤدي إلى تحسين كبير في أداء النظام، مما يسلط 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>13</b>
1	Introduction.....	13
2	Définition d'un système de production.....	13
3	les systèmes de production traditionnels.....	15
3.1	DML - ligne de production dédiée.....	15
3.2	FMS - système de production flexible.....	15
4	système de production reconfigurable.....	16
4.1	Caractéristiques essentielles d'un système de production reconfigurable .	17
4.2	Machines reconfigurables.....	18
5	comparaison entre les différents systèmes de production.....	19
<b>2</b>	<b>Les systèmes à évènement discret</b>	<b>22</b>
1	Introduction.....	22
2	Historique.....	22
3	Définition.....	23
4	Caractéristiques Principales des Systèmes à Événements Discrets.....	24
4.1	Discontinuité.....	24
4.2	Stochasticité.....	24
4.3	Complexité et Interaction.....	25
5	Modélisation des Systèmes à Événements Discrets.....	25
5.1	Principes de Modélisation des SED.....	25
6	Modélisation par les chaînes de Markov.....	25
6.1	Définition.....	25
6.2	Caractéristiques des Chaînes de Markov.....	26
6.3	Types de Chaînes de Markov.....	27
6.4	Avantages et Limitations des Chaînes de Markov.....	28
6.5	Exemples de Modélisation avec les Chaînes de Markov.....	29
7	Modélisation par les automates à états finis.....	30
7.1	Définition.....	30
7.2	Caractéristiques des Automates à États Finis.....	30
7.3	Types d'Automates à États Finis.....	30
7.4	Avantages et Limitations des Automates à États Finis.....	31
7.5	Exemples de Modélisation avec les Automates à États Finis.....	31
7.6	Applications des Automates à États Finis.....	32
8	Modélisation par les Réseaux de Petri (RDP).....	32
8.1	Définition générale.....	32
8.2	Définition formelle.....	33
8.3	Dynamique des Réseaux de Petri.....	33
8.4	Types de Réseaux de Petri.....	34
8.5	Applications des Réseaux de Petri.....	34

8.6	Avantages et Limitations des Réseaux de Petri.....	35
8.7	Exemples de Modélisation avec les Réseaux de Petri.....	36
9	Outil de simulation des systèmes à événement discret.....	36
9.1	pourquoi simuler un SED.....	37
9.2	Flexsim simulation .....	38
9.3	niveau de modélisation sous Flexsim.....	38
10	Conclusion.....	40
<b>3</b>	<b>Cas d'étude général LivingPackets</b>	<b>41</b>
1	Introduction.....	41
2	RODIC.....	41
3	Description du produit.....	42
4	Description du système étudié.....	44
4.1	organisation du système.....	44
4.2	Description des postes de travail .....	46
5	génération automatique des ligne d'assemblage.....	50
5.1	introduction.....	50
5.2	objectif.....	50
5.3	Données d'entrée.....	50
5.4	Description du script de génération automatique .....	53
5.5	Limitations du script .....	57
5.6	Conclusion.....	57
6	configurations proposées .....	57
6.1	configuration robotisée .....	58
6.2	configuration à 1 opérateur.....	58
6.3	configuration à 2 opérateurs .....	59
7	Paramétrage des modèles de configuration.....	59
7.1	Nombre de palettes .....	60
7.2	Temps opératoire du premier robot.....	60
7.3	Temps opératoire de Soudure.....	61
8	Indicateurs de performance proposés.....	61
8.1	Taux d'utilisation de chaque ressource.....	62
8.2	Nombre de produits défectueux.....	62
8.3	Nombre de produits finis .....	62
8.4	Évolution du nombre de palettes occupées/libres .....	62
8.5	Évolution du nombre de produits semi-finis auprès de la ligne d'assemblage final .....	63
9	Conclusion.....	63
<b>4</b>	<b>Résultats et discussion</b>	<b>64</b>
1	Résultats - Configuration robotisée .....	65
1.1	Paramètre : nombre de palettes .....	65
1.2	Paramètre : temps opératoire du premier robot.....	70
1.3	Paramètre : temps opératoire de soudage.....	74
2	Résultats - Configuration 1 opérateur .....	79
2.1	Paramètre : nombre de palettes .....	79
2.2	Paramètre : temps opératoire du premier robot.....	85
2.3	Paramètre : temps opératoire de soudage.....	90
3	Résultats - Configuration 2 opérateurs.....	94
3.1	Paramètre : nombre de palettes .....	94

3.2	Paramètre : temps opératoire du premier robot.....	100
3.3	Paramètre : temps opératoire de soudage.....	104

# List of Figures

1.1	Décomposition d'un système de production.....	14
1.2	DMS designed for multiple products, Khan et al. [2021] .....	15
1.3	Architecture typique d'un RMS .....	19
1.4	les différents systèmes de production en fonction de leur capacité/ fonctionnalité	20
2.1	Modélisation d'un simple système de production.....	39
2.2	Exemple d'un process flow d'un poste de travail - MDA20 .....	40
3.1	Logo RODIC .....	42
3.2	The BOX.....	43
3.3	Description du produit .....	43
3.4	Ligne d'assemblage Front Face .....	45
3.5	Ligne d'assemblage Body .....	45
3.6	Ligne d'assemblage Final.....	46
3.7	Exemple d'un poste de travail.....	51
3.8	Création d'un nouveau module dans une bibliothèque.....	51
3.9	Sauvegarde de la bibliothèque.....	51
3.10	Chargement d'une bibliothèque.....	52
3.11	Interface Excel dans Flexsim.....	53
3.12	Système d'assemblage avec configuration robotisé .....	58
3.13	système d'assemblage avec configuration 1 opérateur.....	59
3.14	Système d'assemblage avec configuration a 2 opérateurs .....	59
4.1	nombre de produit finis pour chaque ligne .....	65
4.2	Taux d'utilisation (LAF) - configuration robotisée.....	66
4.3	Taux d'utilisation (LAB) - configuration robotisée .....	66
4.4	Taux d'utilisation (LAF) - configuration robotisée .....	67
4.5	Évolution des nombre de palettes occupées - configuration robotisée.....	67
4.6	Évolution des nombre de palettes libres - configuration robotisée .....	68
4.7	Évolution du nombre de produit semi finis (functional front face) - configuration robotisée.....	69
4.8	Évolution du nombre de produit semi finis (Body) - configuration robotisée.....	69
4.9	nombre de produit finis pour chaque ligne .....	70
4.10	Taux d'utilisation (LAF) .....	71
4.11	Taux d'utilisation (LAB) .....	71
4.12	Taux d'utilisation (LAF) .....	72
4.13	Évolution des nombre de palettes occupées.....	72
4.14	Évolution des nombre de palettes libres.....	73
4.15	-Évolution du nombre de produit semi finis en attente (functional front face) .....	73
4.16	Évolution du nombre de produit semi finis (Body) .....	74
4.17	nombre de produit finis pour chaque ligne .....	75
4.18	Taux d'utilisation (LAF) .....	75

4.19	Taux d'utilisation (LAB) .....	76
4.20	Taux d'utilisation (LAF) .....	76
4.21	Évolution des nombre de palettes occupées.....	77
4.22	Évolution des nombre de palettes libres.....	77
4.23	Évolution du nombre de produit semi finis (functional front face) .....	78
4.24	Évolution du nombre de produit semi finis (Body) .....	78
4.25	Nombre de produit sortis pour chaque ligne.....	80
4.26	Taux d'utilisation (LAFF) .....	81
4.27	Taux d'utilisation (LAB) .....	81
4.28	Taux d'utilisation (LAF) .....	81
4.29	Évolution du nombre de palettes occupées.....	82
4.30	Évolution du nombre de palettes libres.....	82
4.31	Évolution du nombre produit semi finis (functional front face) .....	83
4.32	Évolution du nombre produit semi finis (Body).....	84
4.33	Nombre de produit finis pour chaque ligne.....	85
4.34	Taux d'utilisation (LAFF) .....	86
4.35	Taux d'utilisation (LAB) .....	86
4.36	Taux d'utilisation (LAF) .....	87
4.37	Évolution du nombre de palette occupées .....	87
4.38	Évolution du nombre de palettes libres.....	88
4.39	Évolution nombre de produit semi finis functional front face .....	88
4.40	Évolution du nombre de produit semi fini .....	89
4.41	Nombre de produit finis pour chaque ligne.....	90
4.42	Taux d'utilisation (LAFF) .....	91
4.43	Taux d'utilisation (LAB) .....	91
4.44	Taux d'utilisation (LAFF) .....	91
4.45	Évolution du nombre de palettes occupées.....	92
4.46	Evolution du nombre de palettes libres.....	92
4.47	Évolution du nombre de produit semi fini (functional front face).....	93
4.48	Évolution du nombre de produit semi finis (Body) .....	93
4.49	Nombre de produit finis .....	95
4.50	Taux d'utilisation (LAFF) .....	96
4.51	Taux d'utilisation (LAB) .....	96
4.52	Taux d'utilisation (LAF) .....	97
4.53	Évolution du nombre de palettes occupées.....	97
4.54	Évolution du nombre de palettes libres.....	98
4.55	Nombre de produit semi finis (functional front face).....	99
4.56	Évolution du nombre de produit semi finis (Body) .....	99
4.57	Nombre de produit finis pour chaque ligne.....	100
4.58	Taux d'utilisation (LAFF) .....	101
4.59	Taux d'utilisation (LAB) .....	101
4.60	Taux d'utilisation (LAF) .....	102
4.61	Evolution dU nombre de palettes occupées LAFF.....	102
4.62	Evolution dU nombre de palettes libres LAFF .....	103
4.63	Évolution nombre de produit semi finis (functional front face).....	103
4.64	Évolution nombre de produit semi finis (Body) .....	104
4.65	Nombre de produit finis .....	105
4.66	Taux d'utilisation (LAFF) .....	105
4.67	Taux d'utilisation (LAB) .....	106
4.68	Taux d'utilisation (LAF) .....	106



4.69	Évolution du nombre de palettes occupées.....	107
4.70	Évolution du nombre de palette libres .....	107
4.71	Évolution du nombre de produit semi fini (functional front face).....	108
4.72	Évolution du nombre de produit semi finis (Body) .....	108

# List of Tables

1.1	Principales caractéristiques des RMS .....	18
1.2	Comparaison entre les DML, RMS, et FMS.....	21
3.1	Tableau des marques et Désignations du produit .....	44
3.2	Fragment des données Caract_WS.....	53
3.3	Fragment des données List_WS .....	53
3.4	Paramètres du nombre de palettes.....	60
3.5	Durées de Prise, Calage et Dépôt pour les lignes LAFF et LAB.....	61
3.6	Paramètres du temps opératoire de soudure.....	61
4.1	nombre de produit finis pour chaque ligne .....	65
4.2	nombre de produits défectueux dans chaque ligne - configuration robotisée.....	66
4.3	valeurs statistique du nombre de produit semi finis (functional front face) - configuration robotisée .....	68
4.4	valeurs statistiques du nombre de produit semi finis (Body) - configuration robotisée .....	69
4.5	nombre de produit finis pour chaque ligne .....	70
4.6	nombre de produits défectueux dans chaque ligne.....	70
4.7	valeurs statistique du nombre de produit semi finis en attente (functional front face).....	73
4.8	valeurs statistiques du nombre de produit semi finis (Body) en attente .....	73
4.9	nombre de produit finis pour chaque ligne .....	74
4.10	nombre de produits défectueux dans chaque ligne.....	75
4.11	Valeurs statistique du nombre de produit semi finis (functional front face).....	78
4.12	valeurs statistique du nombre de produit semi finis (Body) .....	78
4.13	Nombre de produit sortis pour chaque ligne.....	79
4.14	Nombre de produit défectueux pour chaque ligne.....	80
4.15	valeurs statistique du nombre de produit semi finis (functional front face) .....	83
4.16	valeurs statistique du nombre de produit semi finis (functional front face) .....	83
4.17	valeurs statistique du nombre de produit semi finis (Body) .....	84
4.18	Nombre de produit finis pour chaque ligne.....	85
4.19	Nombre de produit défectueux pour chaque ligne.....	85
4.20	valeurs statistique du nombre de produit semi finis (functional front face) .....	88
4.21	valeurs statistique du nombre de produit semi finis (Body) .....	89
4.22	nombre de produit finis pour chaque ligne .....	90
4.23	Nombre de produit défectueux pour chaque ligne.....	90
4.24	valeurs statistique du nombre de produit semi finis (functional front face) .....	93
4.25	valeurs statistique du nombre de produit semi finis (Body) .....	93
4.26	Nombre de produit sortis pour chaque ligne.....	94
4.27	Nombre de produit défectueux pour chaque ligne.....	95
4.28	valeurs statistique du nombre de produit semi finis (functional front face) .....	98

4.29	valeurs statistique du nombre de produit semi finis (Body) .....	99
4.30	Nombre de produit finis pour chaque ligne.....	100
4.31	Nombre de produit défectueux pour chaque ligne.....	101
4.32	valeurs statistique du nombre de produit semi finis (functional front face) .....	103
4.33	valeurs statistique du nombre de produit semi finis (Body) .....	103
4.34	nombre de produit finis pour chaque ligne .....	104
4.35	Nombre de produit défectueux pour chaque ligne.....	105
4.36	valeurs statistique du nombre de produit semi finis (functional front face) .....	107
4.37	valeurs statistique du nombre de produit semi finis (Body) .....	108

# 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.

**Simulation des Systèmes à Événements Discrets** Les SED se caractérisent par des changements d'état distincts causés par des événements discrets. La simulation de ces systèmes permet de modéliser des processus complexes et de les analyser de manière approfondie. Elle offre la possibilité de tester divers scénarios et configurations pour prévoir les performances, identifier les goulots d'étranglement, et optimiser les opérations sans perturber le système réel. Dans ce travail, nous utilisons FlexSim, un outil de simulation puissant et flexible, qui permet de créer des modèles 3D détaillés et de simuler les dynamiques des systèmes complexes notamment des système de production. FlexSim offre ainsi des possibilités avancées pour l'évaluation des performances des systèmes, grâce à des tableaux de bord pour plusieurs aspect du système et des outils de modélisation par réseaux de Petri (process flow), la modélisation mathématique (FlexScript) .

**Indicateurs Clés de Performance (KPI)** Les KPI sont des métriques quantifiables qui permettent de mesurer et d'évaluer l'efficacité des processus de production. Ils fournissent des informations critiques sur divers aspects de la performance d'un système, tels que la productivité, la qualité, et l'utilisation des ressources. Les KPI sont primordial pour l'analyse et l'amélioration des systèmes de production, en permettant de surveiller l'évolution des performances, d'évaluer la flexibilité, et d'identifier les opportunités d'optimisation.

**Objectifs du Travail** Ce travail vise à :

Modéliser et simuler un système d'assemblage en utilisant FlexSim pour explorer différentes configurations et ressources de manutention. 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 d'assemblage.

**Cas d'Étude** L'étude se concentre sur un système d'assemblage composé de trois lignes distinctes : la ligne d'assemblage front face (LAFF), la ligne d'assemblage body (LAB), et la ligne d'assemblage final (LAF). Chaque ligne peut être configurée avec différentes ressources de manutention, telles que des robots, un opérateur, ou deux opérateurs. En combinant ces configurations pour chaque ligne, nous obtenons un total de 27 configurations possibles . L'analyse se concentre sur trois configurations représentatives : entièrement robotisée, avec un opérateur, et avec deux opérateurs.

**Paramétrage et Résultats** Les simulations explorent divers paramètres opérationnels, tels que le temps opératoire de soudure, le temps opératoire du premier robot, et le nombre de palettes. Ces paramètres influencent directement la productivité, la qualité des produits, et l'utilisation des ressources. En simulant ces configurations et en analysant les KPI correspondants, nous identifions les configurations optimales pour améliorer l'efficacité du système de d'assemblage étudié.

**Conclusion** Ce travail offre une approche méthodique pour l'optimisation des systèmes de production en utilisant la simulation des SED et l'analyse des KPI. Les résultats obtenus fourniront des recommandations précieuses pour l'amélioration continue des processus.

# 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.

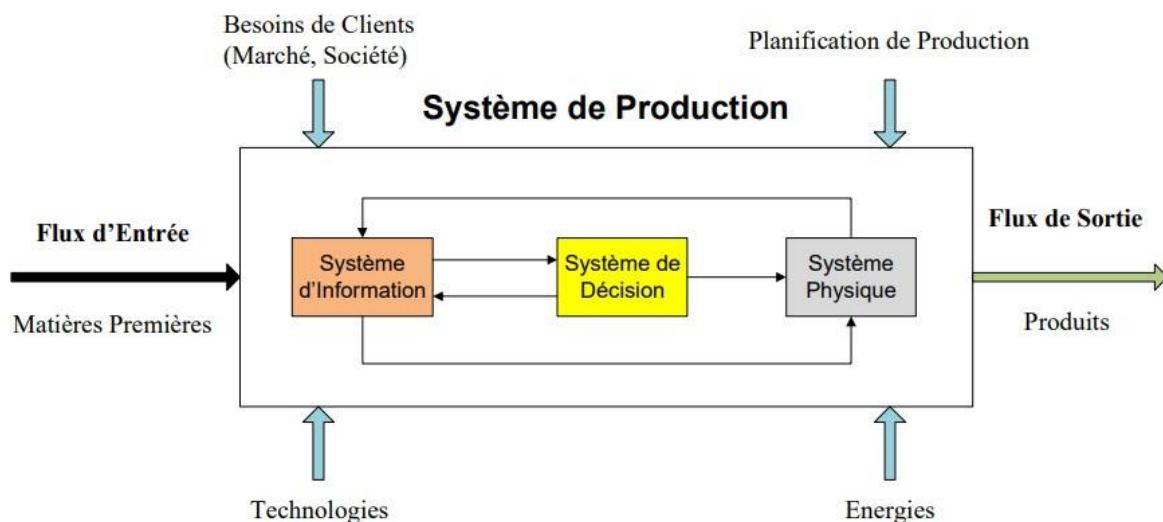


Figure 1.1: Décomposition d'un système de production

### 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 :

Caractéristiques clés	Description
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]

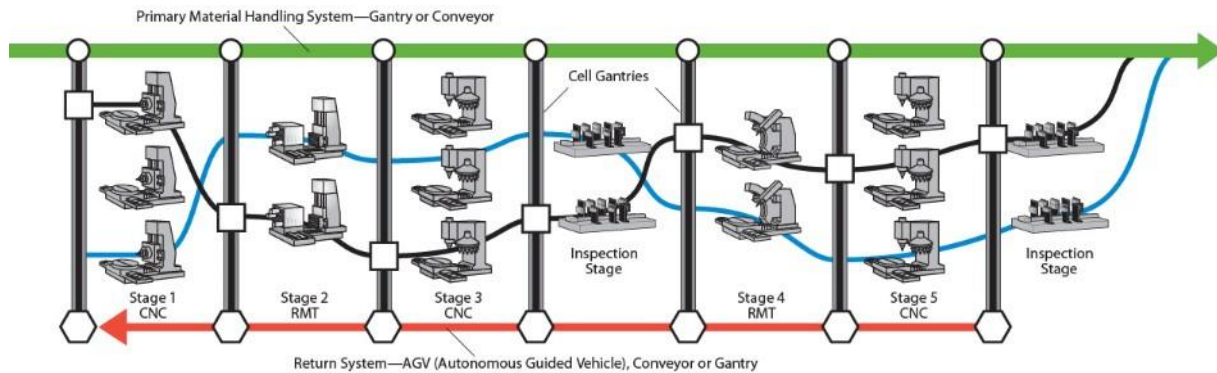


Figure 1.3: Architecture typique d'un RMS

il existe différentes machines reconfigurables utilisées dans un systèmes 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.

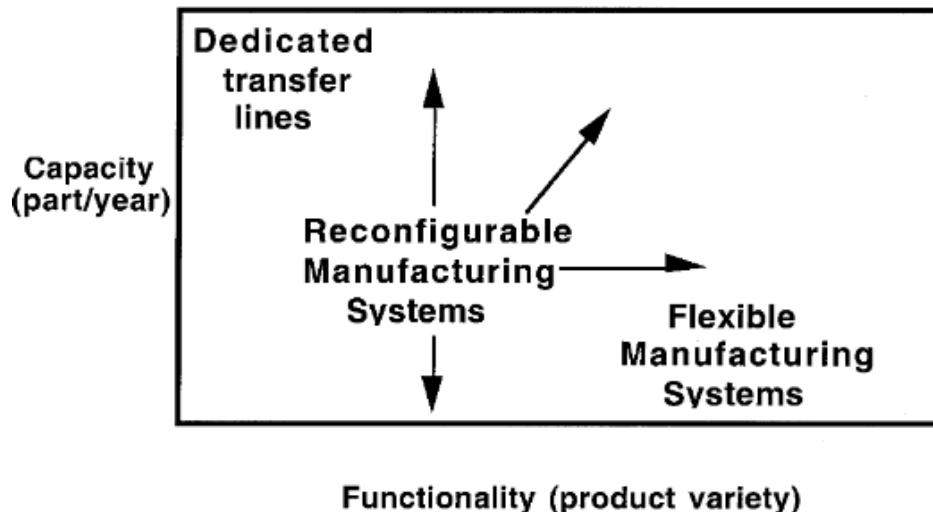


Figure 1.4: les différents systèmes de production en fonction de leur capacité/ fonctionnalité

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

## Les systèmes à évènement discret

### 1 Introduction

Les Systèmes à Événements Discrets (SED) représentent un aspect important de modèles informatiques utilisés pour modéliser et simuler le comportement de systèmes dynamiques et industriel. Leur utilisation est répandue dans un large éventail de domaines de recherche, tel que la logistique, la production industrielle, le secteur d'automobile, etc. Ce chapitre se concentre sur la présentation et la compréhension des principaux concepts, caractéristiques et méthodes de modélisation des SED.

nous explorerons les fondements des Systèmes à Événements Discrets, en commençant par une définition claire de ce qu'ils sont et en mettant en évidence leur importance dans la modélisation des systèmes dynamiques. Nous présentons également leur historique dans la recherche scientifique, depuis leurs débuts modestes jusqu'à leur utilisation répandue dans la recherche et l'industrie d'aujourd'hui.

Ensuite, nous aborderons les principales caractéristiques des SED, telles que leur comportement séquentiel, leur nature asynchrone ou synchrone, leur capacité à modéliser la stochasticité et leur complexité d'interaction. Comprendre ces caractéristiques est essentiel pour une utilisation efficace des SED dans la modélisation et l'analyse des systèmes réels.

Enfin, nous discuterons des différentes méthodes de modélisation et de simulation utilisées pour représenter les Systèmes à Événements Discrets, en mettant l'accent sur les réseaux de Petri, et nous donnerons une brève explication du logiciel FLECSIM et son utilité pour la modélisation des systèmes industriels par le principe des systèmes à évènement discret. Cette exploration nous permettra de mieux comprendre comment les SED sont construits et utilisés pour simuler des systèmes complexes.

En résumé, ce chapitre vise à fournir une introduction complète aux Systèmes à Événements Discrets, en fournissant aux lecteurs les connaissances nécessaires pour comprendre, appliquer et analyser ces puissants outils de modélisation informatique.

### 2 Historique

L'apparition des systèmes à événements discrets (SED) dans la recherche scientifique remonte à plusieurs décennies, un concept lié étroitement au développement des technologies de l'information et de la modélisation des systèmes, et dans notre cas on s'intéresse à la modélisation des systèmes industriels.

Les débuts des SED remontent aux années 1940 et 1950, avec les premières recherches dans le domaine de l'automatisation et du contrôle des processus industriels, en même temps que la révolution industrielle en Europe. À cette époque, les ingénieurs commençaient à explorer des méthodes pour modéliser et simuler le comportement des systèmes dynamiques, tels que

les chaînes de production, les réseaux de télécommunications et les systèmes de transport. Cependant, les premières approches étaient souvent limitées par les capacités de calcul et les outils disponibles à l'époque comme le manque des outils de simulation et l'absence de la technologie adéquate.

Dans les années 1960 et 1970, avec l'avènement des ordinateurs et des langages de programmation, les chercheurs ont commencé à développer des méthodes plus sophistiquées pour modéliser les systèmes dynamiques. C'est à cette époque que les premiers concepts des SED ont émergé, avec des chercheurs comme Edward H. Sutherland et George E. Forsythe qui ont contribué à jeter les bases de la simulation à événements discrets.

Dans les années suivantes, les SED ont gagné en popularité dans une variété de domaines, tel que la gestion de la production, la logistique, les télécommunications, la robotique, etc. Les avancées dans les algorithmes de simulation, les langages de programmation, les techniques de modélisation et les outils informatiques ont permis aux chercheurs et aux praticiens d'exploiter pleinement le potentiel des SED pour modéliser et analyser des systèmes très complexes.

Aujourd'hui, les SED sont largement utilisés dans l'industrie, l'ingénierie, la recherche opérationnelle, la logistique, et de nombreux autres domaines. Leur flexibilité et leur capacité à modéliser des systèmes complexes, ainsi que leur efficacité en termes de calcul en font des outils indispensables pour la conception, l'analyse dans un large éventail de contextes.

### 3 Définition

Selon le dictionnaire Larousse, un système est défini comme un « ensemble d'éléments considérés dans leur relation à l'intérieur d'un tout qui fonctionne de manière unitaire ». De façon plus pratique, un système représente un ensemble d'éléments qui interagissent selon des principes ou règles spécifiques dans le but d'accomplir une tâche (Cassandras and Lafortune [2008]). Concernant les systèmes à événements discrets (SED), la définition d'un système englobe plusieurs aspects :

- La frontière d'isolement, qui est la délimitation entre ce qui appartient au système et ce qui en est exclu (c'est-à-dire l'environnement externe du système). Cette frontière définit les entrées et les sorties du SED.
- Les interactions entre le système et son environnement, qui déterminent comment le système reçoit les influences extérieures et comment il affecte son environnement.
- Les fonctions du système, représentant l'ensemble des comportements des entités au sein du système, leur organisation et la manière dont elles interagissent.

Les Systèmes à Événements Discrets (SED) sont des modèles informatiques utilisés pour simuler le comportement de systèmes dynamiques où les changements d'état se produisent à des instants discrets en réponse à des événements spécifiques. Ces systèmes sont caractérisés par leur capacité à intégrer le facteur temps de manière explicite, où les transitions entre les états sont déclenchées par des événements externes ou internes. Les SED sont largement utilisés dans divers domaines tels que la production, la logistique, les télécommunications, la santé et la finance pour analyser et optimiser le fonctionnement des systèmes complexes.

également connus sous le nom de systèmes séquentiels, les SED jouent un rôle essentiel dans la modélisation des processus où les changements d'état se produisent à des moments précis en réponse à des événements spécifiques. Cette catégorie de systèmes, comme mentionné déjà, se distingue par sa capacité d'intégrer le facteur de temps, contrairement aux systèmes combinatoires où les sorties dépendent uniquement des entrées actuelles sans tenir compte du temps ou de la séquence des événements.



Comme tout système, les systèmes à événements discrets possèdent des caractéristiques essentielles pour leur fonctionnement, notamment des propriétés uniques qui décrivent leur capacité à progresser d'un état à l'autre au fil du temps. Cette progression n'est pas continue mais se fait par bonds, chaque bond correspondant à un événement qui provoque une transition d'état. Ces caractéristiques distinguent deux aspects fondamentaux des SED:

- **États:** Les systèmes à événements discrets sont caractérisés par des états distincts. Un état représente une configuration particulière du système à un instant donné. Les états sont cruciaux pour comprendre le comportement du système car ils définissent les conditions sous lesquelles certaines actions peuvent être prises ou certains événements peuvent se produire.
- **Événements:** Les transitions entre les états sont déclenchées par des événements. Ces événements sont généralement des occurrences externes ou internes, comme la fin d'une tâche, l'arrivée d'un matériau, ou une commande de l'utilisateur. Chaque événement a un effet direct sur l'état du système, déclenchant potentiellement une série de nouvelles actions.

## 4 Caractéristiques Principales des Systèmes à Événements Discrets

Comme déjà discuté précédemment, les systèmes à événements discrets (SED) possèdent différentes caractéristiques qui leur permettent de modéliser efficacement des processus où les changements d'état sont distincts par des événements spécifiques. selon Law [2015] et Banks [2010], les principales caractéristiques des SEDs sont :

### 4.1 Discontinuité

Dans les systèmes à événements discrets (SED), les transitions d'état ne se produisent pas de façon continue, mais à des instants spécifiques qui marquent des changements abrupts dans le système. Ce trait est essentiel pour comprendre comment les SED gèrent les processus et les opérations. Par exemple, dans un environnement de production, un équipement pourrait passer de l'état "en attente" à "en fonction" lorsque le matériel nécessaire devient disponible. Ces moments précis de changement sont critiques, car ils déterminent la séquence d'actions ultérieures et affectent le flux global du processus. Cette discontinuité permet également une analyse plus simplifiée par intervalles distincts, où chaque intervalle est compris entre deux événements consécutifs.

### 4.2 Stochasticité

La stochasticité est une caractéristique fondamentale des SED, où les événements qui gouvernent les transitions d'état sont souvent probabilistes. Cela signifie que bien que certains événements puissent être prévisibles, leur occurrence exacte dans le temps peut varier en fonction de distributions probabilistes. Par exemple, dans un contexte de gestion de file d'attente, l'arrivée de clients peut être modélisée comme un processus de Poisson, où le nombre d'arrivées par unité de temps suit une distribution spécifique, introduisant de l'incertitude dans le système. Cette stochasticité rend les SED particulièrement adaptés pour simuler et analyser des environnements réels où l'incertitude est omniprésente, permettant aux concepteurs de systèmes d'évaluer les performances sous différentes conditions et de prendre des décisions plus informées sur la gestion des risques et des ressources.

### 4.3 Complexité et Interaction

Les SED se caractérisent souvent par la complexité de leurs interactions internes, où les actions de chaque composant peuvent dépendre de l'état global du système. Cette interdépendance peut rendre le comportement du système entier non linéaire et imprévisible lorsque vu isolément de ses composants individuels. Par exemple, dans une chaîne de montage automatisée, l'action d'un robot peut dépendre non seulement de son propre état mais aussi de l'état des autres machines, de l'inventaire disponible et des conditions de l'environnement de travail. Cette complexité nécessite une modélisation et une analyse sophistiquées pour s'assurer que le système fonctionne de manière optimale sous diverses configurations et réagit efficacement aux perturbations internes et externes.

## 5 Modélisation des Systèmes à Événements Discrets

La modélisation des systèmes à événements discrets (SED) est un processus clé dans l'analyse et la conception de systèmes complexes où les changements d'état sont déclenchés par des événements spécifiques. Cette section explore les méthodes et outils utilisés pour modéliser efficacement ces systèmes, ainsi que les principes qui sous-tendent leur fonctionnement et leur simulation.

Les SED se caractérisent par des transitions d'état discontinues et sont très utilisés pour représenter une large gamme de systèmes, des processus industriels aux réseaux informatiques et aux systèmes de transport. Leur modélisation permet de comprendre et de prédire le comportement des systèmes en réponse à divers événements.

### 5.1 Principes de Modélisation des SED

La modélisation des SED repose sur plusieurs principes fondamentaux :

- **État** : Un état représente une configuration particulière du système à un instant donné.
- **Événements** : Les événements sont des occurrences qui provoquent des transitions d'un état à un autre.
- **Transitions** : Les transitions définissent les règles de passage d'un état à un autre en réponse à des événements.
- **Discontinuité** : Contrairement aux systèmes à temps continu, les SED évoluent par bonds d'un état à un autre à des instants précis.

dans ce qui suit on présente les méthodes et outils les plus utilisés pour la modélisation de ces systèmes.

## 6 Modélisation par les chaînes de Markov

### 6.1 Définition

Les chaînes de Markov sont des processus stochastiques utilisés pour modéliser des systèmes où l'évolution est déterminée par des probabilités de transition entre différents états. Nommées d'après le mathématicien russe Andrey Markov, ces chaînes jouent un rôle crucial dans la modélisation de nombreux systèmes à événements discrets (SED), grâce à leur capacité à capturer la dynamique des systèmes avec des transitions probabilistes.

## 6.2 Caractéristiques des Chaînes de Markov

Les chaînes de Markov possèdent plusieurs caractéristiques distinctives qui les rendent particulièrement utiles pour la modélisation des systèmes à événements discrets (SED). Ces caractéristiques sont détaillées ci-dessous :

### Propriété de Markov

La propriété fondamentale des chaînes de Markov est la *propriété de Markov*, également connue sous le nom de *propriété de mémoire sans mémoire* ou *propriété de Markovianité*. Cela signifie que l'état futur du système dépend uniquement de l'état actuel et non des états précédents. Formellement, si  $X_t$  représente l'état du système à l'instant  $t$ , alors pour tout  $t$ ,

$$P(X_{t+1} = x_{t+1} \mid X_t = x_t, X_{t-1} = x_{t-1}, \dots, X_0 = x_0) = P(X_{t+1} = x_{t+1} \mid X_t = x_t). \quad (2.1)$$

Cette propriété simplifie considérablement l'analyse des systèmes, car elle réduit la dépendance à une seule variable, l'état actuel.

### États finis

Les chaînes de Markov sont définies sur un ensemble fini et discret d'états. Cet ensemble, souvent noté  $S$ , contient tous les états possibles que le système peut adopter. Par exemple, pour un système de file d'attente,  $S$  pourrait représenter le nombre de clients dans la file d'attente à un moment donné. Le nombre d'états,  $|S|$ , doit être un entier fini.

### Probabilités de transition

Les transitions entre les états dans une chaîne de Markov sont régies par des *probabilités de transition*. Pour chaque paire d'états  $i, j \in S$ , la probabilité de transition de l'état  $i$  à l'état  $j$  en une unité de temps est notée  $P_{ij}$ . Ces probabilités satisfont les conditions suivantes :

$$0 \leq P_{ij} \leq 1 \quad \text{et} \quad \sum_{j \in S} P_{ij} = 1 \quad \text{pour tout } i \in S. \quad (2.2)$$

### Matrice de transition

Les probabilités de transition peuvent être regroupées dans une matrice carrée  $P$ , appelée *matrice de transition*, où l'élément  $P_{ij}$  représente la probabilité de transition de l'état  $i$  à l'état  $j$ . La matrice de transition est définie comme suit :

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & \cdots & P_{nm} \end{bmatrix}, \quad (2.3)$$

où  $n = |S|$  est le nombre d'états. La somme des éléments de chaque ligne de la matrice de transition est égale à 1.

### Stochastité

Les chaînes de Markov sont intrinsèquement *stochastiques*, ce qui signifie que les transitions entre les états sont menées par des probabilités. Cette caractéristique introduit un élément d'incertitude dans le modèle, qui permet de capturer des comportements proche de la réalité

où les événements ne sont pas parfaitement déterministes. Par exemple, dans un modèle de file d'attente, l'arrivée de nouveaux clients et le temps de service peuvent être modélisés comme des processus aléatoires.

Ces caractéristiques font des chaînes de Markov un outil puissant pour la modélisation et l'analyse de systèmes dynamiques complexes dans de nombreux domaines, tels que la production industrielle, les réseaux de communication, et la gestion de la logistique.

### 6.3 Types de Chaînes de Markov

Principalement, il existe deux types de chaînes de Markov, chacune adaptée à différents contextes de modélisation en fonction de la nature du temps et des événements :

#### Chaînes de Markov à temps discret (DTMC)

Les chaînes de Markov à temps discret, ou DTMC (*Discrete-Time Markov Chains*), sont des modèles où les transitions entre les états se produisent à des intervalles de temps discrets et réguliers. cela veut dire que le système évolue selon une séquence de pas de temps discrets  $t = 0, 1, 2, \dots$ . Ses caractéristiques principales sont :

- **Intervalle de temps discret** : Les transitions se produisent à des points de temps spécifiques et réguliers, par exemple, toutes les heures, tous les jours, ou toutes les unités de temps définies.
- **Matrice de transition** : La probabilité de transition entre les états est représentée par une matrice de transition  $P$  comme défini précédemment. Chaque élément  $P_{ij}$  indique la probabilité de passer de l'état  $i$  à l'état  $j$  en un pas de temps.

Les DTMC sont couramment utilisées dans la modélisation des processus où les changements d'état se produisent à des intervalles de temps réguliers, tels que les modèles de files d'attente et les chaînes logistiques.

#### Chaînes de Markov à temps continu (CTMC)

Les chaînes de Markov à temps continu, ou CTMC (*Continuous-Time Markov Chains*), diffèrent des DTMC en ce que les transitions entre les états peuvent se produire à n'importe quel moment, sans être limitées à des intervalles de temps discrets. Les caractéristiques principales des CTMC incluent :

- **Temps continu** : Les transitions peuvent se produire à tout moment, et non seulement à des points de temps fixes. Le temps entre les transitions est généralement modélisé par une distribution exponentielle.
- **Taux de transition** : Plutôt que d'utiliser une matrice de transition, les CTMC utilisent une matrice de taux de transition  $Q$ , où chaque élément  $q_{ij}$  représente le taux auquel le système passe de l'état  $i$  à l'état  $j$ . Les taux de transition définissent la dynamique continue du système.

Les CTMC sont utilisées dans des contextes où les événements se produisent de manière continue et aléatoire, tels que la fiabilité des systèmes et les processus industriels où les pannes et les réparations peuvent survenir à tout moment.

Ces deux types de chaînes de Markov offrent des outils flexibles et puissants pour modéliser et analyser une large gamme de systèmes dynamiques, en capturant à la fois la nature discrète et continue des événements dans des contextes variés.

## 6.4 Avantages et Limitations des Chaînes de Markov

Les chaînes de Markov sont largement utilisées dans la modélisation des systèmes à événements discrets en raison de leurs nombreux avantages. Cependant, elles présentent également certaines limitations. Cette section discute des principaux avantages et limitations des chaînes de Markov.

### Avantages

Les chaînes de Markov offrent plusieurs avantages importants :

- **Simplicité de modélisation** : Les chaînes de Markov sont relativement simples à comprendre et à modéliser. Leur structure repose sur des concepts mathématiques bien définis et intuitifs, comme les états et les probabilités de transition.
- **Flexibilité analytique** : Les chaînes de Markov permettent une analyse rigoureuse des systèmes grâce à des outils mathématiques et statistiques. Elles offrent des solutions analytiques pour des mesures de performance telles que les temps d'attente, les taux de passage, et les probabilités d'état stationnaire.
- **Adaptabilité** : Elles peuvent être appliquées à une large gamme de domaines, y compris la production industrielle, les systèmes de communication, les processus biologiques, et la finance. Leur capacité à modéliser des processus stochastiques et dynamiques les rend très polyvalentes.
- **Prédiction et optimisation** : Les chaînes de Markov peuvent être utilisées pour prédire le comportement futur des systèmes et pour optimiser les performances en identifiant les configurations les plus efficaces.

### Limitations

Malgré leurs nombreux avantages, les chaînes de Markov présentent aussi des limitations :

- **Hypothèse de Markov** : La propriété de Markov, qui stipule que l'état futur dépend uniquement de l'état actuel, est une simplification qui peut ne pas toujours refléter la réalité des systèmes complexes où les états futurs peuvent être influencés par une longue historique d'états précédents.
- **Complexité des états** : Pour des systèmes avec un grand nombre d'états, la modélisation peut devenir complexe et la matrice de transition peut devenir difficile à gérer et à analyser.
- **Hypothèses de stationnarité** : Souvent, les chaînes de Markov supposent que les probabilités de transition sont stationnaires (constantes dans le temps), ce qui peut ne pas être le cas pour de nombreux systèmes réels où les probabilités de transition peuvent varier avec le temps.
- **Limites dans la capture des dynamiques temporelles** : Les chaînes de Markov, en particulier les DTMC, peuvent être limitées dans leur capacité à capturer les dynamiques temporelles continues et les délais qui ne suivent pas nécessairement des distributions exponentielles ou géométriques.

Ces avantages et limitations doivent être soigneusement considérés lors de l'application des chaînes de Markov à la modélisation des systèmes à événements discrets. Une compréhension approfondie de ces aspects permet de maximiser l'utilité des chaînes de Markov tout en reconnaissant et en atténuant leurs limites.

## 6.5 Exemples de Modélisation avec les Chaînes de Markov

Les chaînes de Markov sont couramment utilisées pour modéliser une variété de systèmes à événements discrets. Un exemple classique est celui des systèmes de files d'attente. Considérons un modèle de file d'attente où les clients arrivent selon un processus de Poisson et sont servis par un nombre fixe de serveurs.

### Modèle de File d'Attente

Dans ce modèle, les clients arrivent au système selon un processus de Poisson avec un taux d'arrivée  $\lambda$ , et le service est effectué par un nombre fixe de serveurs, chacun avec un taux de service  $\mu$ . Ce type de système peut être représenté par une chaîne de Markov à temps continu (CTMC) en définissant les états et les transitions comme suit :

- **États** : Chaque état  $i$  représente le nombre de clients présents dans le système (file d'attente plus service). Par exemple,  $i = 0$  signifie qu'il n'y a aucun client dans le système,  $i = 1$  signifie qu'il y a un client, etc.
- **Transitions** : Les transitions entre les états se produisent lorsque des clients arrivent ou terminent leur service. La probabilité de transition d'un état à l'autre est déterminée par les taux  $\lambda$  et  $\mu$ .

### Matrice de Transition

Pour un système de file d'attente avec un nombre illimité de clients potentiels, la matrice de taux de transition  $Q$  pour les premiers états peut être représentée comme suit :

$$Q = \begin{matrix} & \begin{matrix} \square & & & & \square \\ -\lambda & \lambda & 0 & 0 & \dots \end{matrix} \\ \begin{matrix} \square \\ \square \\ \square \end{matrix} & \begin{matrix} \mu & -(\lambda + \mu) & \lambda & 0 & \dots \\ 0 & 2\mu & -(\lambda + 2\mu) & -(\lambda + 3\mu) & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \end{matrix} \\ & \begin{matrix} \square \\ \square \\ \square \end{matrix} \\ & \begin{matrix} \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \ddots \end{matrix} \end{matrix}$$

- Les éléments hors diagonale  $q_{i,i+1} = \lambda$  représentent le taux de passage de l'état  $i$  à l'état  $i + 1$  (arrivée d'un client).
- Les éléments hors diagonale  $q_{i,i-1} = i\mu$  représentent le taux de passage de l'état  $i$  à l'état  $i - 1$  (départ d'un client après service).
- Les éléments diagonaux  $q_{ii} = -(q_{i,i+1} + q_{i,i-1})$  représentent la somme négative des taux de sortie de chaque état.

### Analyse des Probabilités d'État Stationnaire

L'analyse de ce modèle permet de déterminer les probabilités d'état stationnaire, c'est-à-dire les probabilités que le système se trouve dans un certain état à long terme. Ces probabilités peuvent être calculées en résolvant le système d'équations suivant, basé sur la matrice de taux de transition  $Q$  :

$$\pi Q = 0 \quad \text{et} \quad \sum_{i=0}^{\infty} \pi_i = 1$$

où  $\pi = (\pi_0, \pi_1, \pi_2, \dots)$  représente le vecteur des probabilités d'état stationnaire.

## Applications Pratiques

Ce modèle de file d'attente peut être appliqué à divers domaines tels que :

- **Centres d'appels** : Modéliser le nombre d'agents nécessaires pour répondre aux appels entrants.
- **Réseaux informatiques** : Analyser le trafic et les temps d'attente dans les serveurs réseau.
- **Systèmes de production** : Optimiser le nombre de machines ou de travailleurs nécessaires pour maintenir un flux de production efficace.

## 7 Modélisation par les automates à états finis

### 7.1 Définition

les automates à états finis sont considérée parmi les outil de modélisation les plus utilisées, ils servent à modéliser de manière simple et efficace les système a évènement discret et dans notre cas c'est les système industriel en particulier, caractérisées par un ensemble d'états , d'évènement et de transitions entre les états qui sont déclenchées par les évènement, de plus les (AEF) sont particulièrement utiles pour la modélisation des systèmes où le comportement peut être décrit par des séquences d'actions, Ross [1996] Hopcroft et al. [2006].

### 7.2 Caractéristiques des Automates à États Finis

Les automates à états finis, comme tous outil de modélisation des systèmes a évènement discrets, possèdent plusieurs caractéristiques distinctives :

- **États finis** : Le système doit être composé par un nombre fini d'états distincts.
- **Transitions** : Les transitions qui relie entre chaque états sont déclenchées par des évènements.
- **Déterminisme** : Dans le cas d'un automate déterministe, chaque état et chaque évènement déterminent au plus une transition.
- **Non-déterminisme** : Dans le cas d'un automate non-déterministe, un état et un évènement peuvent induire a plusieurs transitions possibles.
- **Fonction de transition** : elle définit les transitions d'un état à un autre en réponse à un évènement.

### 7.3 Types d'Automates à États Finis

d'après plusieurs articles scientifiques, deux types d'automates à états finis sont définis :

#### Automates à États Finis Déterministes

Les AEF déterministes sont des automates où chaque paire état-évènement conduit à un seul état suivant. Ils sont utilisés pour modéliser des systèmes où chaque situation a une réponse unique.

## Automates à États Finis Non-Déterministes

Les AEF non-déterministes permettent plusieurs transitions pour une même paire état-événement. Ils sont utilisés pour modéliser des systèmes où plusieurs chemins peuvent être suivis simultanément, offrant plus de flexibilité dans la représentation des comportements possibles.

### 7.4 Avantages et Limitations des Automates à États Finis

Les automates à états finis présentent plusieurs avantages, tels que la clarté de modélisation et la facilité d'implémentation. Cependant, ils ont aussi des limitations, notamment lorsqu'il s'agit de modéliser des systèmes avec un grand nombre d'états ou des comportements complexes.

#### Avantages

- **Simplicité** : Les AEF sont simples à comprendre et à implémenter, particulièrement adaptés pour des systèmes avec des comportements prévisibles.
- **Clarté** : Ils offrent une représentation claire et structurée des transitions entre états, facilitant l'analyse et la vérification du système.
- **Déterminisme** : Dans les DFA, chaque situation a une réponse unique, rendant le système prévisible et facile à tester.

#### Limitations

- **État combinatoire explosif** : Pour des systèmes complexes avec de nombreux états possibles, la modélisation peut devenir impraticable en raison du nombre exponentiel de combinaisons d'états.
- **Non-déterminisme** : Bien que les NFA offrent plus de flexibilité, ils peuvent être plus difficiles à analyser et à implémenter en pratique.
- **Limites des comportements temporels** : Les AEF traditionnels ne modélisent pas les aspects temporels de manière explicite, ce qui peut nécessiter des extensions ou des combinaisons avec d'autres modèles pour une analyse complète.

### 7.5 Exemples de Modélisation avec les Automates à États Finis

Les automates à états finis sont utilisés dans divers domaines pour la modélisation et l'analyse des systèmes à événements discrets, par exemple :

#### Exemple de Contrôle de Système

on considère l'exemple d'un système de contrôle de trafic, où les états représentent les différents feux de signalisation (rouge, vert, jaune) et les événements représentent le passage du temps ou des capteurs de véhicule. Un AEF déterministe pourrait être utilisé pour modéliser les transitions entre ces états en fonction des événements, afin d'assurer une séquence correcte des feux de signalisation pour réguler le trafic.

- **États** : Rouge, Vert, Jaune.
- **Événements** : Timer T (passage du temps), capteur C (détection de véhicule).
- **Transitions** : Rouge à Vert, Vert à Jaune, Jaune à Rouge, définies par le timer.



## Exemple de Vérification de Protocoles

Les DFA peuvent être utilisés pour vérifier des protocoles de communication, où les états représentent les différentes étapes d'une session de communication et les événements représentent les messages échangés. Cela permet de s'assurer que les protocoles suivent les séquences correctes d'échange de messages.

- **États** : Connexion établie, Données envoyées, Données reçues, Connexion terminée.
- **Événements** : Envoyer (envoi de données), Recevoir (réception de données), Terminer (fin de la communication).
- **Transitions** : Entre les états en fonction des messages envoyés et reçus.

## 7.6 Applications des Automates à États Finis

Les automates à états finis sont utilisés dans de nombreux domaines, notamment :

- **Développement de logiciels** : Modélisation des flux de contrôle et vérification des protocoles.
- **Systèmes embarqués** : Contrôle de systèmes réactifs tels que les appareils électromagnétiques et les systèmes automobiles.
- **Intelligence artificielle** : Modélisation des comportements des agents et des processus de décision.

## 8 Modélisation par les Réseaux de Petri (RDP)

Apparus en 1962, dans la thèse de doctorat de Carl Adam Petri, les réseaux de Petri sont considérés par une large communauté scientifique comme le meilleur outil de modélisation des systèmes à événements discrets (SED), en particulier les systèmes industriels, pour leur efficacité et simplicité.

### 8.1 Définition générale

Un RDP est un formalisme et une représentation graphique permettant de modéliser le comportement dynamique des systèmes à événements discrets (SED). Il offre une représentation graphique intuitive et modulaire des interactions entre les entités et les événements dans n'importe quel système qu'on désire étudier.

Dans le principe, un réseau de Petri peut être considéré comme un graphe orienté bipartite contenant des places (des cercles vides), des transitions (des rectangles noirs) et des arcs (des flèches reliant les transitions et les places entre elles). On peut considérer les places comme des récipients dans lesquels on peut placer des jetons (pastille noire à l'intérieur des places). Les places peuvent représenter une partie du système, un lieu dans le système, un compteur, ou autre. L'ensemble des jetons dans les places représente le marquage du réseau de Petri et un marquage est associé à un état du système.

## 8.2 Définition formelle

Un réseau de Petri est une structure mathématique utilisée pour la modélisation des systèmes à événements discrets. Cette structure est définie par un ensemble de cinq éléments fondamentaux :  $\{P, T, A, W, M_0\}$ . Chacun de ces éléments joue un rôle crucial dans la configuration et le fonctionnement du réseau, permettant de représenter de manière précise et dynamique les processus complexes. Ces cinq éléments sont définis comme suit :

- **P** : Cet élément représente l'ensemble des places ou états du réseau de Petri. Les places peuvent être vues comme des états ou des conditions dans le modèle du système. Chaque place peut contenir un ou plusieurs jetons, et l'état global du réseau de Petri est en partie défini par la distribution des jetons dans ces places.

$$P = \{P_i\}_{i \in \{1, \dots, n\}}$$

- **T** : L'ensemble des transitions du réseau. Les transitions sont les événements ou les activités qui peuvent se produire dans le système modélisé. Une transition se déclenche lorsqu'elle est activée, c'est-à-dire lorsque les conditions spécifiées par les places d'entrée (précédées par des arcs entrants) sont satisfaites.

$$T = \{T_j\}_{j \in \{1, \dots, m\}}$$

- **A** : L'ensemble des arcs. Les arcs connectent les places aux transitions ou les transitions aux places. Il est important de noter que dans un réseau de Petri, les arcs ne peuvent pas relier directement une place à une autre place ni une transition à une autre transition. Les arcs définissent donc le flux possible des jetons et contrôlent le déclenchement des transitions.

- **W** : Le poids ou la matrice d'incidence. Chaque arc dans un réseau de Petri a un poids associé, qui est un nombre entier. Ce poids détermine le nombre de jetons nécessaires pour activer une transition ou le nombre de jetons déplacés après l'activation d'une transition. Les poids jouent un rôle crucial dans la gestion des dynamiques de jetons au sein du réseau. Pour faciliter la modélisation des SEDs par les réseaux de Petri, deux matrices d'incidence sont définies :

– Matrice Pré :  $P \times T \rightarrow \mathbb{N}$  est une application dite d'incidence avant.

– Matrice Post :  $T \times P \rightarrow \mathbb{N}$  est une application dite d'incidence arrière.

- **M<sub>0</sub>** : Le marquage initial. Ce terme désigne la configuration initiale des jetons dans le réseau. Le marquage d'un réseau de Petri indique le nombre de jetons présents dans chaque place. Cette configuration initiale est essentielle car elle détermine les transitions qui peuvent initialement se déclencher et influence donc directement le comportement du système modélisé.

## 8.3 Dynamique des Réseaux de Petri

### Activation et Déclenchement des Transitions

Pour qu'une transition dans un réseau de Petri soit activée, certaines conditions doivent être remplies. Ces conditions sont déterminées par le nombre de jetons dans les places d'entrée (précédées par des arcs entrants). Une transition activée peut alors se déclencher, ce qui entraîne :

- Le retrait d'un nombre spécifique de jetons des places d'entrée, tel que déterminé par les poids des arcs entrants.

- L'ajout d'un nombre spécifique de jetons aux places de sortie, tel que déterminé par les poids des arcs sortants.

## Évolution de l'État du Système

L'état d'un réseau de Petri à un instant donné est représenté par son marquage, c'est-à-dire la distribution des jetons dans les places. Lorsque des transitions se déclenchent, elles modifient le marquage du réseau, ce qui représente l'évolution de l'état du système. Cette évolution permet de modéliser le comportement dynamique du système et de comprendre comment les différentes parties du système interagissent au fil du temps.

## 8.4 Types de Réseaux de Petri

Il existe plusieurs variantes des réseaux de Petri, chacune adaptée à des types spécifiques de systèmes et de modélisations selon Orlov et al. [2021], Jensen [1996]:

- **Réseaux de Petri Ordinaires** : Utilisés pour les systèmes simples où chaque arc a un poids de 1.
- **Réseaux de Petri stochastiques** : Les durées associées aux transitions suivent une loi de probabilité au lieu d'être déterministes. Cela permet de modéliser des systèmes avec des événements aléatoires tel que les système industriel.
- **Réseaux de Petri Colorés** : Permettent de distinguer différents types de jetons, augmentant ainsi la capacité de modélisation.
- **Réseaux de Petri Temporisés** : Intègrent des contraintes temporelles sur les transitions pour modéliser les délais et les temps de traitement, dont il existe deux type.
  - Réseaux P-Temporels : Le temps est associée aux places.
  - Réseaux T-Temporels : Le temps est associée aux transitions.
- **Réseaux de Petri Hiérarchiques** : Utilisés pour modéliser des systèmes complexes avec plusieurs niveaux d'abstraction, par la structuration d'un grand (complexe) modèle en sous-modèles imbriqués.

## 8.5 Applications des Réseaux de Petri

Les réseaux de Petri sont utilisés dans de nombreux domaines pour modéliser, analyser et optimiser les systèmes à événements discrets :

- **Industrie** : Modélisation des lignes de production, gestion des flux de matériaux, optimisation des processus industriels.
- **Informatique** : Gestion des processus, modélisation des protocoles de communication, analyse des systèmes concurrents et distribués.
- **Transport** : Modélisation des systèmes de transport public, gestion du trafic routier, optimisation de la logistique.
- **Santé** : Modélisation des flux de patients, gestion des ressources hospitalières, optimisation des processus de soins.

## 8.6 Avantages et Limitations des Réseaux de Petri

Les réseaux de Petri (RDP) sont largement reconnus pour leur capacité à modéliser efficacement les systèmes à événements discrets, en particulier dans des environnements industriels complexes. Et comme toute méthode de modélisation des systèmes à événements discrets, les réseaux de Petri contiennent des avantages et des limitations :

### Avantages

- **Modélisation claire et précise** : Les réseaux de Petri permettent de représenter de manière intuitive et graphique les interactions entre les différents composants d'un système. Les places, transitions et arcs offrent une visualisation directe des états et des événements.
- **Formalismes mathématiques rigoureux** : Les RDP bénéficient d'une base mathématique solide, permettant une analyse formelle des propriétés des systèmes modélisés. Ceci inclut l'étude de propriétés telles que la vivacité, la sécurité, la réversibilité et la détection de situations de blocage.
- **Modularité et extensibilité** : Les réseaux de Petri peuvent être facilement étendus et modifiés pour inclure de nouvelles places, transitions ou arcs, facilitant ainsi l'évolution des modèles en fonction des besoins changeants du système.
- **Capacité d'analyse des performances** : Les réseaux de Petri permettent de mener des analyses de performance détaillées, telles que l'évaluation du débit, des temps de réponse et de l'utilisation des ressources dans un système.
- **Simplicité de simulation** : Les RDP peuvent être simulés pour observer le comportement dynamique des systèmes. Cette simulation aide à comprendre comment les systèmes réagissent aux différents événements et à identifier les éventuels goulots d'étranglement.

### Limitations

- **Modélisation des dynamiques continues** : Les réseaux de Petri sont intrinsèquement adaptés à la modélisation des systèmes à événements discrets. Cependant, ils sont moins efficaces pour représenter des systèmes avec des dynamiques continues, tels que ceux nécessitant des calculs différentiels pour des variables continues.
- **Complexité croissante** : Pour les systèmes très grands ou complexes, les réseaux de Petri peuvent devenir difficiles à gérer et à interpréter. La complexité du modèle peut croître de manière exponentielle avec l'augmentation du nombre de places et de transitions.
- **Stochasticité limitée** : Bien que certaines extensions des RDP, comme les réseaux de Petri stochastiques, existent, la modélisation des systèmes avec une grande variabilité et incertitude stochastique peut s'avérer complexe et parfois imprécise.
- **Outils et logiciels spécialisés** : L'utilisation efficace des réseaux de Petri nécessite souvent des outils logiciels spécialisés pour la modélisation, la simulation et l'analyse, ce qui peut représenter un investissement en termes de temps et de ressources.
- **Approche d'apprentissage abrupte** : Pour les personnes non familiarisées avec le formalisme des réseaux de Petri, la courbe d'apprentissage peut être relativement abrupte. La compréhension et la maîtrise des concepts de base nécessitent une formation et une pratique adéquates.

## 8.7 Exemples de Modélisation avec les Réseaux de Petri

Les réseaux de Petri sont particulièrement efficaces pour modéliser divers types de systèmes à événements discrets, notamment dans des contextes industriels et de gestion de processus. on cite dans ce qui suit quelque exemple où on trouve l'efficacité des réseaux de petri :

### Modélisation d'une chaîne de production

un RDP peut être utilisé pour modéliser une chaîne de production où chaque étape du processus de production soit représentée par une place et chaque transition entre les étapes par une transition. Les jetons représentent les produits en cours de production. Par exemple :

- **Étapes de Production** : Chaque place ( $P$ ) représente un poste de travail de la chaîne de production, comme l'assemblage, le contrôle qualité, l'emballage, etc.
- **Transitions** : Les transitions ( $T$ ) entre les places représentent les actions ou événements qui font passer les produits d'une étape à une autre, ou bien d'un poste de travail vers un autre, par exemple, l'achèvement de l'assemblage ou le début du test de qualité.
- **Flux de Jetons** : Les jetons circulant à travers le réseau représentent les produits en cours de traitement. Le mouvement des jetons à travers les transitions permet de simuler le flux de production et d'identifier les éventuels goulots d'étranglement ou l'inefficacité dans le processus.

### Gestion des files d'attente

Les réseaux de Petri peuvent modéliser des systèmes de files d'attente, couramment utilisés dans les services à la clientèle :

- **Clients en file d'attente** : Les places représentent les différentes étapes d'attente ou de service pour les clients.
- **Serveurs** : Les transitions peuvent symboliser l'achèvement du service par un serveur ou la libération d'un poste de travail.
- **Analyse de performance** : Ce modèle permet d'analyser les temps d'attente, les taux de service, et d'optimiser la répartition des ressources pour améliorer l'efficacité du système.

## 9 Outil de simulation des systèmes à événement discret

Les SED sont caractérisés par des changements d'état distincts causés par des événements discrets qui se produisent à des moments spécifiques dans le temps. Pour analyser et étudier ces systèmes, on peut soit effectuer des calculs et des simulations manuellement pour des systèmes simples à modéliser, soit, si le système est considéré comme complexe, utiliser un outil ou un logiciel dédié. Ces outils permettent non seulement de modéliser des systèmes complexes, mais aussi de les simuler sur de longues périodes. Cela aide considérablement les utilisateurs, qu'ils soient chercheurs ou ingénieurs, à mieux analyser le système et à obtenir des résultats précis. Comme déjà discuté, La simulation des systèmes à événements discrets (SED) est primordiale pour analyser les systèmes complexes, à savoir que les outils de simulation des SED sont plusieurs dans ce domaine, on cite : ARENA, Flexsim, Witness, etc. tous ces outils (logiciel) sont essentiels pour étudier un système complexe à partir d'une modélisation d'un système à événement discret, en offrant une plate-forme pour la modélisation du système industriel,

l'évaluation des performances, la détection des goulots d'étranglement et l'optimisation des processus. Ainsi, ces outils utilisent divers formalismes de modélisation, tels que la modélisation 3D, les réseaux de Petri ou la modélisation mathématique, pour représenter le comportement complexes des systèmes.

Dans cette section, nous explorerons l'utilisation de l'outil de simulation des SEDs FlexSim, un logiciel de simulation puissant et flexible, se distingue par sa capacité à créer des modèles en 3D, une interface utilisateur intuitive et des outils analytiques avancés pour l'évaluation des performances du système simulé. Nous discuterons des caractéristiques de FlexSim, de son architecture, de ses différents formalismes de modélisation et des avantages qu'il offre pour la modélisation des SED.

## 9.1 pourquoi simuler un SED

La simulation des Systèmes à Événement Discret (SED) joue un rôle crucial dans l'étude des système complexes, notamment des processus de production. Les SED se distinguent par des changements d'état et des événements qui implique des changement du système de production, tels que des arrivées de matière première, des pannes d'équipement, ou des changements de configuration. le challenge majeurs de ces système complexes comme déjà expliqué est le faite d'analyser et comprendre Leur complexité et leur dynamique. et pour cela, il est essentiel de modéliser le comportement de ces systèmes. soit par des méthodes analytiques ou empiriques traditionnelles. soit par des outil ou des logiciel de simulation avancés offrant une solution puissante en permettant de modéliser le comportement dynamique d'un SED.

### Avantages

le concept de la simulation a émergé dans la recherche scientifique et la pratique pour des raison de complexité et de difficulté de prédiction de comportement des systèmes, ces problèmes ont été résolut grâce aux différents avantage que la simulation apporte, on cite parmi eux :

- **Tester des scénarios et des configurations** : pour explorer différentes configurations et scénarios sans perturber le système réel.
- **évaluer les différentes alternatives** : sans engager des ressources pour résoudre le problème rencontré
- **Visualiser et comprendre le comportement du système** : offrant une représentation visuelle des processus, facilitant l'analyse des interactions entre les composants du système.
- **Identifier et éliminer les goulots d'étranglement** : La simulation aide à détecter les points de congestion dans le flux de travail et à tester des solutions pour les éliminer.
- **Optimiser les performances** par l'évaluer des performances sous diverses conditions et de trouver les moyens d'améliorer l'efficacité du système.
- **Évaluer les impacts des changements** : Avant d'implémenter des modifications dans le système réel, la simulation permet d'évaluer les impacts potentiels et d'ajuster les plans en conséquence.

### Limitations

Malgré les nombreux avantages de la simulation des SED, il existe certaines limitations à prendre en compte :

- **Complexité de la modélisation** : La modélisation précise d'un système peut être une tâche complexe et nécessite une compréhension approfondie du système.
- **Coût et temps** : La simulation peut être coûteuse et prendre beaucoup de temps, surtout pour les systèmes complexes.
- **Validité des résultats** : Les résultats de la simulation dépendent de la précision du modèle et des données d'entrée. Si ces éléments ne sont pas corrects, les résultats de la simulation peuvent ne pas être valides.
- **Interprétation des résultats** : L'interprétation des résultats de la simulation peut être difficile, surtout pour les systèmes complexes.

## 9.2 Flexsim simulation

FlexSim est un logiciel de simulation 3D conçu pour modéliser, analyser, visualiser et optimiser des systèmes à événements discrets dans divers domaines tels que la fabrication, la logistique, la supply-chain, les services de santé, etc. FlexSim Software Products, Inc. [2024]. Il permet de créer des modèles de simulation dynamiques en 3D représentant concrètement les processus réels. Les utilisateurs de FlexSim qui sont principalement des ingénieurs peuvent concevoir, expérimenter et analyser différents scénarios opérationnels avant leur mise en œuvre physique FlexSim Software Products, Inc. [2024]. FlexSim offre des fonctionnalités clés pour la simulation et la modélisation des systèmes à événements discrets comme :

- Modélisation par objets avec une bibliothèque d'objets prédéfinis
- Visualisation 3D réaliste des opérations simulées
- Collecte et analyse statistique des données de performance
- Optimisation des paramètres du système simulé
- Possibilité de tester et comparer rapidement différents scénarios

## 9.3 niveau de modélisation sous Flexsim

Flexsim propose un large éventail de modélisation de flux, et cela par 3 niveau de modélisation, que l'utilisateur peut utiliser afin de bien modéliser le comportement du système industriel étudié, ces niveaux sont détaillés dans ce qui suit :

### Modélisation 3D

La modélisation 3D est considérée comme le niveau de simulation et de modélisation le plus simple à gérer, offrant à l'utilisateur une large bibliothèque de ressources prédéfinies, qui représente des modules ou des ressources matérielles de production (ex : source de matière première, poste de traitement, transporteurs, espace de stockage, etc.). L'utilisateur peut tout simplement modéliser un système de production standard avec des comportements faciles à gérer. La modélisation 3D permet de créer des modèles visuellement intuitifs et interactifs, représentant les éléments du système sous forme tridimensionnelle. Cette méthode offre plusieurs avantages à l'utilisateur :

- **Visualisation réaliste** : La modélisation 3D permet de voir les processus en action de manière réaliste, facilitant la compréhension des flux et des interactions dans le système.

- **Identification des goulots d'étranglement** : En visualisant le système en 3D, il devient plus facile de repérer les points de congestion et d'identifier les zones nécessitant des améliorations.
- **Communication améliorée** : Les modèles 3D sont plus accessibles pour les parties prenantes non techniques, facilitant la communication des résultats et des analyses.

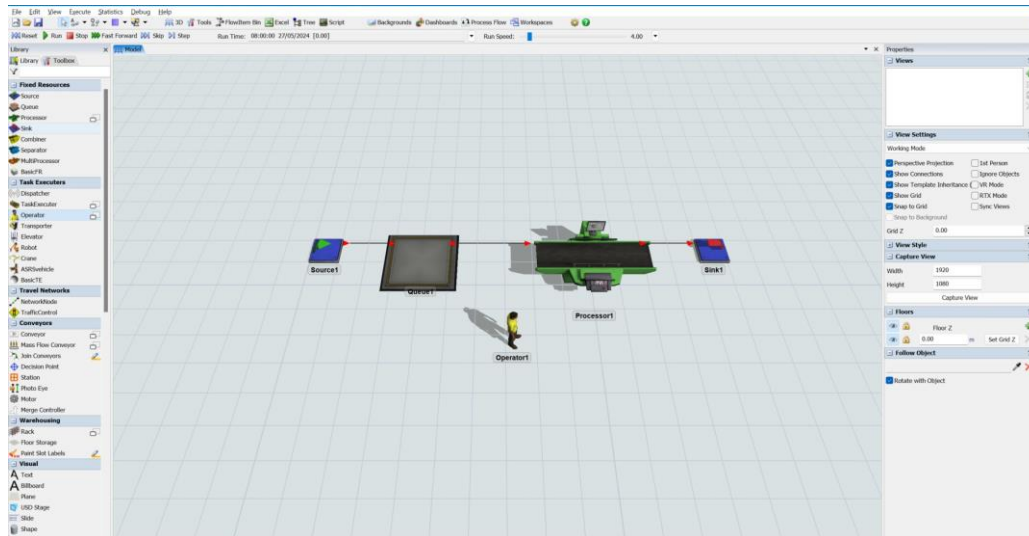


Figure 2.1: Modélisation d'un simple système de production

Ce type de modélisation peut être bénéfique pour des simple système de production car il permet de modéliser le système d'une façon efficace. cependant, il limite l'accès a des modélisation plus complexe, ce qui peut limiter l'utilisation du logiciel a sa capacité maximale

### Modélisation par les réseaux de Petri - Process Flow

Pour des modélisation plus complexes, FlexSim intègre la modélisation par les réseaux de Petri, appelée aussi "Process Flow", elle permet à l'utilisateur de réaliser des réseaux de petri pour stimuler le comportement du système de production désiré, afin de contrôler les ressource déjà utiliser dans le model 3D d'une façon différentes et plus compliqué. en utilisant une bibliothèque de "blocs", cette bibliothèque est essentiel pour les construction des différents réseaux de petri qui décrivent le comportement des systèmes. Les réseaux de Petri dans FlexSim sont particulièrement utiles pour modéliser :

- **Interactions complexes** : Les réseaux de Petri peuvent capturer des interactions complexes entre différents éléments du système.
- **Analyse des propriétés** : Ils permettent d'analyser formellement des propriétés importantes comme la vivacité, la sécurité et l'équité.
- **Contrôle des processus** : Ils sont efficaces pour modéliser les processus de contrôle et de coordination dans les systèmes industriels.



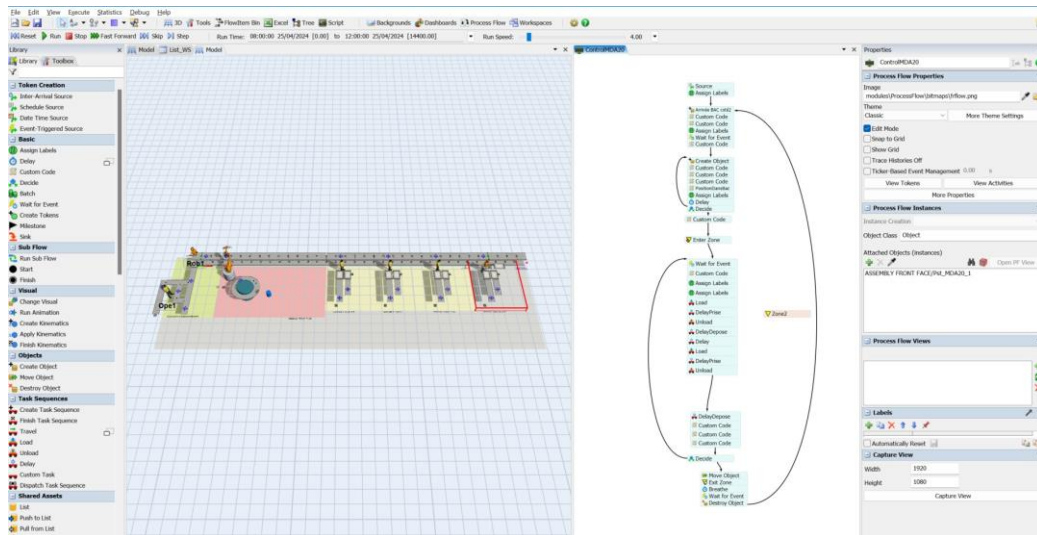


Figure 2.2: Exemple d'un process flow d'un poste de travail - MDA20

ce type de modélisation est parfait pour une modélisation complexes des système, mais, il est évident que la construction d'un système complexes nécessite une bonne compréhension des réseaux de petri et les méthodes de modélisation complexes

### Modélisation FlexScript

FlexScript est le langage de script propre à FlexSim, il offre une flexibilité supplémentaire pour la modélisation et la personnalisation des simulations. en utilisant ce type de modélisation, les utilisateurs peuvent :

- **Personnaliser les comportements** : Écrire des scripts pour définir des comportements spécifiques et des règles complexes qui ne sont pas directement disponibles via l'interface graphique.
- **Automatiser les processus** : Automatiser des tâches répétitives ou complexes, améliorant ainsi l'efficacité et la précision des simulations.
- **Intégration avancée** : Intégrer FlexSim avec d'autres systèmes et logiciels, permettant une extensibilité accrues.

## 10 Conclusion

En conclusion, les SED sont primordial pour l'analyse et la compréhension de système complexes, et pour appuyer sur ça, il est nécessaire d'utiliser des méthode de modélisation de ces systèmes, tel que les réseaux de petri,les chaînes de Markov et les automates a états finis. cependant,pour le cas des chercheurs et des ingénieurs, l'utilisation de logiciels de simulation comme FlexSim est essentielle pour comprendre et améliorer les systèmes complexes et les système industriel en particulier. cet outil offre la capacité de modéliser des interactions sophistiquées et de simuler des opérations sur de longues périodes pour avoir des résultats et des prévisions précieux, aidant à prendre des décisions informées et à améliorer l'efficacité des systèmes industriels.

# Chapter 3

## Cas d'étude général LivingPackets

### 1 Introduction

Ce chapitre détaille le cas d'étude LivingPackets, en examinant ses caractéristiques, ses objectifs, et les différentes configurations envisagées pour son étude.

L'objectif principal de ce chapitre est de présenter et d'analyser le système d'assemblage LivingPackets en mettant en avant ses capacités d'adaptation et d'optimisation. Plus spécifiquement, ce chapitre vise à :

1. Décrire le produit et le système d'assemblage étudié : Fournir une compréhension détaillée du produit assemblé et des lignes de d'assemblage impliquées dans le système.
2. Explorer l'organisation du système : Analyser la structure des différentes lignes d'assemblage, à savoir la Ligne d'Assemblage Front Face (LAFF), la Ligne d'Assemblage Body (LAB), et la Ligne d'Assemblage Final (LAF).
3. Présenter les configurations proposées : Démontrer les différentes configurations possibles en modifiant les ressources de manutention entre robots et opérateurs. Expliquer les scénarios de configurations pour chaque ligne d'assemblage et analyser leurs impacts sur les performances du système.
4. Discuter du paramétrage des modèles : Examiner les différents paramètres tels que le temps opératoire de soudure, le temps opératoire des robots, et le nombre de palettes, et leur influence sur le fonctionnement et l'efficacité du système.
5. Proposer des indicateurs de performance : Identifier les métriques clés pour évaluer l'efficacité des configurations proposées, incluant le taux d'utilisation des ressources, le nombre de produits finis et défectueux, ainsi que l'évolution du nombre de palettes et de produits semi-finis.

### 2 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.

comme déjà discuté, 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].

### 3 Description du produit

The BOX, un colis réutilisable connecté, équipée d'une tablette 4G et d'un ensemble complet de capteurs (GPS, température, choc, détecteur d'ouverture, etc.), offre une multitude de services pour le e-commerce. Grâce à ses fonctionnalités avancées, le produit permet non seulement de suivre et de surveiller les colis en temps réel, mais aussi de garantir leur sécurité et leur intégrité pendant le transport LivingPackets [2024].

L'un des objectifs principaux de The BOX 3.2 est de réduire considérablement la quantité de cartons utilisés dans le commerce en ligne, qui génère actuellement une énorme quantité de déchets. En optimisant l'emballage et en améliorant l'efficacité logistique, La Box contribue également à limiter les transports de colis, réduisant ainsi l'empreinte carbone du secteur.

le colis est disponible en différents modèles, offrant une gamme de volumes de 2 à 32 litres, afin de répondre aux divers besoins des utilisateurs et des entreprises de e-commerce. Ces modèles variés permettent de choisir la solution la plus adaptée en fonction du type et de la taille des produits à expédier, tout en maximisant la durabilité et l'efficacité du processus de livraison.



Figure 3.2: The BOX

le produit en considération dans notre cas d'étude est nommé the RCS Silver box, qui est un colis réutilisable, pliable et connectée, sa décomposition est comme suit :

- un couvercle (marque C)
- un fond (marque K)
- deux faces latérales (face droite équipée et face gauche équipée) (marques H et J)
- un fond (fond équipé) (marque E)
- une face avant (face avant fonctionnelle) (marque O)
- Les différentes faces et le fond sont articulés et assemblés ensemble par des charnières (marques L, M pour les charnières) et des ressorts formant des sous-ensembles de ressorts équipés pour les faces avant et latérales (marques F, G). La face avant est équipée d'un certain nombre d'éléments (tablette, connecteurs, protections, etc.).

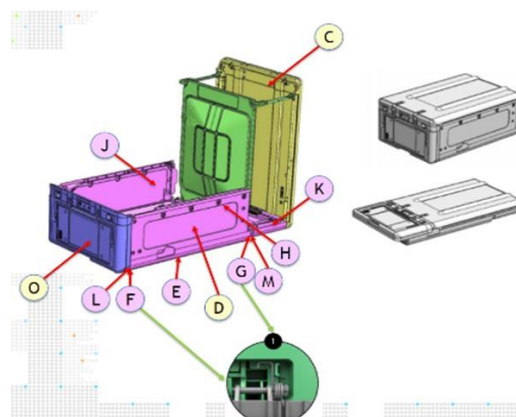


Figure 3.3: Description du produit

Marque	Désignation
C	Couvercle
D	Corps assemblé (sous-ensemble constitué des faces latérales et du fond avec ressorts et charnières)
E	Fond
F	Ressort équipé avant
G	Ressort équipé latéral
H	Face droite équipée
J	Face gauche équipée
K	Fond (Back side)
L	Charnière latérale
M	Charnière arrière
O	Face avant fonctionnelle

Table 3.1: Tableau des marques et Désignations du produit

## 4 Description du système étudié

### 4.1 organisation du système

Le système d'assemblage étudié est constitué de 3 lignes de d'assemblage, chacune possède des caractéristiques spécifiques, des modules, et des postes de travail qui comportent des ressources matérielles (robot, stock, convoyeur. . . ) et des ressources humaines (opérateurs). Chaque ligne possède un module d'entrée de palette MDA19 et un module de contrôle et de sortie des produits MDA04 identiques. de plus, chaque ligne produit une partie du produit final, qui est le RCS Silver box dans ce cas :

- Ligne d'assemblage Front Face - **LAFF**
- Ligne d'assemblage Body - **LAB**
- Ligne d'assemblage Final - **LAF**

Dans ce qui suit, on explique les points de différence et de ressemblance entre chaque ligne d'assemblage

#### Ligne d'assemblage front face - LAFF

Cette première ligne de production est dédiée à la fabrication de la face avant fonctionnelle, constituée d'un total de 7 modules, incluant les deux modules MDA19 et MDA04. MDA20 est chargé de placer le pare-chocs avant en polypropylène expansé sur la palette qui est déjà arrivée depuis le poste MDA19. Ensuite, la palette continue son trajet sur le convoyeur vers les prochains postes de travail, à savoir MDA21, MDA22 et MDA23. Ces postes sont similaires car ils effectuent le même processus, à savoir l'assemblage des différentes pièces sur le pare-chocs avant situé sur la palette. Chaque poste est responsable de l'assemblage d'une pièce spécifique, à savoir le squelette assemblé, la tablette et la plaque arrière. Ensuite, la palette se dirige vers le dernier poste de travail de cette ligne, le MDA24, qui est responsable de la seule opération de soudure dans le système. Cette opération consiste à souder la tablette sur le pare-chocs avant. Enfin, la palette passe au poste de sortie MDA04 pour le contrôle final de la ligne



Figure 3.4: Ligne d'assemblage Front Face

### Ligne d'assemblage body - LAB

Cette deuxième ligne de production est similaire à la première ligne, elle est dédiée à la fabrication du corps assemblé du produit final (sous-ensemble constitué des faces latérales et du fond avec ressorts et charnières), constitué d'un total de 6 postes de travaux (module), incluant les deux modules MDA19 et MDA04. Les modules MDA01 et MDA05 sont chargé de mettre le fond et le ressort équipé avant sur la palette qui est déjà arrivée depuis le poste MDA19, après le dépôt des dernières pièces, la palette passe vers les deux prochains modules MDA03 et MDA02, qui sont responsable de l'assemblage de 4 pièces ; Face gauche, Face droite, le Ressort latéral et la Charnière latérale. Enfin, la palette passe au poste de sortie MDA04 pour le contrôle final de la ligne

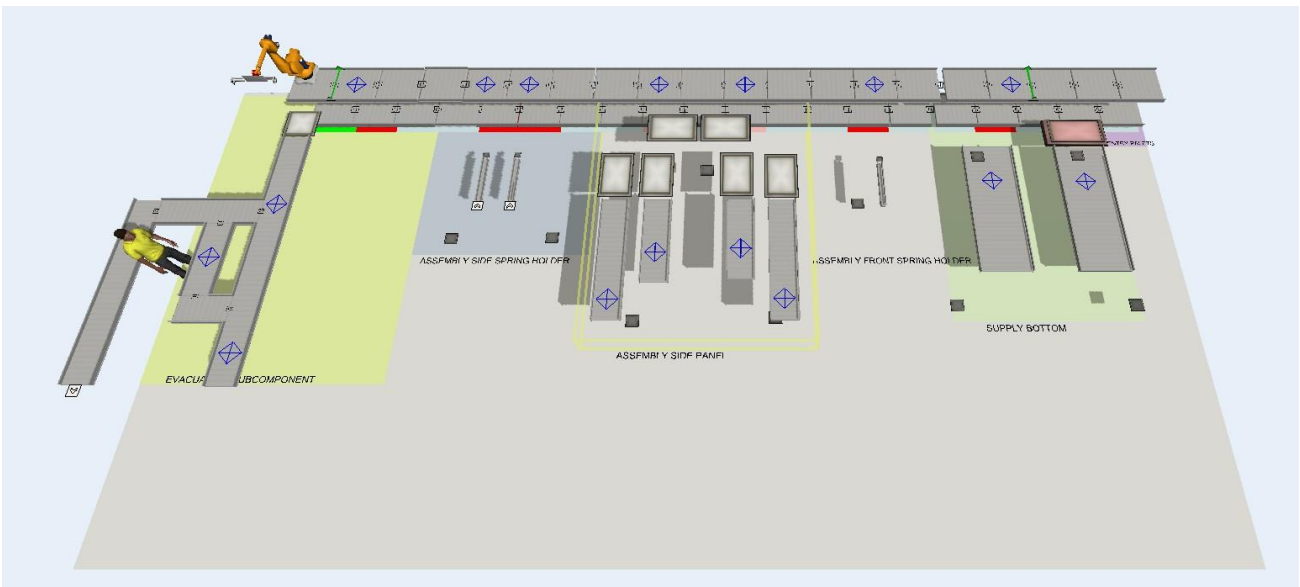


Figure 3.5: Ligne d'assemblage Body

**Remarque:** les deux premières lignes de production LAFF et LAB travaillent en parallèle dès le début de la simulation (production), pour mettre en place deux produit semi-finis à la disposition de la 3ème ligne de production LAF, afin de les exploiter pour la réalisation du produit final, comme illustrer dans le diagramme ci-dessous



## Ligne d'assemblage final - LAF

Cette troisième ligne de production est considérée comme la dernière étape de fabrication du produit, en utilisant les 2 produits semi-fini fabriqués par les deux premières lignes et en ajoutant des pièces pour finaliser le produit. Constitué d'un total de 6 postes de travaux (module), incluant les deux modules MDA19 et MDA04. La palette arrive du poste MDA19 vers le poste MDA06 qui est connecté par un convoyeur avec la ligne LAB, les produits semi-finis (corps assemblé) vont être disponible au niveau de ce dernier poste, afin de les mettre un par un sur la palette vide disponible, puis la palette se libère vers le poste MDA07 pour l'assemblage du fond et la charnière arrière. Après, la palette passe vers le poste MDA08 pour l'assemblage du couvercle. Ensuite, la palette passe vers le poste MDA09 qui est connecté par un convoyeur avec la ligne LAFF, les produits semi-finis (face avant fonctionnelle) vont être disponible au niveau de ce dernier poste, afin de les assembler un par un sur corps assemblé disponible sur la palette. Enfin, la palette chargée par le produit final passe au poste de sortie MDA04 pour le contrôle final du système.

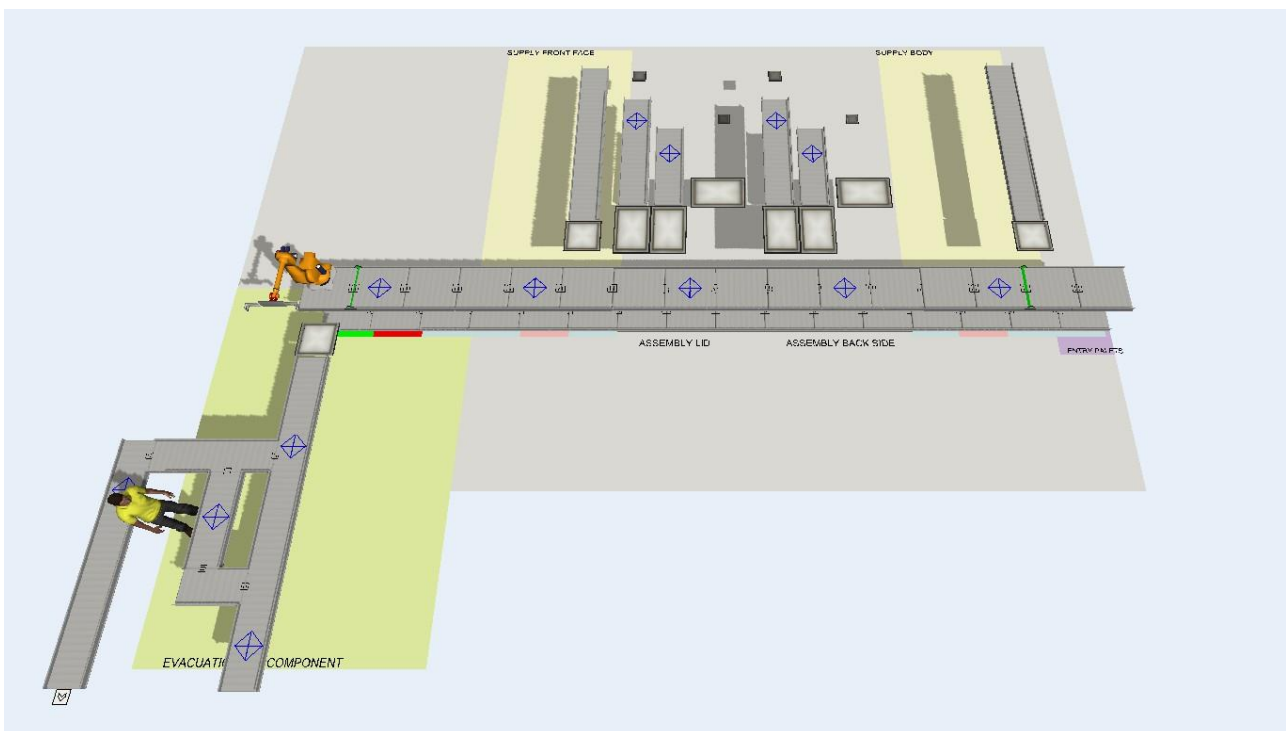


Figure 3.6: Ligne d'assemblage Final

## 4.2 Description des postes de travail

dans cette section, on va expliquer en détails le rôle de chaque poste de travail dans chaque ligne d'assemblage du système

### ligne d'assemblage Front Face

l'objectif de cette ligne est d'offrir un premier produit semi-fini qui va être utilisé pour la réalisation du produit finis au niveau de la ligne d'assemblage final, composé d'un total de 7 module, considérés comme des postes de travail

**MDA19** Le premier poste de la ligne, considéré comme le poste d'initialisation et de source des palettes a utilisées pour le déplacement des pièces sur le convoyeur.

**MDA20** Ce poste de travail est responsable d'ajout et du placement du pare-chocs avant sur la palette disponible au devant, constitué d'une ressource de manutention (opérateur ou robot), une table intermédiaire de capacité 1, 3 stocks tampons amont en FIFO et un stock tampon aval. une fois la palette s'arrête devant le poste, la ressource de manutention prend une pièce d'un pare-chocs avant depuis le stock avec un délai de prise, la dépose en premier sur la table intermédiaire avec un délai de dépôt et de calage, puis la reprend et la dépose sur la palette arrêtée avec des délais respectifs pour la prise et le dépôt. Le ressource retourne à sa position initiale pour prélever une autre pièce pour l'assemblage suivant. enfin, La palette est libérée vers le prochain poste de travail.

**Postes MDA21\_1 MDA21\_2 MDA21\_3** Les 3 postes de travail sont similaire en terme de composition, ils se diffère seulement par rapport a la pièce assemblé, constitués d'une ressource de manutention (opérateur ou robot), une table intermédiaire de capacité 1, 3 stocks tampons amont en FIFO et un stock tampon aval. une fois la palette s'arrête devant l'un des postes, la ressource de manutention dans chaque poste de travail prend la pièce adéquate depuis le stock tampon, la dépose en premier sur la table intermédiaire avec un délai de dépôt et de calage, puis la reprend et la dépose sur la palette arrêtée avec des délais respectifs pour la prise et le dépôt. Le ressource retourne à sa position initiale pour prélever une autre pièce pour l'assemblage suivant. les pièce adéquate a chaque poste sont comme suit:

- **poste MDA21\_1** : contient un stock de squelettes assemblées
- **poste MDA21\_2** : contient un stock de tablettes
- **poste MDA21\_3** : contient un stock de plaques arrière

après l'achèvement de chaque étape d'assemblage de ces postes, La palette est libérée vers le prochain poste.

**MDA24** nommé aussi par le poste de soudage, constitué d'un robot d'une machine à souder à 2 emplacements de capacité 2 pour chaque emplacement, le rôle principale de ce poste de travail est de rassembler les pièce par une soudure, chaque pièces qui arrivent reçoivent le même traitement

**MDA04** dernier poste de travail, considéré comme le poste de contrôle des pièce semis finis de la ligne d'assemblage front face, constitué d'un robot de manutention, un stock intermédiaire, 3 ligne de convoyeur et un opérateur de contrôle. Une fois la palette arrive a la fin du convoyeur principale, elle s'arrête devant le robot pour qu'il prend la produit semi-fini réalisé et le dépose sure le stock intermédiaire, ensuite le produit semi-fini continue son chemin vers l'une des 3 convoyeur basé sur l'état et taux de qualité des pièces:

1. **Produit Bon** : envoyé directement au poste MDA09 (ligne d'assemblage Final)
2. **Produit Bon mais nécessite une retouche** : passe vers l'opérateur pour la retouche puis vers le poste MDA09
3. **Mauvais Produit** : est détruit au Sink, considéré comme rebut.



## **ligne d'assemblage Body**

l'objectif de cette ligne est d'offrir un deuxième produit semi-fini qui va être utilisé pour la réalisation du produit finis au niveau de la ligne d'assemblage final, composé d'un total de 6 module, considérés comme des postes de travail :

**MDA19** Le premier poste de la ligne, considéré comme le poste d'initialisation et de source des palettes a utilisées pour le déplacement des pièces sur le convoyeur.

**MDA01** Ce poste de travail est responsable d'ajout et du placement de fond de produit sur la palette arrêtée devant, constitué d'une ressource de manutention (opérateur ou robot), une table intermédiaire de capacité 1, 3 stocks tampons amont en FIFO et un stock tampon aval. une fois la palette s'arrête devant le poste, la ressource de manutention prend une pièce de fond depuis le stock avec un délai de prise, la dépose en premier sur la table intermédiaire avec un délai de dépôt et de calage, puis la reprend et la dépose sur la palette arrêtée avec des délais respectifs pour la prise et le dépôt. Le ressource retourne à sa position initiale pour prélever une autre pièce pour l'assemblage suivant. enfin, La palette est libérée vers le prochain poste de travail.

**MDA05** un poste de travail pour l'assemblage du ressort équipé avant sur le fond situé dans la palette une fois arrêtée, constitué d'une ressource de manutention, une zone de travail (stock) de capacité 1, un stock tampon FIFO amont, et un stock tampon aval. une fois la palette contenant le fond équipé (E) est arrêtée. la ressource de manutention prend une pièce (ressort) disponible dans un stock et l'assemble avec le fond dans la palette. ensuite la ressource revient à sa position initiale pour prélever une pièce pour l'assemblage suivant. enfin, La palette est libérée vers le prochain poste de travail.

**MDA03** dans ce poste de travail, les deux faces latérales sont assemblé avec le produit en-cours, une ressource est réservé pour assembler chaque face du produit semi-finis, et c'est pour cela, cette station est composée d'un double d'ensemble de ressource identique, chaque ensemble de ressource contient, une ressource de manutention, une table a coté de la ressource, et 3 stock tampon, une fois, la palette arrive au premier point de la station, elle s'arrête pour l'assemblage de la première face par la première ressource, ensuite elle se libère vers le deuxième point de la station pour subir le même traitement par la deuxième ressource de manutention qui assemble l'autre face latérale avec le produit en-cours. a la fin de cette opération la palette passe au prochain poste de travail.

**MDA02** similaire au poste précédant (MDA03), ce poste possède effectuée deux opérations identiques pour le même produit par deux ressources différentes, constitué d'une ressource de manutention et 3 stock tampon pour chaque opération d'assemblage dans ce poste. la première opération consiste à assembler le ressort latéral avec le produit, et la seconde opération consiste à assembler la charnière latérale. a la fin de traitement de ces deux opérations, la palette passe vers le dernier poste de travail de cette ligne d'assemblage.

**MDA04** dernier poste de travail, considéré comme le poste de contrôle des pièces semi-finies de la ligne d'assemblage Body, constitué d'un robot de manutention, un stock intermédiaire, 3 ligne de convoyeur et un opérateur de contrôle. Une fois la palette arrive à la fin du convoyeur principale, elle s'arrête devant le robot pour qu'il prenne le produit semi-fini réalisé et le dépose sur le stock intermédiaire, ensuite le produit semi-fini continue son chemin vers l'une des 3 convoyeurs basé sur l'état et le taux de qualité des pièces:

1. **Produit Bon** : envoyé directement au poste MDA06 (ligne d'assemblage Final)
2. **Produit Bon mais nécessitant une retouche** : passe vers l'opérateur pour la retouche puis vers le poste MDA06
3. **Mauvais Produit** : est détruit au Sink, considéré comme rebut.

### Ligne d'assemblage Final

**MDA19** Le premier poste de la ligne, considéré comme le poste d'initialisation et de source des palettes a utilisées pour le déplacement des pièces sur le convoyeur.

**poste MDA06** au niveau de ce poste de travail, s'effectue la réception du produit semi fini (Body) de la ligne d'assemblage (LAB) par une ressource de manutention (ROBOT ou opérateur), ce dernier est placé sur la palette déjà disponible auprès du poste le sont assemblé avec le produit encours, ce poste est principalement composé d'une ressource de manutention et un stock de capacité 1000 pièces. à la fin de cette opération la palette passe au prochain poste de travail.

**MDA07** au niveau de ce poste de travail, s'effectue l'assemblage des deux pièces par une ressource de manutention (ROBOT ou opérateur), ce poste possède une structure similaire au poste MDA21 de la ligne LAFF. une fois la palette s'arrête auprès du poste, la ressource de manutention assemble le fond et la charnière arrière du produit. ensuite la palette passe au prochain poste de travail.

**MDA08** similaire au poste MDA07, ce poste diffère seulement sur la pièce a assembler sur le produit, dans ce cas, la ressource de manutention prend un couvercle depuis le stock et elle l'assemble au produit encours, à la fin de cette opération la palette passe au prochain poste de travail.

**poste MDA09** ce poste est similaire au poste MDA06, composé d'une ressource de manutention et un stock de produit semi fini (Face avant fonctionnelle), une fois la palette chargée arrive au poste, la ressource prend un produit semi fini a partir du stock et l'assemble avec le produit en cours d'assemblage sur la palette afin d'avoir le produit final. a la fin de cette étape, la palette passe vers le dernier poste de travail qui est le poste de contrôle.

**MDA04** dernier poste de travail, considéré comme le poste de contrôle du produit final, constitué d'un robot de manutention, un stock intermédiaire, 3 ligne de convoyeur et un opérateur de contrôle. Une fois la palette arrive a la fin du convoyeur principale, elle s'arrête devant le robot pour qu'il prend la produit fini et le dépose sure le stock intermédiaire, ensuite ce dernier continue son chemin vers l'une des 3 convoyeur basé sur l'état et taux de qualité des pièces:

1. **Produit Bon** : envoyé directement au sink des produits finis
2. **Produit Bon mais nécessitant une retouche** : passe vers l'opérateur pour la retouche puis vers le sink des produits finis
3. **Mauvais Produit** : est détruit au Sink, considéré comme rebut.

## 5 génération automatique des ligne d'assemblage

### 5.1 introduction

La génération automatique de modèles de simulations est devenue une pratique essentielle dans de nombreux domaines, offrant des avantages significatifs en termes d'efficacité, de précision, de répétabilité et d'utilisation. Dans cette partie, on présente le script de génération automatique développé dans le cadre du projet RODIC. Ce script, écrit en FlexScript sous le logiciel de simulation des systèmes a évènements discrets Flexsim, vise à automatiser le processus de création de modèles de simulation, en particulier dans le cas d'étude général du projet RODIC qui est un système d'assemblage du produit RCS Silver box.

### 5.2 objectif

comme déjà discuté, la simulation est devenue un outil incontournable dans de nombreux secteurs industriels, permettant d'analyser et d'optimiser les processus complexes et les systèmes industriels en particulier. Cependant, la création manuelle de modèles de simulation peut être difficile à gérer et sujette à des erreurs humaines. pour ce cas, l'automatisation de la génération de modèles de simulation offre une solution prometteuse pour non seulement accélérer le processus de développement mais elle garantit ainsi une meilleure cohérence et précision des résultats. L'équipe responsable du projet RODIC vise à répondre à ce besoin en développant un script de génération automatique. L'objectif principal de ce script est de simplifier et accélérer la création de modèles de simulation, en réduisant le temps et les ressources nécessaires et en améliorant la fiabilité des résultats.

### 5.3 Données d'entrée

Dans cette section, nous abordons les différentes sources de données requises pour alimenter le processus de génération automatique de modèles de simulation dans FlexSim. Cela inclut la création et le chargement d'une bibliothèque personnalisée contenant les composants spécifiques au domaine d'application, ainsi que l'importation des données à partir de fichiers Excel pour définir les paramètres de la ligne de production à simuler.

#### **Création de la Bibliothèque Personnalisée**

création d'une bibliothèque personnalisée dans FlexSim comprend la sélection et la configuration des composants de simulation spécifiques au domaine d'application. Ces composants peuvent inclure des machines, des ressources, des zones de stockage, etc.

**Drag and drop** L'utilisateur sélectionne et configure les ressources nécessaires, telles que des machines, des opérateurs, des espaces de stockage, etc., en leur attribuant les paramètres appropriés. Ensuite, ces ressources sont disposées sur un plan selon les besoins du système modélisé.

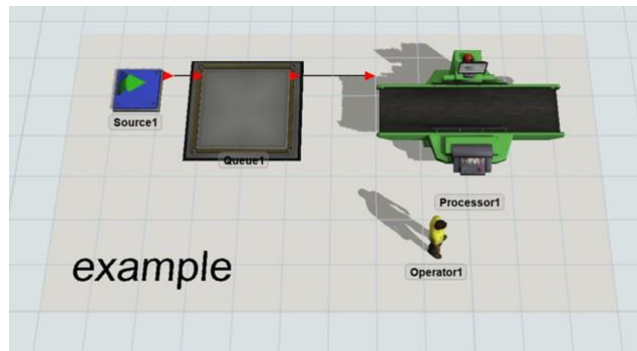


Figure 3.7: Exemple d'un poste de travail

**Sélection et Attribution** Une fois les postes de travail créés sur le plan, l'utilisateur sélectionne ce dernier et l'attribue à une nouvelle bibliothèque personnalisée ou à une bibliothèque déjà disponible.

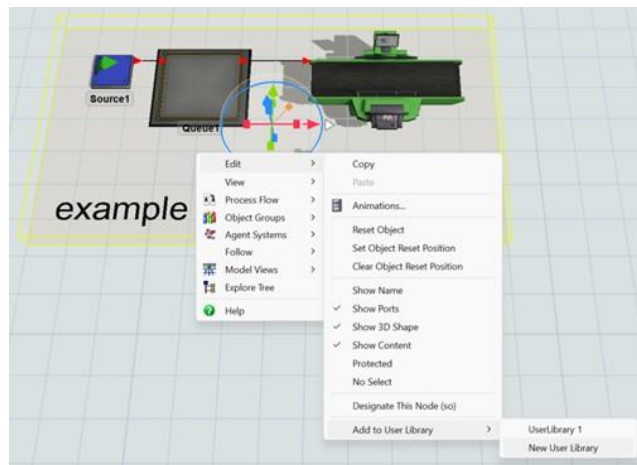


Figure 3.8: Création d'un nouveau module dans une bibliothèque

Pour faciliter la réutilisation ultérieure de ces postes de travail, il est nécessaire de sauvegarder la bibliothèque sous un nom spécifique.

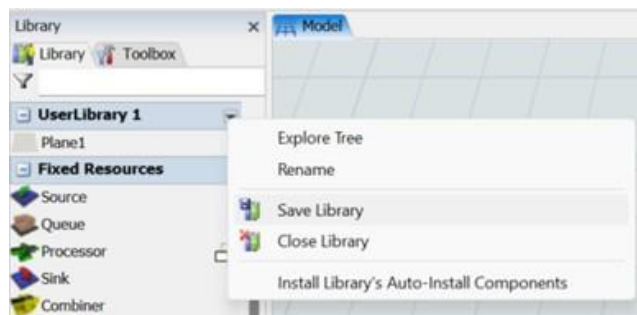


Figure 3.9: Sauvegarde de la bibliothèque

### Chargement de la Bibliothèque au Modèle

après la création et la sauvegarde de la bibliothèque, il est maintenant possible de charger la bibliothèque personnalisée dans le modèle de simulation FlexSim, afin que les composants puissent être accessibles lors de l'exécution du script de génération automatique. Cela garantit une utilisation efficace et cohérente des éléments de simulation préconfigurés.

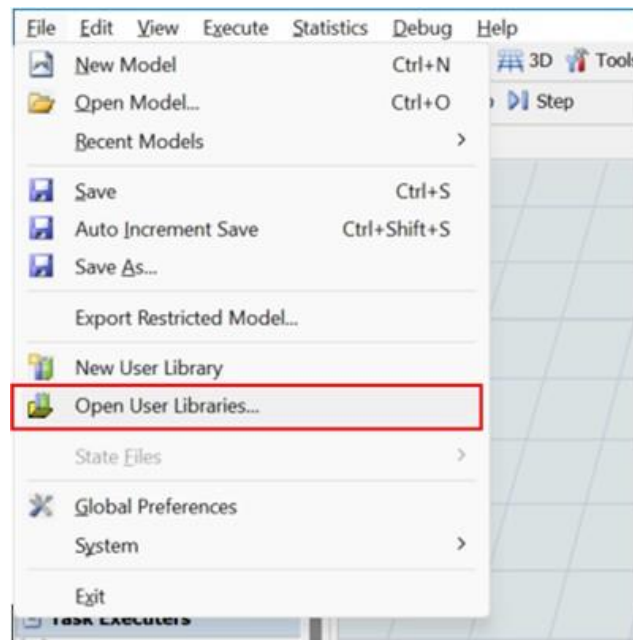


Figure 3.10: Chargement d'une bibliothèque

### Importation des Données depuis Excel

dans ce qui suit, on détaille la méthode pour importer les données à partir de fichiers Excel externes dans Flexsim. Ces données comprennent les paramètres spécifiques de chaque ligne de production, tels que les temps de traitement des tâches, les capacités des stocks, les configurations des postes de travail, etc.

Les étapes à suivre pour importer les données à partir d'un fichier Excel sont définies comme suit :

1. **Création d'une nouvelle table d'importation de données** La première étape de l'importation des données est d'ajouter une nouvelle table d'importation.
2. **Sélection du fichier Excel** Dans la boîte de dialogue Importer des données, on recherche et sélectionne le fichier Excel contenant les données que l'on souhaite importer.
3. **Sélection de la feuille** Si le fichier Excel contient plusieurs feuilles, il est nécessaire de saisir le même nom de la feuille existante sur le fichier Excel et celle qu'on souhaite utiliser.
4. **Options d'importation** On choisit l'emplacement où on souhaite importer nos données, l'option la plus utilisée est de créer en avance une table globale au niveau du modèle Flexsim, et sélectionner cette dernière.
5. **Importer le tableau lors de la ré-initialisation du modèle** Afin de maintenir la cohérence des données dans un modèle Excel.
6. **Importation des données** la dernière étape, après vérification des options sélectionnées on procède à l'importation directe des données Excel vers le modèle Flexsim.

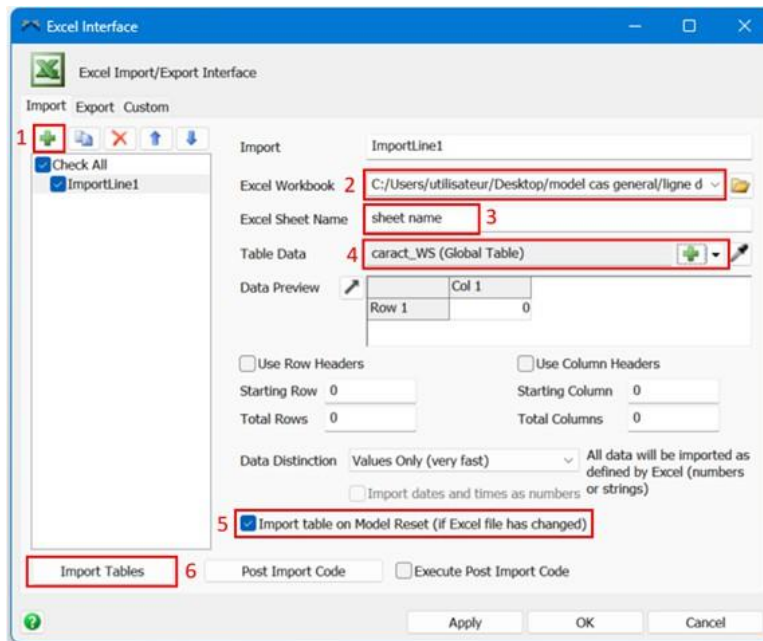


Figure 3.11: Interface Excel dans Flexsim

dans ce cas d'étude, deux types de données sont utilisés:

- Premièrement, les données sur la disposition de chaque poste de travail, qui sont des coordonnées X Y et Z pour la mesure et l'emplacement des postes sur le plan de la ligne d'assemblage, les données Excel sont importé à une table globale sous Flexsim nommée « caract\_WS ».

1	Pst_MDA01_	3,7	5,44	-0,1
2	Pst_MDA02_	3,6	4	-0,1
3	Pst_MDA02_1OP	3,6	4	-0,1
4	Pst_MDA02_2OP	8,1	5	-0,1
5	Pst_MDA02_3OP	14,4	5	-0,1

Table 3.2: Fragment des données Caract\_WS

- Le deuxième type de donnée concerne les paramètres spécifiques de chaque post de travail, tel que le temps de traitement, les délais, taux de qualité, etc. les données Excel sont importé à une table globale sous Flexsim nommée « List\_WS ».

7	ASSEMBLY FRONT FACE	1	2	3	4
Pst_MDA19_EntryPalets	ENTRY PALETS	Nombre	12	End	
Pst_MDA20_	ASSEMBLY FRONT EPP	DureeCalage	0	DureePrise	0
Pst_MDA21_	ASSEMBLY SKELETON	DureeCalage	1,5	DureePrise	0,75
Pst_MDA21_	ASSEMBLY TABLET	DureeCalage	1,5	DureePrise	0,75
Pst_MDA21_	ASSEMBLY BACK EPP	DureeCalage	1,5	DureePrise	0,75
Pst_MDA24_	WELDING FRONT FACE	WeldingDuration	30	End	
Pst_MDA04_	EVACUATION SUBCOMPONENT	DureePrise	1	DureeDepose	1

Table 3.3: Fragment des données List\_WS

## 5.4 Description du script de génération automatique

### 1. Déclaration de Variables :

Cette partie initialise les différentes variables utilisées dans le script, telles que le nombre de postes de travail (NbWS), la dimension de chaque postes de travail (Dim\_WS), la dimension total de la ligne d'assemblage (Dim\_Total), le nom des postes de travail (Name\_WS), etc.

```

int NbWS = Table("List_WS")[1][1]; // Nombre de postes de
travail
int Ref_WS; // Reference du poste de travail (variable non
utilisee)
double Dim_WS; // Dimension du poste de travail
double Dim_Total; // Dimension totale de la ligne de production
string Name_WS; // Nom du poste de travail
string Name1_WS; // Nom complet du poste de travail avec chemin
d'accès
string NameTxt1; // Partie du chemin d'accès pour le texte
descriptif
string NameTxt2; // Partie du chemin d'accès pour le texte
descriptif
string NameTxt3; // Partie du chemin d'accès pour le texte
descriptif
string NameTxt4; // Partie du chemin d'accès pour le texte
descriptif
string NameTxt5; // Chemin d'accès complet pour le texte
descriptif
double Position_WS; // Position X du poste de travail
double Position1_WS; // Position Y du poste de travail

```

## 2. Détermination de la Longueur Totale de la Ligne :

Dans cette section on utilise une boucle pour parcourir les table de données (caract) entrée en premier, qui présente la dimension et les coordonnées X,Y et Z de chaque postes de travail, afin de calculer la longueur totale de la ligne d'assemblage (sur l'axe X) en utilisant les valeur correspondantes de chaque poste de travail.

```

for (int i = 1; i <= NbWS; i++) { // Pour chaque poste de
travail
    for (int j = 1; j <= 31; j++) { // Recherche des
caracteristiques du poste
        if (Table("List_WS")[i+1][1] == Table("Caract_WS")[j
][2]) { // Si l'ID correspond
            Dim_WS = Table("Caract_WS")[j][4]; // Recupere la
dimension du poste
            Dim_Total = Dim_Total + Dim_WS; // Ajoute a la
dimension totale
            break; // Sort de la boucle une fois trouve
        }
    }
}

```

### 3. Mise en Place du Plane :

Ici, un plan est créé pour représenter la ligne d'assemblage dans le model 3D de simulation. La taille et la position sont définies en fonction de la longueur totale calculée précédemment (Dim\_Total).

```
Object libPlane = maintree().find("project/exec/globals/
    visuallibrary/Plane");// Trouve le modele de plane dans la
    bibliotheque
Object plane = createinstance(libPlane, model()); // Cree une
    instance du plane
plane.size.x = Dim_Total; // Definit la taille X du plane
plane.size.y = 10; // Definit la taille Y du plane
plane.size.z = 0.5; // Definit la taille Z du plane
plane.location.x = -10; // Positionne le plane en X
plane.location.y = 0; // Positionne le plane en Y
plane.location.z = 0; // Positionne le plane en Z
// Nom de la ligne
Model.find("Plane1").as(Object).name = Table("List_WS")[1][2];
    // Attribue le nom a la ligne
Position_WS = Dim_Total; // Initialisation de la position X des
    postes de travail
```

### 4. Création des Postes :

Cette partie est la plus importante du script, ici les postes de travail sont créés tout le long de la ligne de d'assemblage, ce qui est l'objectif de ce script, en utilisant les données des tableaux introduites au début comme données d'entrées ; « List\_WS » et « Caract\_WS », puis positionne chaque poste de travail dans le plan de simulation déjà créé, en fonction de ses dimensions et de ses coordonnées spécifiques le long de la ligne

```
// Creation des postes
for (int i = 1; i <= NbWS; i++) { // Pour chaque poste de
    travail

    for (int j = 1; j <= 31; j++) { // Recherche des
        caracteristiques du poste
        if (Table("List_WS")[i+1][1] == Table("Caract_WS")[j
            ][2]) { // Si l'ID correspond
            Dim_WS = Table("Caract_WS")[j][4]; // Recupere la
                dimension du poste
            Name_WS = Table("Caract_WS")[j][3]; // Recupere le
                nom du poste
            Position1_WS = Table("Caract_WS")[j][6]; // Recupere
                la position Y du poste
            break; // Sort de la boucle une fois trouve
        }
    }
}
```



```

Position_WS = Position_WS - Dim_WS; // Met a jour la
    position X du poste
Name1_WS = "project/userlibrary/LivingPacket01/" + Name_WS;
    // Construit le chemin d'accès complet du poste
print(Name1_WS, Position_WS); // Affiche le nom et la
    position du poste pour vérification

Object essai = maintree().find(Name1_WS); // Recherche le
    poste dans la bibliothèque utilisateur
Object entree = dropuserlibraryobject(essai, plane); // Cree
    une instance du poste et l'ajoute au plane
entree.location.x = Position_WS; // Positionne le poste en X
entree.location.y = Position1_WS; // Positionne le poste en
    Y
entree.location.z = 0.01; // Positionne le poste en Z

```

### 5. Passage des Paramètres du Poste :

Les paramètres de chaque poste de travail, tels que le temps de traitement, les capacités, etc., sont définis en parcourant les données de la liste des postes de travail (List\_WS) et en les assignant aux étiquettes correspondantes de chaque poste.

```

// Passage des paramètres du poste
for (int k = 1; k <= 26; k = k+2) { // Pour chaque paramètre du
    poste
    if (Table ("List_WS ")[i+1][k+2] == "End ") { // Si fin des
        paramètres
        break; // Sort de la boucle
    } else {
        print( Table ("List_WS ")[i+1][k+2], Table ("List_WS ")[i+1][
            k+3]); // Affiche le paramètre pour vérification
        entree.labels.assert( Table ("List_WS ")[i+1][k+2]).value
            Table ("List_WS ")[i+1][k+3]; // Assigne le paramètre
            au poste
    }
}
}

```

### 6. Mise en Place du Texte Décrivant le Poste :

Enfin, du texte descriptif est ajouté à chaque poste de travail pour identifier son rôle dans la ligne d'assemblage.

```

// Mise en place du texte décrivant le poste
NameTxt1 = Table ("List_WS ")[1][2]; // Recupere le nom de la
    ligne
NameTxt2 = "/"; // Separateur
NameTxt3 = entree.name; // Nom de l'entite

```

```
NameTxt4 = "/Text4 >variables/textcode"; // Chemin d'accès au
    texte descriptif
NameTxt5 = NameTxt1 + NameTxt2 + NameTxt3 + NameTxt4; //
    Construit le chemin d'accès complet pour le texte
Model.find(NameTxt5).value = Table("List_WS")[i+1][2]; //
    Attribue le texte descriptif au poste
}
```

## 5.5 Limitations du script

1. **Conception pour une Seule Ligne** : Actuellement, le script est conçu pour générer une seule ligne de production à la fois. Cela limite sa capacité à modéliser un système de d'assemblage ou de production complet comprenant plusieurs lignes de poste de travail.
2. **Dépendance aux Tables de Données** : Le script repose sur des tables de données spécifiques (List\_WS et Caract\_WS). Toute modification de la structure de ces tables nécessite une mise à jour du script.
3. **Flexibilité Limitée** : Le script est conçu pour des configurations spécifiques et peut ne pas s'adapter facilement à des variations importantes dans la conception des lignes de production.
4. **Erreur de Saisie** : Les erreurs dans les tables de données d'entrée peuvent entraîner des résultats incorrects ou des échecs de script.

## 5.6 Conclusion

Le script FlexScript développé dans le cadre de cette étude représente une avancée significative pour la modélisation des lignes d'assemblage dans le contexte du projet Rodic. En automatisant la création des lignes d'assemblage, ce script permet non seulement de réduire considérablement le temps nécessaire pour configurer chaque ligne, mais aussi de minimiser les erreurs potentielles lors de la conception des modules et des postes de travail pour la simulation du système.

Malgré ses avantages, le script présente certaines limitations, notamment sa capacité à gérer une seule ligne de production à la fois et sa dépendance aux structures spécifiques des tables de données d'entrée. Ces limitations donnent l'importance aux futures améliorations pour éliminer ces limitations et créer un modèle générique pour n'importe quelle conception.

En conclusion, bien que le script actuel représente une avancée importante vers l'automatisation de la modélisation des lignes de modules sous Flexsim, il constitue également une base solide pour des développements futurs. En intégrant les améliorations proposées, il sera possible de créer un script encore plus puissant et flexible, capable de répondre aux besoins plus complexes et évolutifs des systèmes.

## 6 configurations proposées

Dans cette section, on explique les trois configurations proposées pour ce système d'assemblage. Chaque configuration a été conçue pour tester le comportement du système en utilisant différentes ressources de manutention dans chaque ligne d'assemblage. En particulier, les ressources de manutention utilisées dans les postes de travail de chaque ligne peuvent varier entre trois

options : un robot, un opérateur, ou deux opérateurs. Étant donné que le système est constitué de trois lignes d'assemblage distinctes, chaque ligne pouvant être configurée avec ces trois possibilités, où on obtient un total de 27 configurations possibles.

- 3 configurations pour la ligne LAFF
- 3 configurations pour la ligne LAB
- 3 configurations pour la ligne LAF

$$3 \times 3 \times 3 = 27 \text{ configurations possible}$$

pour bien analyser ces configuration possible, on a préféré de faire l'étude sur les 3 configuration fondamental du système:

- une configuration robotisé
- une configuration à 1 opérateur
- une configuration à 2 opérateurs

## 6.1 configuration robotisée

Dans cette configuration, chaque poste de travail est composé d'un robot manipulateur à 6 axes, qui représente la ressource de manutention dans chaque poste de travail, Cette approche est la plus moderne dans le domaine de l'industrie qui permet une certaine précision et productivité dans la gestion des tâches.

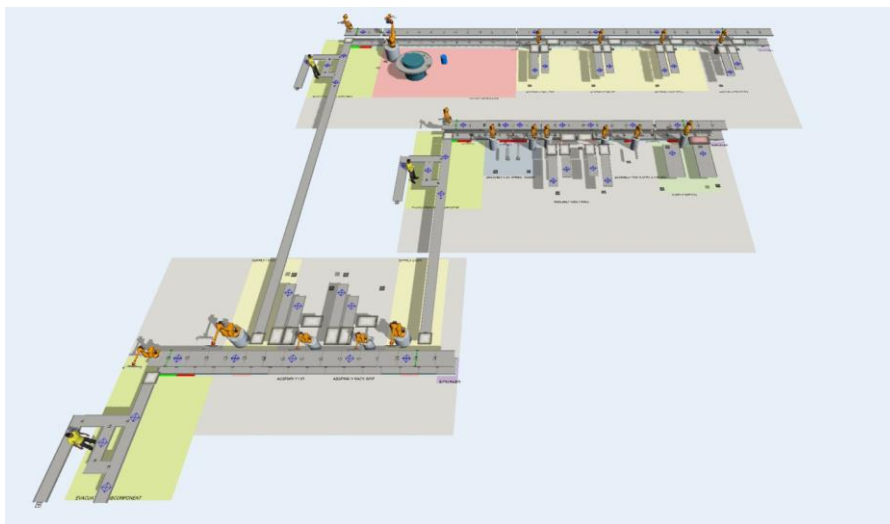


Figure 3.12: Système d'assemblage avec configuration robotisé

## 6.2 configuration à 1 opérateur

Cette configuration implique l'utilisation d'un seul opérateur dans chaque poste de travail, sauf quelque uns. Cette approche est plus traditionnelle et permet une certaine flexibilité dans la réalisation des tâches.

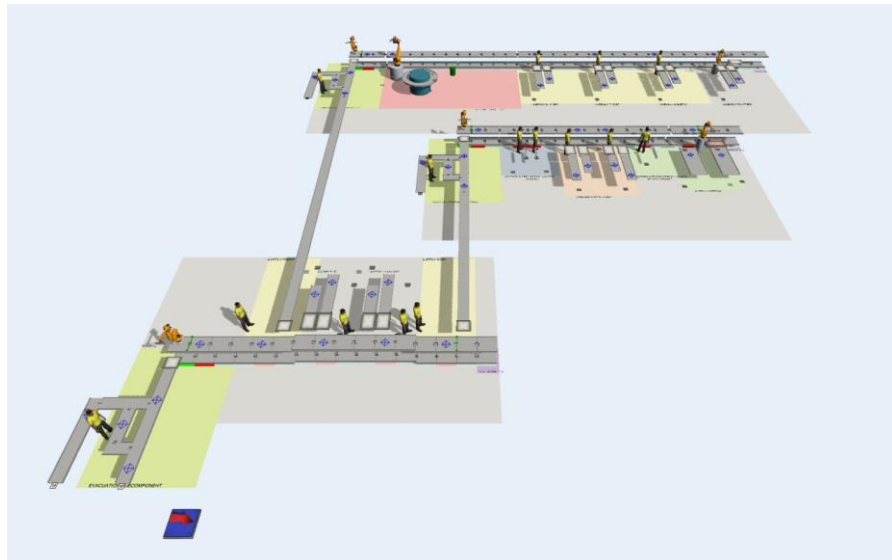


Figure 3.13: système d'assemblage avec configuration 1 opérateur

### 6.3 configuration à 2 opérateurs

Dans cette configuration, chaque poste de travail est géré par deux opérateurs. Cela peut être bénéfique pour les tâches nécessitant une coordination accrue ou pour les postes où la charge de travail est élevée.



Figure 3.14: Système d'assemblage avec configuration a 2 opérateurs

## 7 Paramétrage des modèles de configuration

Dans cette section, nous détaillons les paramètres critiques utilisés pour configurer les modèles de simulation des différentes configurations du système d'assemblage. Ces paramètres incluent le temps opératoire de soudure, le temps opératoire du premier robot et le nombre de palettes utilisées. Chacun de ces paramètres joue un rôle crucial dans la performance globale du système et leur ajustement permet de simuler diverses conditions de production et d'identifier les meilleures pratiques pour optimiser le processus d'assemblage.

## 7.1 Nombre de palettes

Le nombre de palettes disponibles dans le système détermine la capacité de stockage et le flux de produits entre les différentes étapes de la production. Ce paramètre est essentiel pour gérer le travail en cours et les niveaux d'inventaire.

- **Importance** : Le nombre de palettes influence directement la fluidité de la production et la capacité à gérer les stocks intermédiaires. Trop peu de palettes peuvent provoquer des interruptions de la production, tandis que trop de palettes peuvent entraîner une accumulation excessive de stocks.
- **Utilité** : Ajuster ce paramètre permet de tester différentes stratégies de gestion des stocks et d'optimiser l'utilisation de l'espace de stockage en fonction de la cadence de production et des besoins du système.
- **Résultats potentiels** : Une gestion optimale du nombre de palettes peut améliorer le flux de production et réduire les délais. Des ajustements peuvent être nécessaires pour trouver le juste équilibre entre capacité de stockage et efficacité de la ligne de production.

Table 3.4: Paramètres du nombre de palettes

Scénario	Nombre de palettes
1 palette	1
2 palettes	2
3 palettes	3
4 palettes	4
5 palettes	5
6 palettes	6
7 palettes	7
8 palettes	8
9 palettes	9
10 palettes	10
11 palettes	11
12 palettes	12

## 7.2 Temps opératoire du premier robot

Le temps opératoire du premier robot correspond au temps nécessaire pour que le robot des deux première ligne d'assemblage qui correspond au robots du postes MDA01 et MDA20, Ce paramètre est crucial pour évaluer l'efficacité de l'automatisation dans le système.

- **Importance** : Ce paramètre affecte directement le rythme de production. Des temps opératoires optimaux sont nécessaires pour minimiser les temps d'arrêt et maximiser le débit de la ligne.
- **Utilité** : En ajustant le temps opératoire du robot, on peut tester différentes configurations pour optimiser l'efficacité du système d'automatisation et identifier les conditions idéales pour une production fluide.
- **Résultats potentiels** : Des temps plus courts peuvent accélérer la production, mais doivent être compatibles avec la capacité du robot à maintenir une qualité constante. Des temps plus longs peuvent assurer une qualité supérieure mais doivent être évalués par rapport à leur impact sur la productivité.

Table 3.5: Durées de Prise, Calage et Dépôt pour les lignes LAFF et LAB

<b>Scenario</b>	<b>P LAFF</b>	<b>C LAFF</b>	<b>D LAFF</b>	<b>P LAB</b>	<b>C LAB</b>	<b>D LAB</b>
Scenario 1	1	1	0,75	1	3	1
Scenario 2	0,5	0,5	0,375	0,5	1,5	0,5
Scenario 3	5	5	4	5	10	5

- **P:** Durée Prise
- **C:** Durée Calage
- **D:** Durée Dépôt

### 7.3 Temps opératoire de Soudure

Le temps opératoire de soudure représente le temps nécessaire pour effectuer les opérations de soudure sur les composants du produit dans le système d'assemblage. Ce paramètre est crucial car il influence directement la cadence de fabrication.

à noter que le poste de travail qui est responsable de la soudure des pièces du produit est situé à la fin de la première ligne d'assemblage, et parmi tous les autres postes, celui-ci possède le temps opératoire le plus long, et ce qui peut poser des problèmes de flux de produit, non seulement dans la ligne d'assemblage Front Face, mais aussi dans tout le système d'assemblage. Car comme déjà expliqué, les deux premières lignes d'assemblage s'exécutent en parallèle, et donc la dernière ligne va suivre la cadence minimale d'une de ces deux premières lignes.

Une durée de soudure trop longue peut réduire le débit de production et créer des goulets d'étranglement. Ajuster ce paramètre permet de trouver un temps opératoire optimal qui peut augmenter le flux de produit, ce qui est essentiel pour maximiser l'efficacité et la productivité du système.

Table 3.6: Paramètres du temps opératoire de soudure

<b>Scénario</b>	<b>Temps de soudure (secondes)</b>
Scénario 1 (par défaut)	30
Scénario 2	20
Scénario 3	10

En conclusion, ces paramètres sont essentiels pour comprendre les performances du système d'assemblage sous différentes conditions. Leur ajustement permet de tester diverses approches pour maximiser la productivité, améliorer la qualité des produits et gérer efficacement les stocks et les ressources. Ces paramétrages facilitent l'identification des meilleures configurations pour répondre aux besoins spécifiques du processus de production.

## 8 Indicateurs de performance proposés

Dans cette section, nous identifions et décrivons les indicateurs de performance clés (KPI) utilisés pour évaluer et améliorer le système d'assemblage étudié. Ces indicateurs permettent de suivre l'efficacité, la qualité et la productivité du système, en fournissant des informations précieuses pour l'optimisation des processus. Les indicateurs sélectionnés incluent le taux d'utilisation des ressources, le nombre de produits défectueux, le nombre de produits finis, l'évolution du nombre de palettes occupées ou libres, et l'évolution du nombre de produits semi-finis auprès de la ligne d'assemblage final.

## 8.1 Taux d'utilisation de chaque ressource

Le taux d'utilisation des ressources mesure le pourcentage de temps pendant lequel une ressource (robot ou opérateur) est effectivement utilisée pour les activités dédiés. Ce KPI est très important pour l'identification des goulets d'étranglement, équilibrage des charges de travail et pour l'amélioration de l'efficacité globale du système. Il est calculé comme le ratio du temps d'activité productif sur le temps total disponible (temps de simulation) pour la ressource.

$$\text{Taux d'utilisation} = \frac{\text{Temps d'activité productif}}{\text{Temps total disponible}} \times 100$$

L'utilité du taux d'utilisation est très grandes, et elle nécessite une analyse critique de chaque situation, car l'interprétation des résultats de ce KPI n'est pas la même pour chaque ressources, il est essentiel de prendre en considération les éventuelle circonstance et condition de chaque ligne d'assemblage, un taux d'utilisation élevé peut indiquer une ressource bien exploitée, ou bien il indique que cette ressource pose un goulot d'étranglement si on constate que le taux de la ressource suivante est faible. Tandis qu'un taux bas peut suggérer une sous-utilisation ou des inefficacités potentielles, nécessitant des ajustements pour une meilleure répartition des tâches ou une augmentation de la capacité.

## 8.2 Nombre de produits défectueux

Le nombre de produits défectueux est un KPI crucial pour évaluer la qualité du système d'assemblage. Il indique le nombre de produits qui ne respectent pas les spécifications de qualité requises et qui sont donc rejetés ou nécessitent des retouches. Ce KPI est mesuré en comptabilisant le nombre de produits défectueux sur une période donnée.

$$\text{Nombre de produits défectueux} = \sum_{\text{période}} \text{Produits non conformes}$$

Un nombre élevé de produits défectueux peut signaler des problèmes dans le processus de production, tels que des erreurs de manutention ou des défaillances dans les machines, nécessitant une analyse approfondie pour améliorer les processus et réduire les coûts associés à la non-conformité.

## 8.3 Nombre de produits finis

Le nombre de produits finis est un KPI direct de la productivité du système d'assemblage. Il indique combien de produits conformes ont été produits, Ce KPI est simplement le total des produits complets fabriqués dans une période donnée et dans chaque ligne d'assemblage.

$$\text{Nombre de produits finis} = \sum_{\text{période}} \text{Produits finis}$$

ce KPI est primordiale pour chaque analyse et évaluation d'un système de production, ou une configuration en particulier, il permet d'avoir une vue globale sur l'efficacité chaque ligne, en connaissant le nombre de produit finis dans une certaine limite de temps.

## 8.4 Évolution du nombre de palettes occupées/libres

L'évolution du nombre de palettes occupées ou libres indique la dynamique de l'utilisation des convoyeurs de chaque ligne d'assemblage dans le système. Les résultats de ce KPI peuvent être

calculé en comptant le nombre de palettes occupées et libres à différents moments de simulation,



cela est réalisé par des capteur d'objets placés sur le début et la fin de chaque convoyeur. tel que, a chaque fois une palette passe par le capteur situé au début, le compteur de palette occupé s'augmente, tandis que les compteur des palettes libres baisse. de la même façon

$$\text{Nombre de palettes occupées} = \sum_{\text{période}} \text{Palettes en usage}$$

$$\text{Nombre de palettes libres} = \sum_{\text{période}} \text{Palettes non utilisées}$$

Une bonne gestion des palettes peut réduire les délais de production et éviter les goulets d'étranglement dans la chaîne de montage. Des variations dans le nombre de palettes occupées peuvent signaler des problèmes de flux de production ou de coordination entre les différentes étapes du processus.

## 8.5 Évolution du nombre de produits semi-finis auprès de la ligne d'assemblage final

Ce KPI suit le nombre de produits semi-finis, c'est-à-dire ceux qui ont passé certaines étapes d'assemblage mais ne sont pas encore totalement complétés, au niveau de la ligne d'assemblage final. Il fournit des informations sur l'accumulation et le flux des produits à travers les différentes étapes du processus.

Ce KPI est mesuré en comptabilisant les produits semi-finis au point d'entrée de la ligne d'assemblage final.

$$\text{Nombre de produits semi-finis} = \sum_{\text{période}} \text{Produits encours dans les stocks de la ligne final}$$

Suivre ce KPI permet de détecter les déséquilibres entre les lignes d'assemblage, les retards, et les points de blocage, et de s'assurer que les produits progressent efficacement vers l'achèvement. Une gestion optimale des produits semi-finis aide à maintenir la fluidité du processus et à minimiser les temps d'attente.

## 9 Conclusion

Ce chapitre présente une description approfondie du système d'assemblage reconfigurable LivingPackets réalisé comme un cas d'étude dans le cadre du projet RODIC, en soulignant ses aspects modulaires. Ensuite, le chapitre décrit en détail les produits et le système étudié, y compris les lignes d'assemblage Front Face, Body, et Final. Les différentes configurations de ressources de manutention (robots, un opérateur, ou deux opérateurs) sont explorées, montrant les 27 combinaisons possibles. Les paramètres critiques comme le temps opératoire et le nombre de palettes sont discutés pour leur rôle dans l'optimisation des performances du système. Finalement, une série d'indicateurs de performance clés est proposée pour évaluer l'efficacité des configurations, afin d'offrir de résultats sur l'utilisation des ressources, la qualité de la production, et la gestion des flux de travail.

# Chapter 4

## Résultats et discussion

Dans ce chapitre, nous présentons et analysons les résultats des simulations effectuées pour les différentes configurations du système d'assemblage. Nous avons examiné trois configurations principales : la configuration entièrement robotisée, la configuration avec un opérateur et la configuration avec deux opérateurs. Chaque configuration a été évaluée selon divers paramètres, tels que le nombre de palettes, le temps opératoire de soudage, et le temps opératoire du premier robot.

Pour chaque paramètre, nous avons mesuré plusieurs indicateurs de performance clés :

- **Nombre de produits finis** : Indique la productivité du système sous différentes conditions.
- **Nombre de produits défectueux** : Évalue la qualité de la production en fonction des configurations et paramètres.
- **Taux d'utilisation des ressources** : Analyse l'efficacité avec laquelle les ressources (robots et opérateurs) sont utilisées.
- **Nombre de palettes occupées/libres** : Suit l'occupation des palettes pour comprendre la gestion des stocks intermédiaires.
- **Nombre de produits semi-finis en attente** : Examine les goulots d'étranglement et l'efficacité du flux de production.

Cette analyse de résultats de simulation permettra de comprendre les performances relatives de chaque configuration pour chaque paramètre et d'identifier les meilleures pratiques pour optimiser le système d'assemblage étudié.

# 1 Résultats - Configuration robotisée

## 1.1 Paramètre : nombre de palettes

Nombre de produits finis

Table 4.1: nombre de produit finis pour chaque ligne

Scénario	Throughput LAFF	Throughput LAB	Throughput LAF
1 palette	56.1	123.8	55.0
2 palette	87.9	135.0	86.1
3 palette	150.7	473.8	148.8
4 palette	300.2	479.9	296.7
5 palette	439.2	1064.3	434.7
6 palette	1228.2	1423.5	1214.1
7 palette	1637.1	1643.1	1618.3
8 palette	1810.9	1894.0	1790.3
9 palette	1838.0	2004.7	1816.9
10 palette	1843.5	2005.2	1822.4
11 palette	1843.8	2005.2	1822.7
12 palette	1845.2	2005.2	1824.2

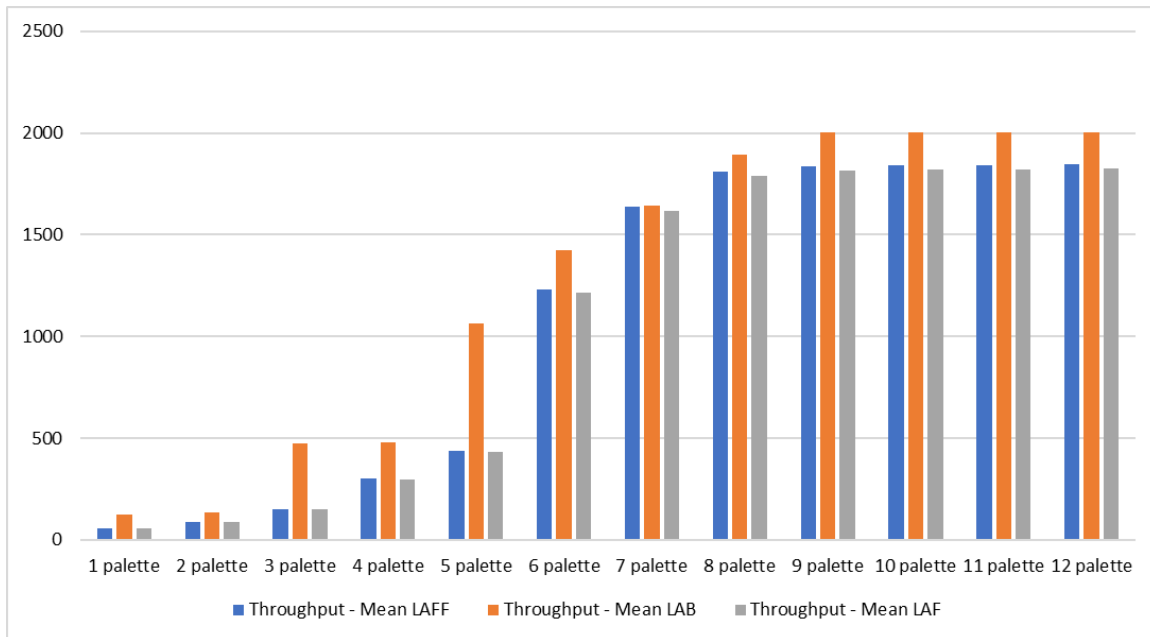


Figure 4.1: nombre de produit finis pour chaque ligne

## Nombre de produits défectueux

Table 4.2: nombre de produits défectueux dans chaque ligne - configuration robotisée

Scenario	Throughput LAFF	Throughput LAB	Throughput LAF
1 palette	0.3	1.0	0.6
2 palette	0.9	2.4	1.0
3 palette	2.4	6.1	1.5
4 palette	5.7	6.3	3.4
5 palette	7.4	14.6	3.9
6 palette	18.8	20.2	11.6
7 palette	25.9	24.0	15.6
8 palette	28.6	27.9	17.7
9 palette	28.9	29.0	18.1
10 palette	29.0	29.1	18.1
11 palette	29.0	29.1	18.2
12 palette	29.0	29.1	18.1

## Taux d'utilisation des ressources

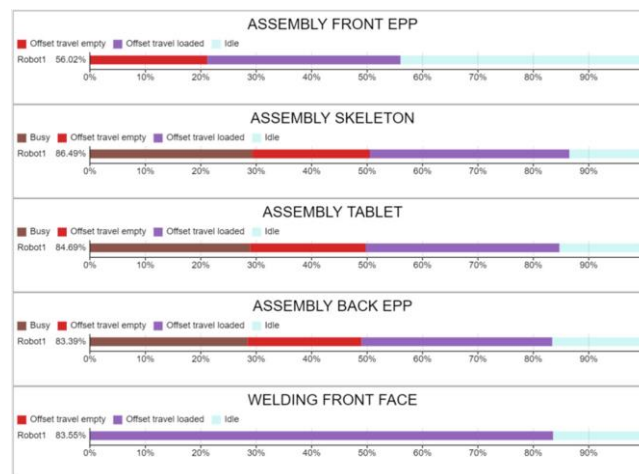


Figure 4.2: Taux d'utilisation (LAF) - configuration robotisée

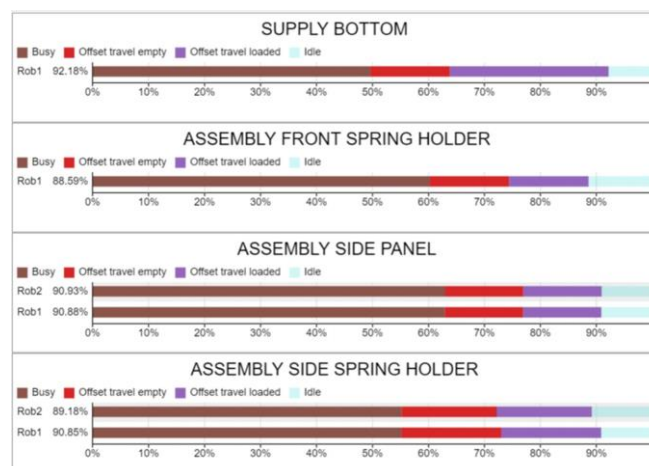


Figure 4.3: Taux d'utilisation (LAB) - configuration robotisée

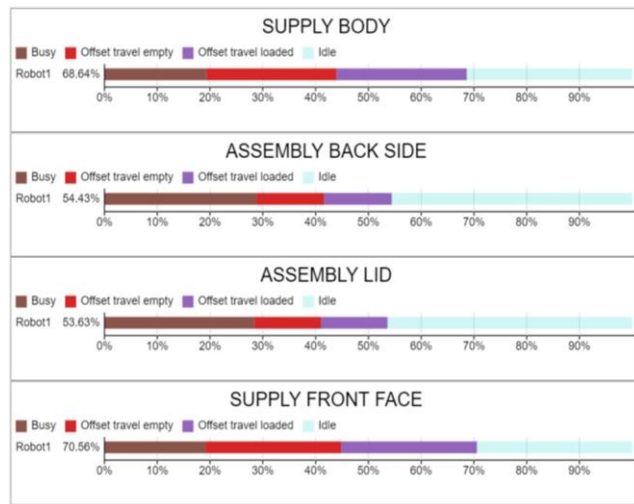


Figure 4.4: Taux d'utilisation (LAF) - configuration robotisée

### Nombre de palettes occupées/libres

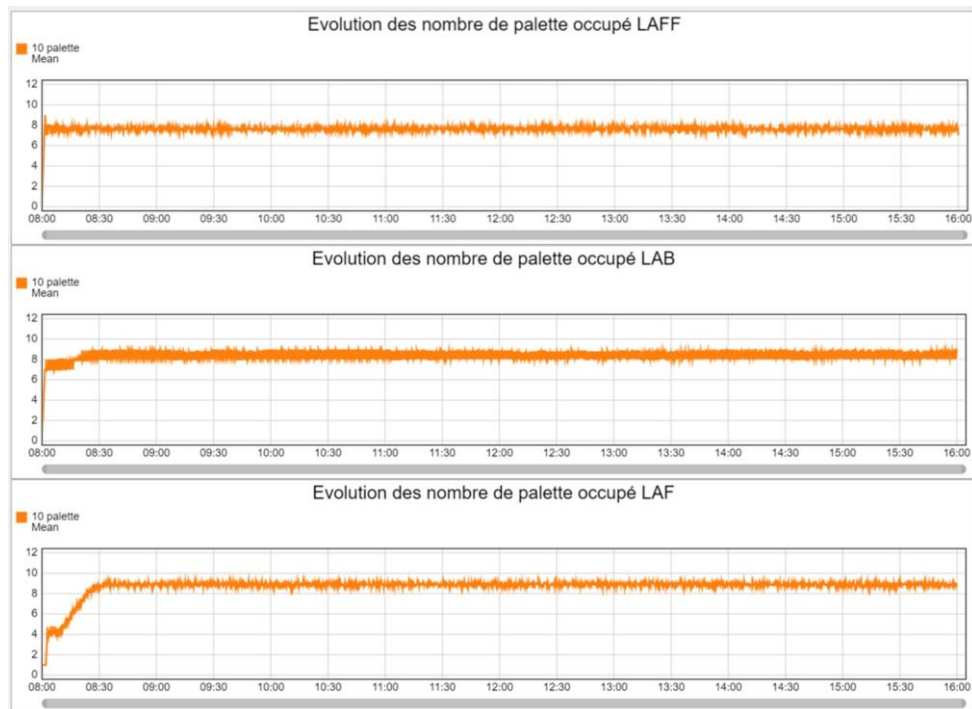


Figure 4.5: Évolution des nombre de palettes occupées - configuration robotisée

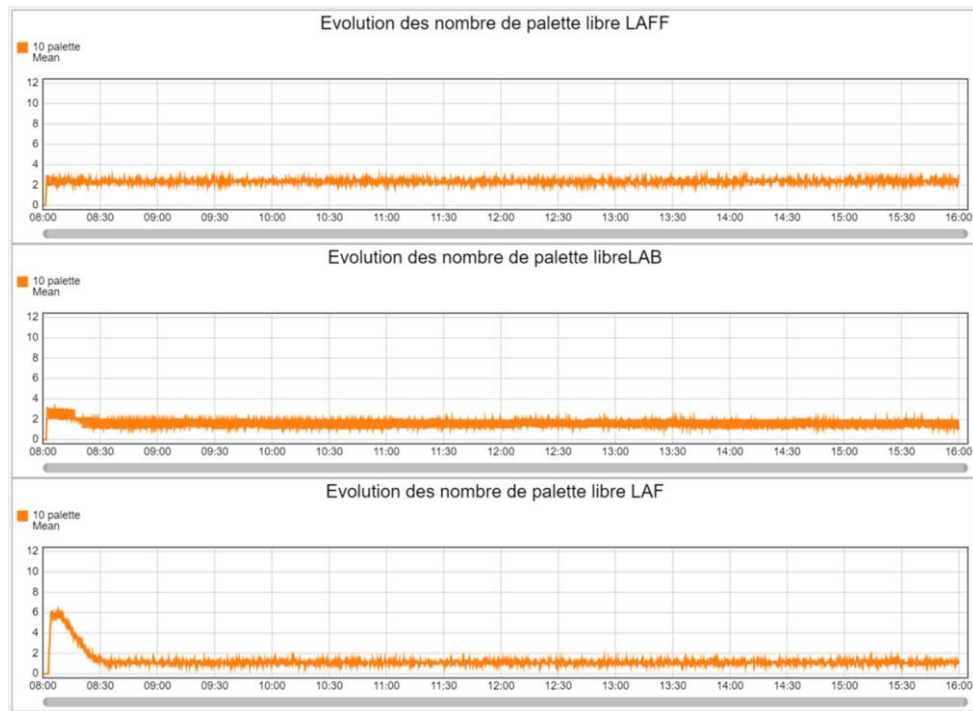


Figure 4.6: Évolution des nombre de palettes libres - configuration robotisée

### Nombre de produits semi-finis en attente

Table 4.3: valeurs statistique du nombre de produit semi finis (functional front face) - configuration robotisée

Scénario	Minimum	Maximum	Moyen
1 palette	0.0	1.5	0.31
2 palette	0.0	2.6	0.72
3 palette	0.0	3.8	0.76
4 palette	0.0	4.7	0.97
5 palette	0.0	5.0	0.81
6 palette	0.0	6.0	0.94
7 palette	0.0	5.5	0.87
8 palette	0.0	4.1	0.34
9 palette	0.0	3.9	0.32
10 palette	0.0	3.9	0.32
11 palette	0.0	3.9	0.32
12 palette	0.0	3.9	0.32

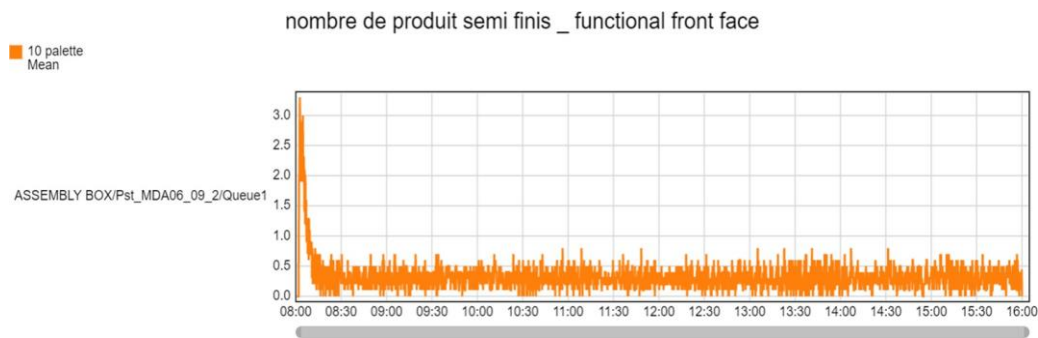


Figure 4.7: Évolution du nombre de produit semi finis (functional front face) - configuration robotisée

Table 4.4: valeurs statistiques du nombre de produit semi finis (Body) - configuration robotisée

Scénario	Minimum	Maximum	Moyen
1 palette	0.0	67.8	28.79
2 palette	0.0	47.9	23.19
3 palette	0.0	321.9	144.6
4 palette	0.0	178.3	61.89
5 palette	0.0	621.5	238.42
6 palette	0.0	194.9	65.54
7 palette	0.0	6.6	1.69
8 palette	0.0	80.2	38.05
9 palette	0.0	162.0	78.32
10 palette	0.0	155.8	74.48
11 palette	0.0	155.3	74.72
12 palette	0.0	153.8	74.12

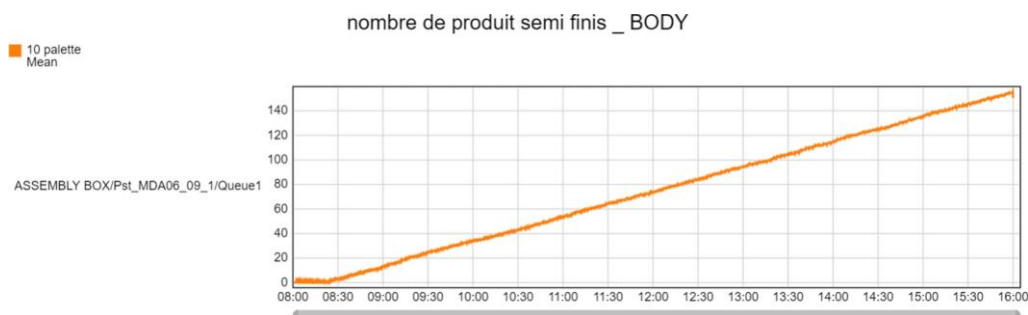


Figure 4.8: Évolution du nombre de produit semi finis (Body) - configuration robotisée

## Interpretation

D'après les résultats de simulation obtenus pour la première configuration et en fonction des variations du nombre de palettes utilisées dans chaque ligne d'assemblage, plusieurs observations peuvent être faites :

**Nombre de produits finis et défectueux :** On observe que le nombre de produits finis et défectueux augmente proportionnellement avec le nombre de palettes utilisées, jusqu'à atteindre une stabilité à partir de 10 palettes ou plus pour chaque ligne d'assemblage (LAF, LAB, LAF). Cela suggère que l'utilisation de 10 palettes est le seuil minimal pour obtenir des résultats stables.

**Taux d'utilisation des ressources :** Le taux d'utilisation des ressources de manutention dans chaque poste de ligne d'assemblage est élevé, particulièrement avec l'utilisation de 10 palettes. Cela confirme que 10 palettes permettent une utilisation maximale de l'efficacité des ressources.

**Nombre de produits semi-finis en attente :** En ce qui concerne l'efficacité globale du système, représentée par le nombre de produits semi-finis en attente sur la ligne d'assemblage final (LAF), l'évolution du nombre de produits semi-finis (fonctionnalité frontale) se stabilise à une valeur de 0,32 pièce en stock. Cependant, pour les produits semi-finis (Body), il y a une augmentation constante du nombre de produits en attente. Cela indique un problème de flux de produits dans le système, suggérant des goulets d'étranglement

## 1.2 Paramètre : temps opératoire du premier robot

### Nombre de produits finis

Table 4.5: nombre de produit finis pour chaque ligne

Scenario	Throughput LAFF	Throughput LAB	Throughput LAF
Scenario 1	1844.8	2005.2	1824
Scenario 2	1844.9	2005.3	1824
Scenario 3	867.5	766.1	758.2

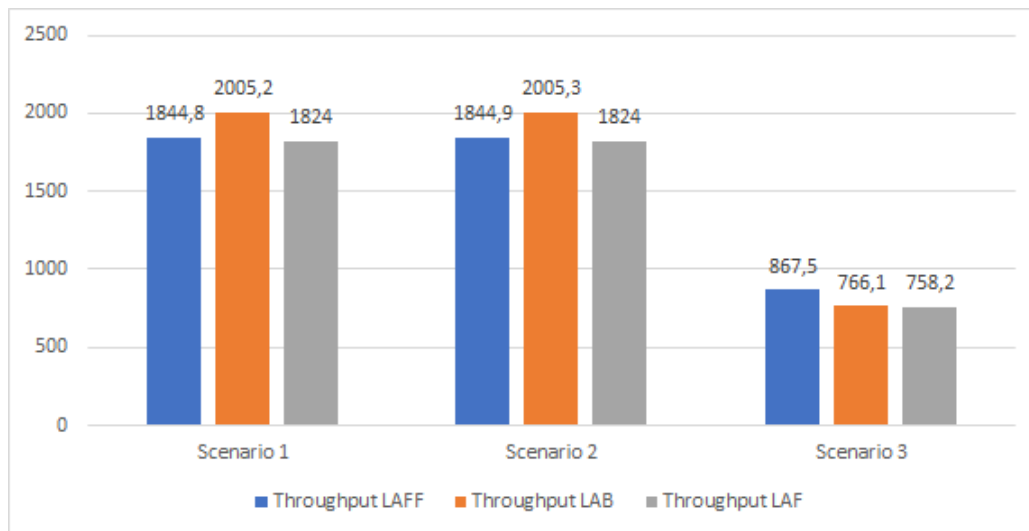


Figure 4.9: nombre de produit finis pour chaque ligne

### Nombre de produits défectueux

Table 4.6: nombre de produits défectueux dans chaque ligne

Scénario	Throughput LAFF	Throughput LAB	Throughput LAF
Scenario 1	29	29.1	18.1
Scenario 2	29	29.1	18.1
Scenario 3	14.5	9.9	6.8



## Taux d'utilisation des ressources

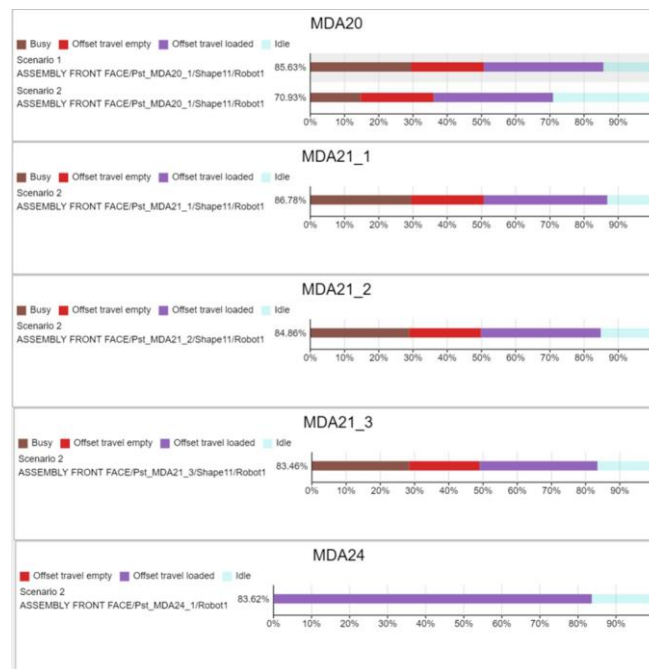


Figure 4.10: Taux d'utilisation (LAFF)

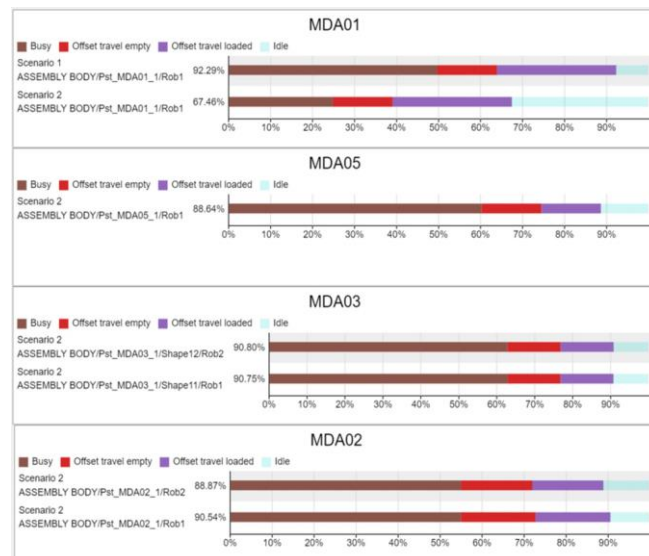


Figure 4.11: Taux d'utilisation (LAB)

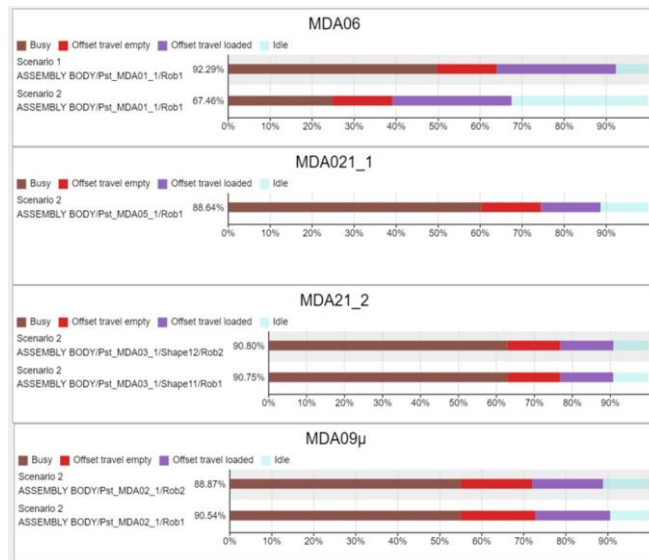


Figure 4.12: Taux d'utilisation (LAF)

## Nombre de palettes occupées/libres

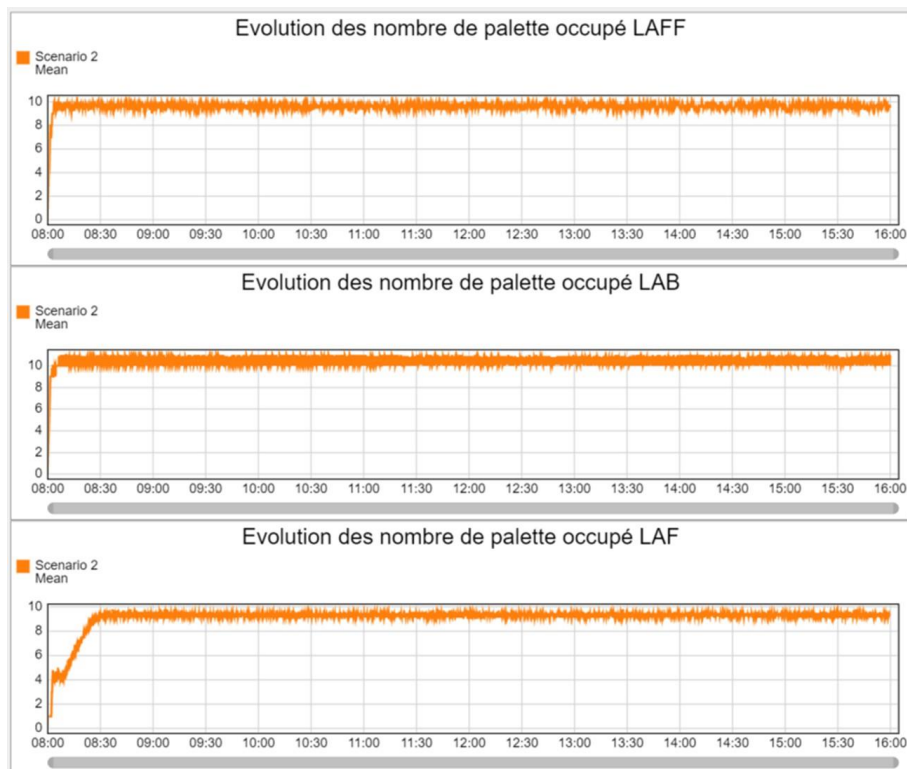


Figure 4.13: Évolution des nombre de palettes occupées

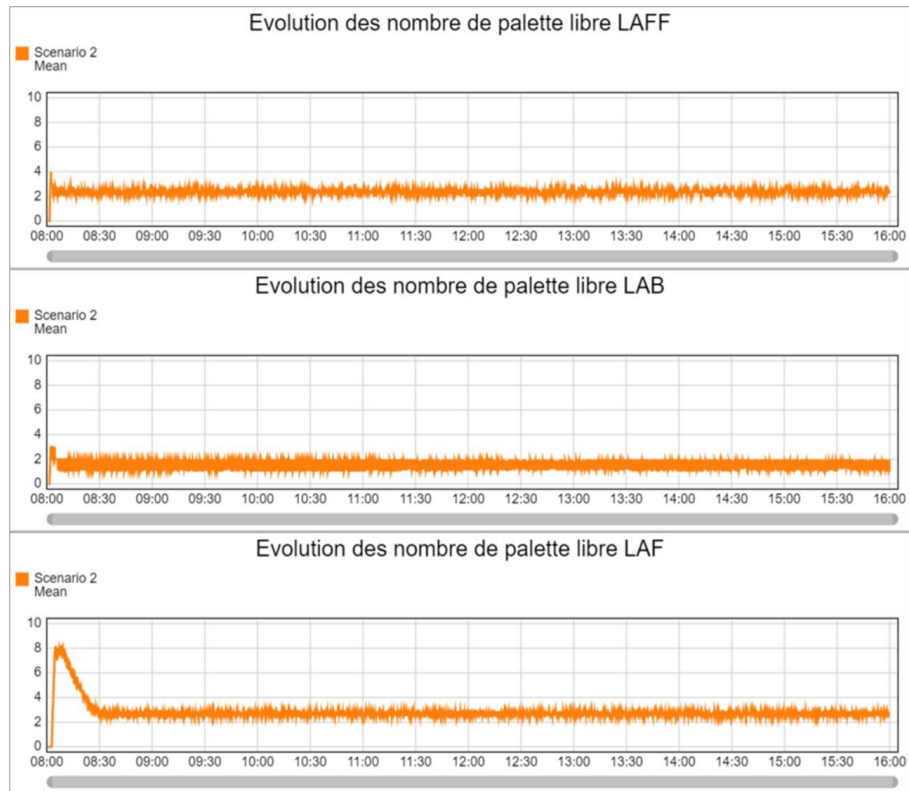


Figure 4.14: Évolution des nombre de palettes libres

### Nombre de produits semi-finis en attente

Table 4.7: valeurs statistique du nombre de produit semi finis en attente (functional front face)

<b>Scénario</b>	<b>Minimum</b>	<b>Maximum</b>	<b>Moyen</b>
Scenario 1	0	3.9	0.32
Scenario 2	0	3.3	0.32
Scenario 3	0	102.4	50.82

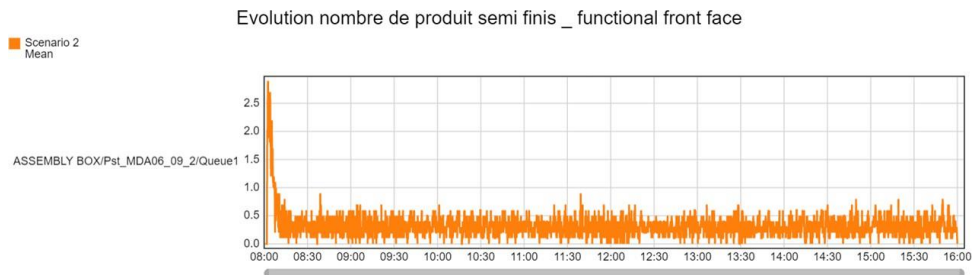


Figure 4.15: -Évolution du nombre de produit semi finis en attente (functional front face)

Table 4.8: valeurs statistiques du nombre de produit semi finis (Body) en attente

<b>Scénario</b>	<b>Minimum</b>	<b>Maximum</b>	<b>Moyen</b>
Scenario 1	0	154.1	74.41
Scenario 2	0	154.1	74.49
Scenario 3	0	2	0.11

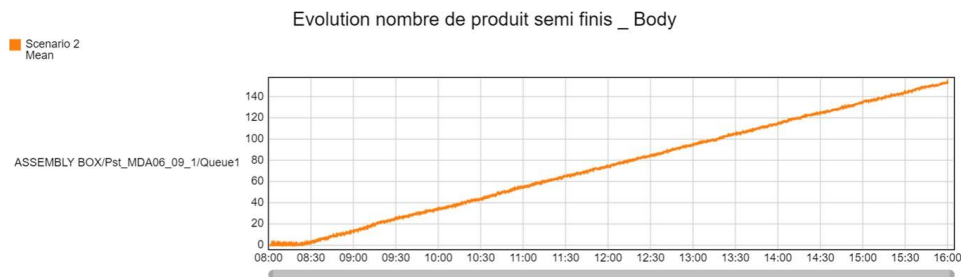


Figure 4.16: Évolution du nombre de produit semi finis (Body)

## Interprétation

D'après les résultats de simulation obtenus pour la première configuration et en fonction des variations du temps opératoire des deux premiers robots des lignes d'assemblage LAFF et LAB, plusieurs observations peuvent être faites :

**Nombre de produits finis et défectueux :** Le nombre de produits finis et défectueux reste pratiquement le même pour les deux premiers scénarios. Cela indique que la réduction du temps opératoire (du scénario 1 au scénario 2) pour ces deux postes n'a pas conduit à une amélioration des résultats. Cela signifie que ces deux postes ne créent pas de goulot d'étranglement pour cette configuration, et l'utilisation des paramètres par défaut (scénario 1) est tout à fait efficace.

**Taux d'utilisation des ressources :** Le taux d'utilisation des ressources de maintenance dans chaque poste de la ligne d'assemblage est élevé pour les deux premiers scénarios, en particulier pour le deuxième scénario. On constate que l'utilisation du robot du premier poste diminue légèrement dans le deuxième scénario, ce qui montre une réduction marginale de l'utilisation des ressources.

**Nombre de produits semi-finis en attente :** L'indicateur de produits semi-finis en attente ne change pas entre les deux scénarios. L'évolution du nombre de produits semi-finis (fonctionnalité frontale) se stabilise à une valeur de 0,32 pièce en stock. En revanche, pour les produits semi-finis (Body), il y a une augmentation constante du nombre de produits en attente, avec une moyenne de 74 pièces en stock. Cela indique un problème persistant de flux de produits dans le système, suggérant des goulots d'étranglement qui ne sont pas liés aux deux premiers robots des deux premières lignes.

Pour le scénario 3, avec des données de temps opératoire élevées, l'analyse vise à confirmer que la modification de ce paramètre peut influencer la cadence du système.

## 1.3 Paramètre : temps opératoire de soudage

### Nombre de produits finis

Table 4.9: nombre de produit finis pour chaque ligne

Scénario	Throughput LAFF	Throughput LAB	Throughput LAF
10 secondes	1948,4	2005,11	1922,67
20 secondes	1948,4	2005,11	1922,67
30 secondes	1845,2	2005,11	1825

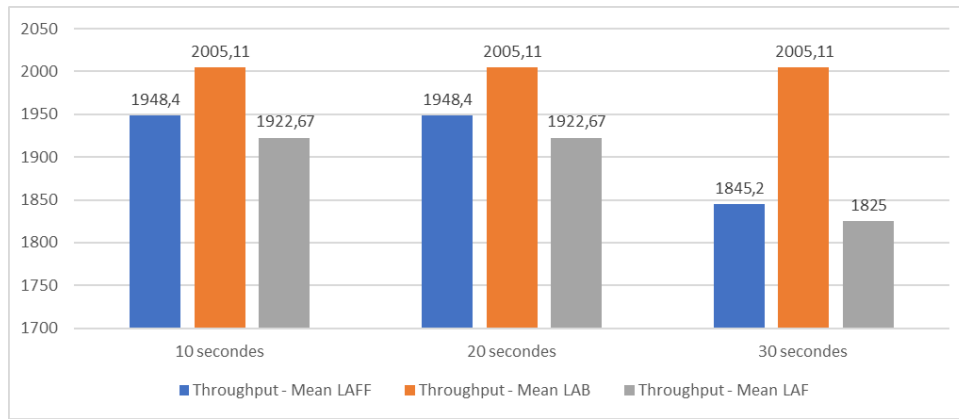


Figure 4.17: nombre de produit finis pour chaque ligne

### Nombre de produits défectueux

Table 4.10: nombre de produits défectueux dans chaque ligne

Scenario	Throughput LAFF	Throughput LAB	Throughput LAF
10 secondes	30.11	29.1	19.11
20 secondes	30.11	29.1	19.11
30 secondes	28.67	29.1	18.0

### Taux d'utilisation des ressources



Figure 4.18: Taux d'utilisation (LAFF)

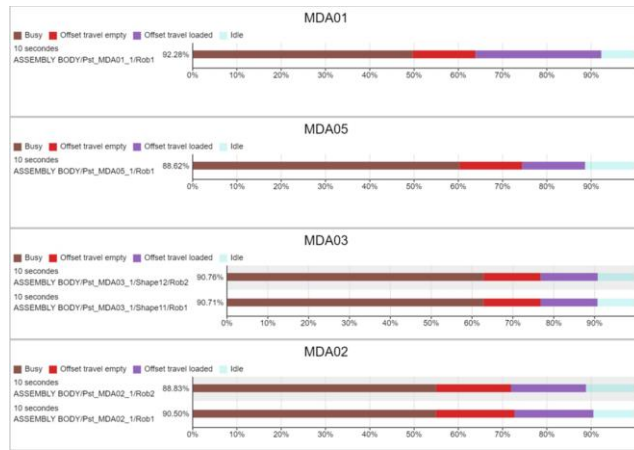


Figure 4.19: Taux d'utilisation (LAB)

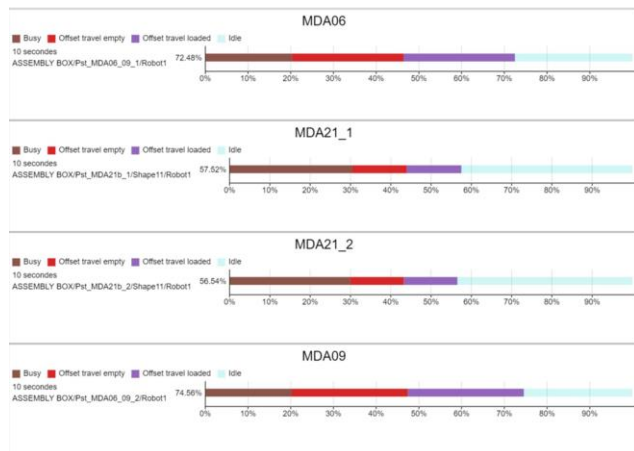


Figure 4.20: Taux d'utilisation (LAF)

## Nombre de palettes occupées/libres

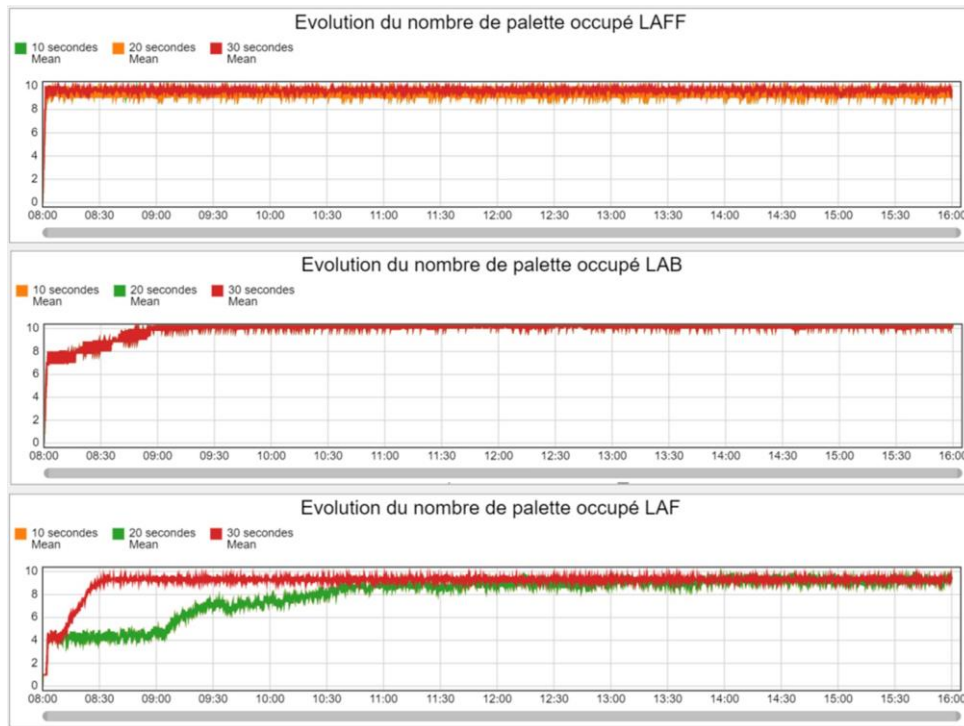


Figure 4.21: Évolution des nombre de palettes occupées

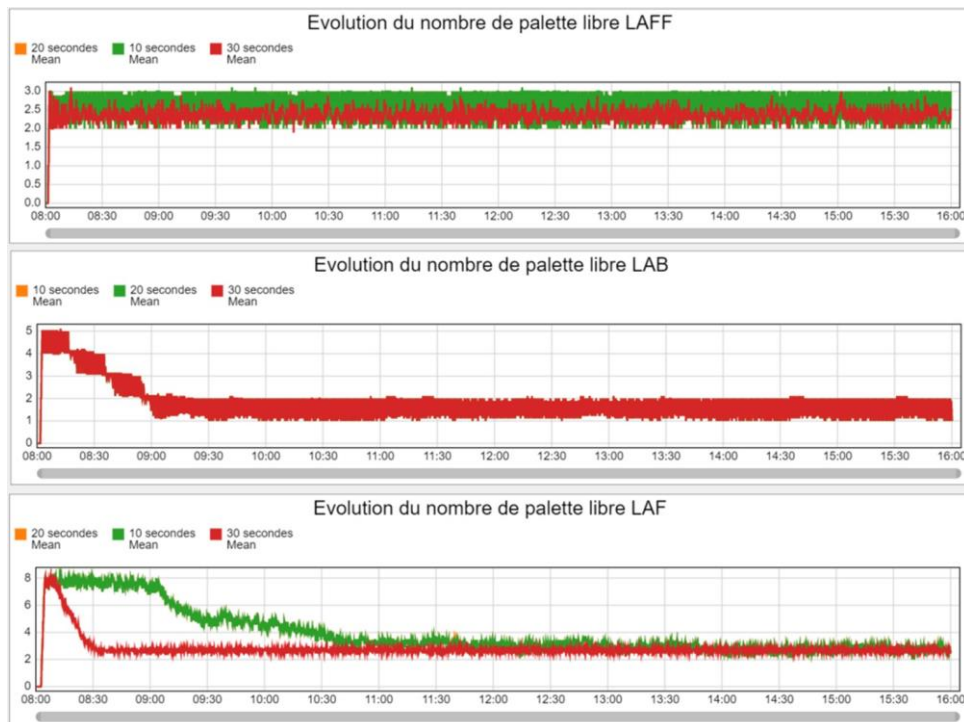


Figure 4.22: Évolution des nombre de palettes libres



## Nombre de produits semi-finis en attente

Table 4.11: Valeurs statistique du nombre de produit semi finis (functional front face)

Scenario	Minimum	Maximum	Moyen
10 secondes	0	4.78	0.62
20 secondes	0	4.78	0.62
30 secondes	0	3.89	0.32

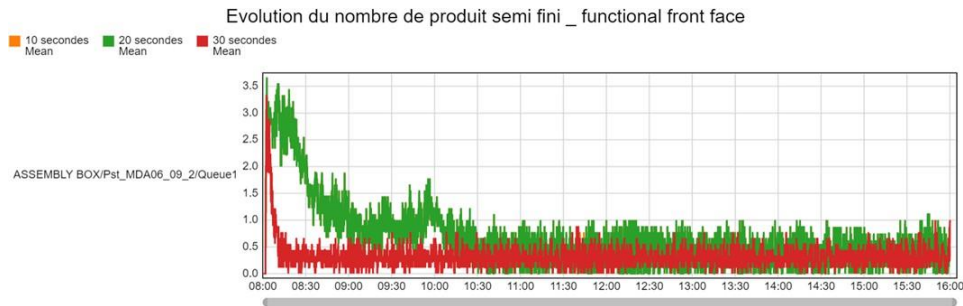


Figure 4.23: Évolution du nombre de produit semi finis (functional front face)

Table 4.12: valeurs statistique du nombre de produit semi finis (Body)

Scénario	Minimum	Maximum	Moyen
10 secondes	0	55.33	8.26
20 secondes	0	55.33	8.26
30 secondes	0	153.11	73.77

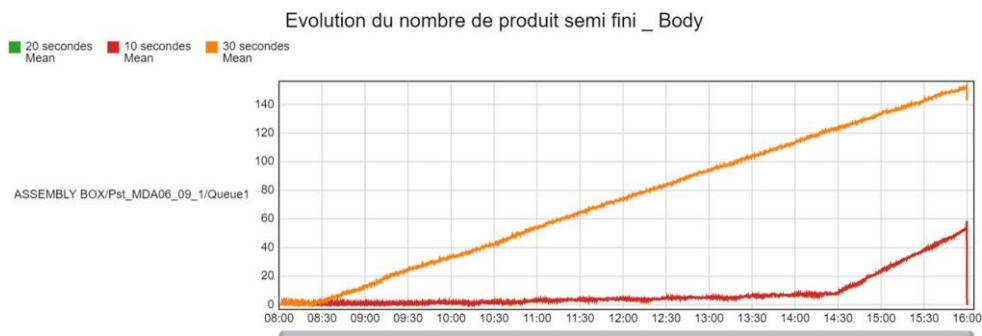


Figure 4.24: Évolution du nombre de produit semi finis (Body)

## Interprétation

D'après les résultats de simulation obtenus pour la première configuration et en fonction des variations du temps opératoire des deux premiers robots des lignes d'assemblage LAFF et LAB, plusieurs observations peuvent être faites :

**Nombre de produits finis et défectueux :** les résultats du nombre de produits finis et défectueux montre une augmentation pour le cas des 2 premier scenario (10 et 20 secondes) par rapport au au scénario par défaut du système (30 secondes), cela explique que le poste de soudage a été la source de goulot d'étranglement du système, car le nombre de produit finis (face avant fonctionnelle) a augmenter pour la ligne LAFF et par conséquent la ligne d'assemblage



final LAF qui dépend des deux première ligne, elle a aussi augmenter son nombre de produit finis Par conséquent, la diminution du temps opératoire du poste de soudage (scénario 1 et 2) est tout à fait efficace.

**Taux d'utilisation des ressources :** Le changement du temps opératoire au poste de soudage a influencé le taux d'utilisation des ressources de manutention dans la ligne d'assemblage LAFF, où ce dernier KPI a légèrement diminué par rapport au taux d'utilisation de la ligne LAB. Cela suggère que l'ajustement du temps opératoire peut améliorer l'efficacité de certaines lignes, mais pas de manière uniforme.

**Nombre de produits semi-finis en attente :** Le changement du temps opératoire de soudure a eu une influence critique sur l'efficacité globale du système. Étant donné que la ligne d'assemblage final suit la cadence des deux lignes d'assemblage LAFF et LAB, on constate que pour les scénarios 1 et 2, l'évolution du nombre de produits semi-finis (fonctionnalité frontale) en attente présente une allure différente au début de la simulation par rapport au scénario 3, mais le nombre se stabilise à une moyenne de 0,62 pièce. De même, pour l'évolution du nombre de produits semi-finis (Body), l'utilisation de temps opératoire de 10 et 20 secondes au poste de soudage permet une stabilisation des pièces en stock pour un certain temps, avant que les pièces commencent à s'accumuler. Cela indique que l'ajustement du temps opératoire de soudure peut améliorer temporairement le flux, mais qu'un goulot d'étranglement persiste à long terme.

## 2 Résultats - Configuration 1 opérateur

### 2.1 Paramètre : nombre de palettes

Nombre de produits finis

Table 4.13: Nombre de produit sortis pour chaque ligne

Scénario	Throughput LAFF	Throughput LAB	Throughput LAF
1 palette	20.7	288.5	20.5
2 palette	31.6	375.8	31.3
3 palette	123.5	619.6	122.5
4 palette	101.0	933.1	100.1
5 palette	115.5	1294.6	114.8
6 palette	906.6	1708.5	897.0
7 palette	1582.6	1907.5	1565.1
8 palette	1743.8	1942.8	1724.5
9 palette	1838.0	1950.1	1818.1
10 palette	1844.8	1951.7	1825.3
11 palette	1844.6	1952.1	1825.0
12 palette	1846.2	1952.3	1826.5

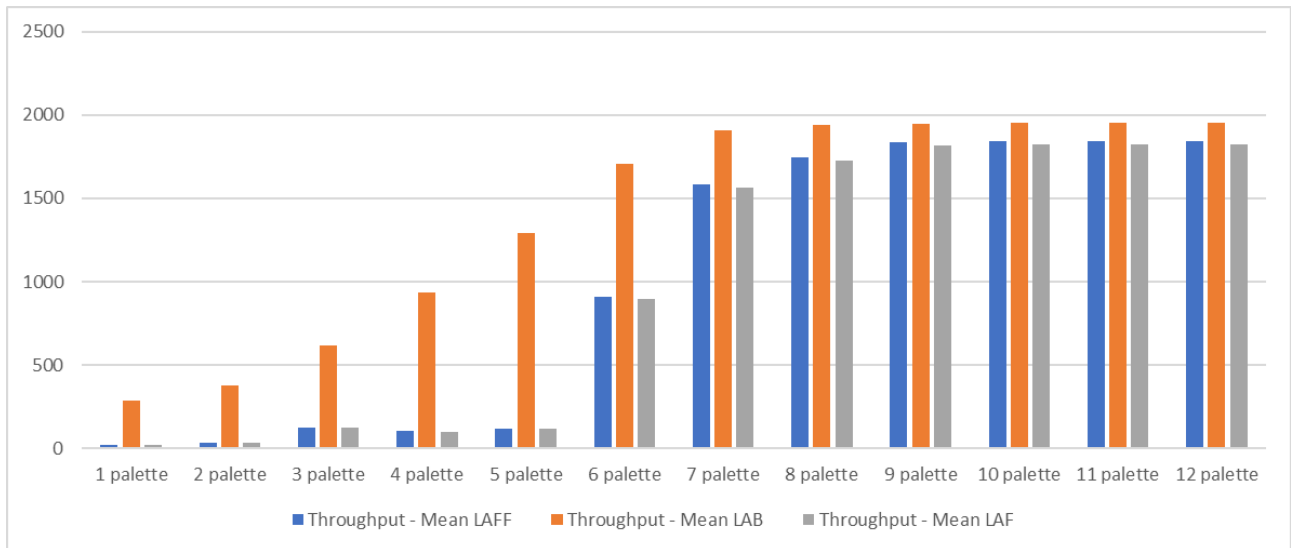


Figure 4.25: Nombre de produit sortis pour chaque ligne

### Nombre de produits défectueux

Table 4.14: Nombre de produit défectueux pour chaque ligne

Scénario	Throughput LAFF	Throughput LAB	Throughput LAF
1 palette	0.5	5.4	0.2
2 palette	0.8	6.5	0.0
3 palette	2.2	12.7	1.0
4 palette	1.8	19.0	0.9
5 palette	2.5	25.1	0.7
6 palette	14.1	32.5	8.8
7 palette	23.9	35.9	15.3
8 palette	26.3	36.8	16.7
9 palette	27.9	37.0	17.0
10 palette	28.2	37.0	17.0
11 palette	28.2	37.0	17.0
12 palette	28.1	37.0	17.0

## Taux d'utilisation des ressources

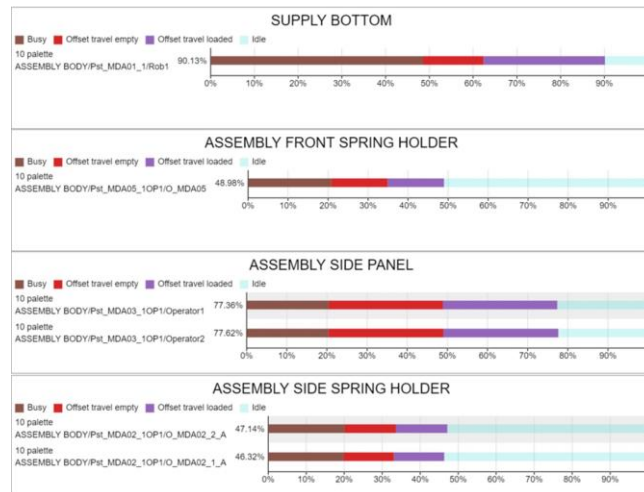


Figure 4.26: Taux d'utilisation (LAFF)

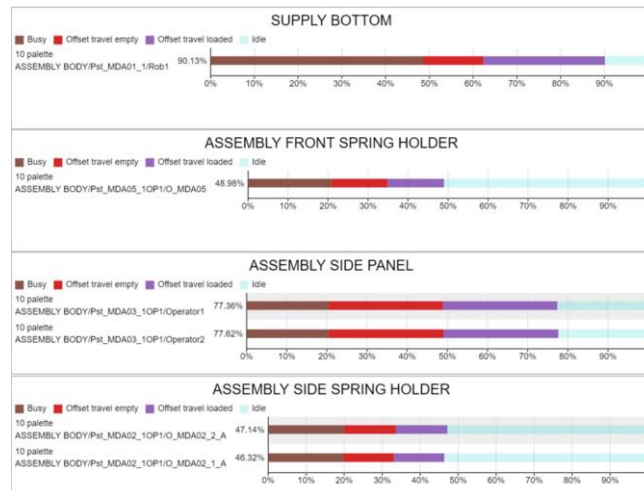


Figure 4.27: Taux d'utilisation (LAB)

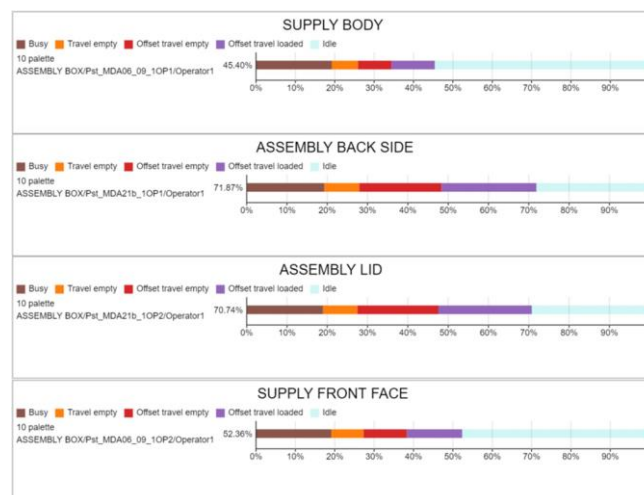


Figure 4.28: Taux d'utilisation (LAF)

## Nombre de palettes occupées/libres

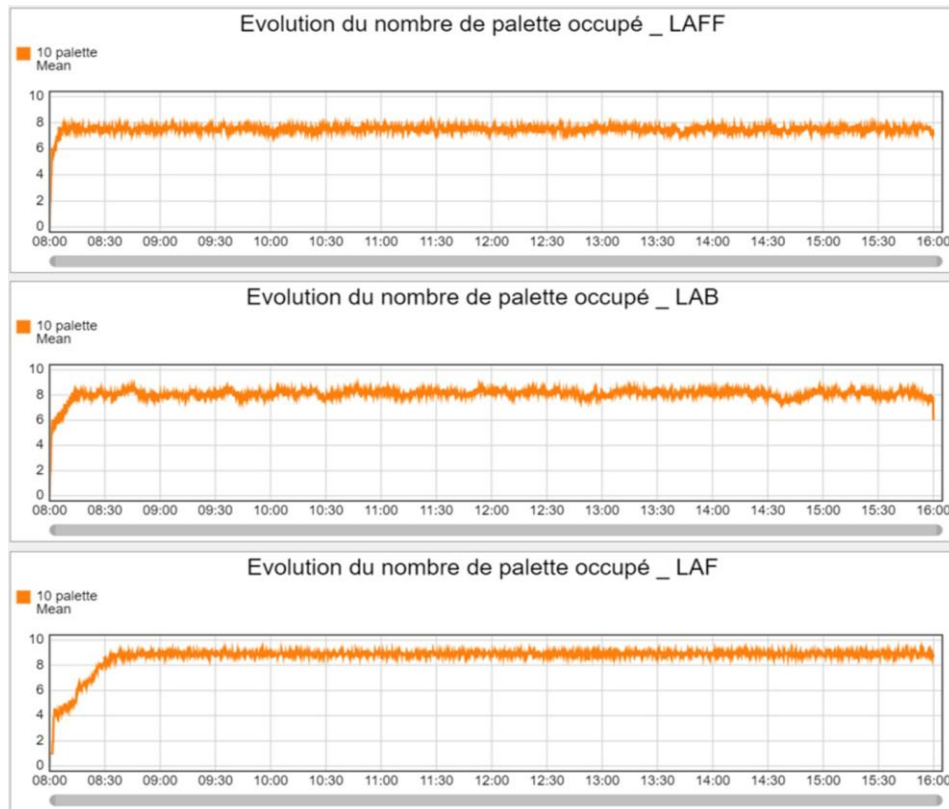


Figure 4.29: Évolution du nombre de palettes occupées

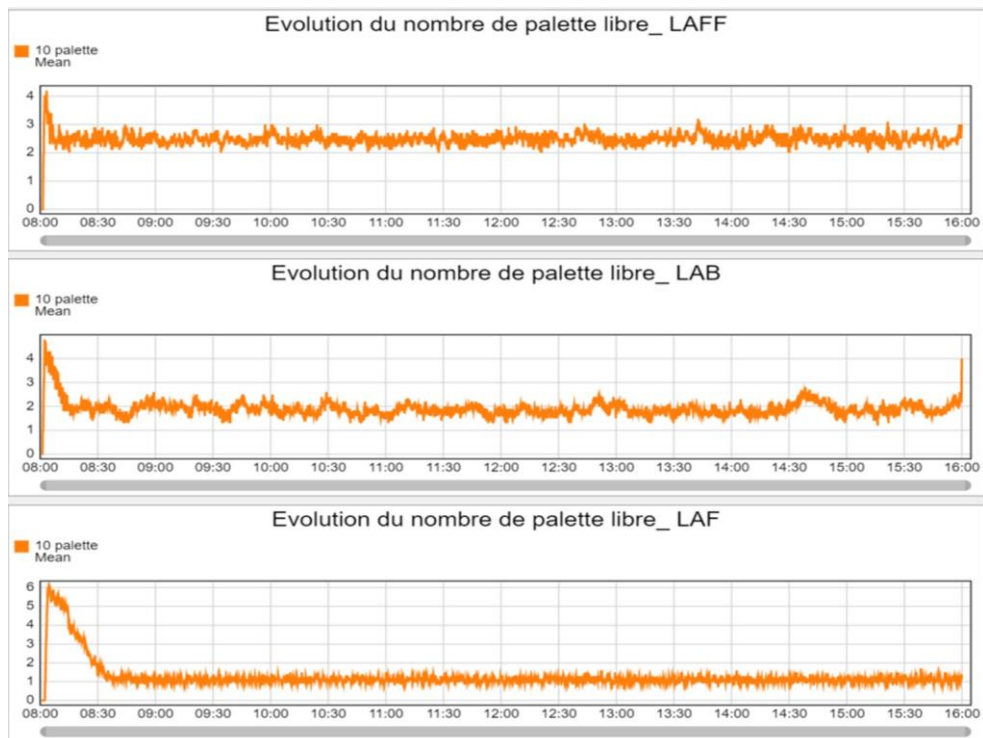


Figure 4.30: Évolution du nombre de palettes libres

## Nombre de produits semi-finis en attente

Table 4.15: valeurs statistique du nombre de produit semi finis (functional front face)

Scénario	Minimum	Maximum	Moyen
1 palette	0	1.0	0.00
2 palette	0	1.6	0.03
3 palette	0	2.0	0.04
4 palette	0	1.8	0.04
5 palette	0	2.0	0.02
6 palette	0	2.1	0.06
7 palette	0	2.1	0.11
8 palette	0	2.4	0.13
9 palette	0	2.4	0.14
10 palette	0	2.3	0.14
11 palette	0	2.3	0.14
12 palette	0	2.3	0.14

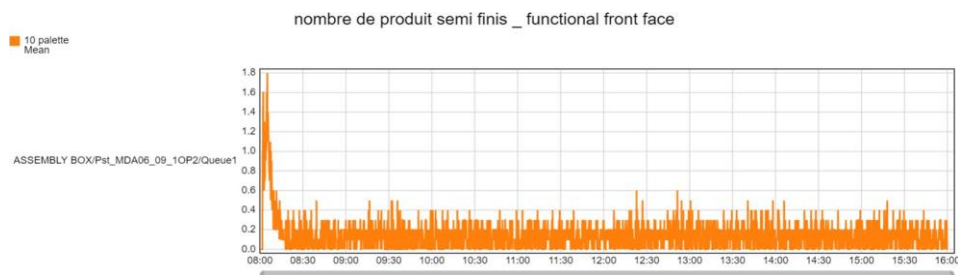


Figure 4.31: Évolution du nombre produit semi finis (functional front face)

Table 4.16: valeurs statistique du nombre de produit semi finis (functional front face)

Scénario	Minimum	Maximum	Moyen
1 palette	0	266.8	124.17
2 palette	0	342.4	167.06
3 palette	0	493.4	229.80
4 palette	0	828.2	388.92
5 palette	0	1173.7	539.96
6 palette	0	796.7	297.41
7 palette	0	320.3	123.78
8 palette	0	194.5	71.93
9 palette	0	107.0	50.58
10 palette	0	100.7	46.89
11 palette	0	101.4	46.98
12 palette	0	99.7	46.38

Table 4.17: valeurs statistique du nombre de produit semi finis (Body)

Scénario	Minimum	Maximum	Moyen
1 palette	0	266,8	124,17
2 palette	0	342,4	167,06
3 palette	0	493,4	229,8
4 palette	0	828,2	388,92
5 palette	0	1173,7	539,96
6 palette	0	796,7	297,41
7 palette	0	320,3	123,78
8 palette	0	194,5	71,93
9 palette	0	107,0	50,58
10 palette	0	100,7	46,89
11 palette	0	101,4	46,98
12 palette	0	99,7	46,38

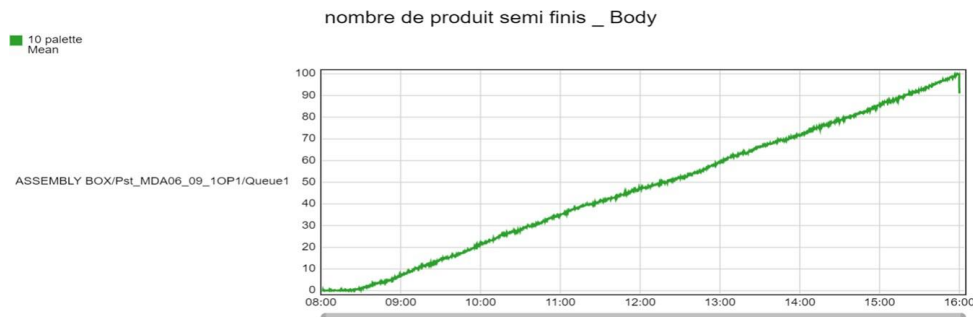


Figure 4.32: Évolution du nombre produit semi finis (Body)

## Interprétation

D'après les résultats de simulation obtenus pour la deuxième configuration et en fonction des variations du nombre de palettes utilisées dans chaque ligne d'assemblage, plusieurs observations peuvent être faites :

**Nombre de produits finis et défectueux :** À l'instar de la première configuration, qui était entièrement robotisée, on observe que le nombre de produits finis et défectueux augmente proportionnellement avec le nombre de palettes utilisées. Cette augmentation se stabilise à partir de 10 palettes ou plus pour chaque ligne d'assemblage (LAF, LAB, LAF).

**Taux d'utilisation des ressources :** Le taux d'utilisation des ressources de manutention dans chaque poste de ligne d'assemblage reste élevé, semblable à la configuration robotisée. Cela indique que le changement du nombre de palettes n'affecte pas directement l'efficacité d'utilisation des ressources de manutention.

**Nombre de produits semi-finis en attente :** L'analyse du nombre de produits semi-finis en attente sur la ligne d'assemblage finale (LAF) permet de vérifier le bon fonctionnement du système. Dans cette configuration, l'évolution du nombre de produits semi-finis (fonctionnalité frontale) se stabilise à une valeur de 0,14 pièce en stock, légèrement inférieure à celle de la configuration robotisée (0,32). Toutefois, pour les produits semi-finis (Body), une augmentation constante du nombre de produits en attente est observée, ce qui indique un problème persistant de flux de produits dans le système et suggère la présence d'un goulot d'étranglement.

## 2.2 Paramètre : temps opératoire du premier robot

### Nombre de produits finis

Table 4.18: Nombre de produit finis pour chaque ligne

Scénario	Throughput LAFF	Throughput LAB	Throughput LAF
Scenario 1	1844,8	1951,7	1825,3
Scenario 2	1845,8	1952,9	1825,7
Scenario 3	783,5	762,1	679,4

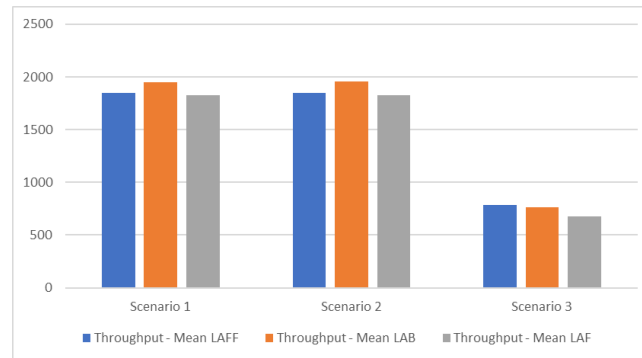


Figure 4.33: Nombre de produit finis pour chaque ligne

### Nombre de produits défectueux

Table 4.19: Nombre de produit défectueux pour chaque ligne

Scénario	Throughput LAFF	Throughput LAB	Throughput LAF
Scenario 1	28,2	37	17
Scenario 2	28,2	37	17,1
Scenario 3	11,8	14,8	6,5

## Taux d'utilisation des ressources

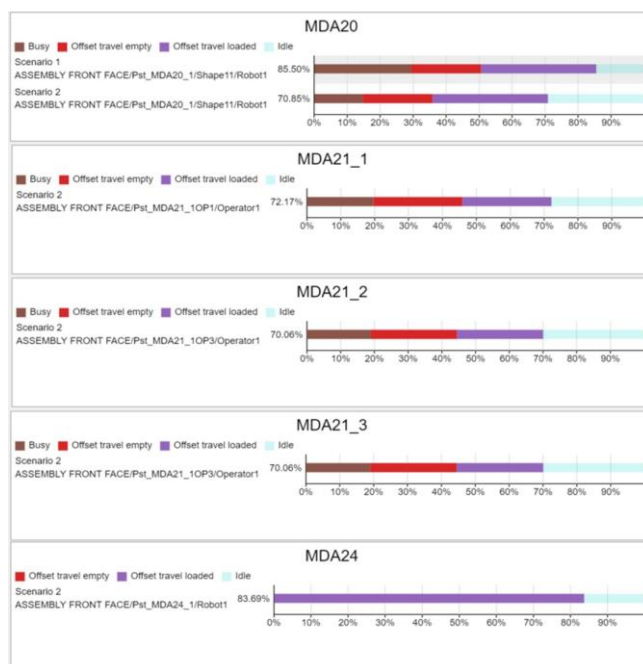


Figure 4.34: Taux d'utilisation (LAFF)

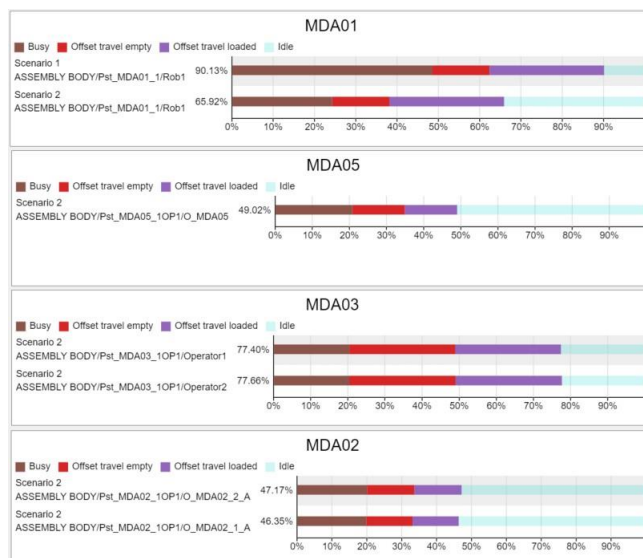


Figure 4.35: Taux d'utilisation (LAB)



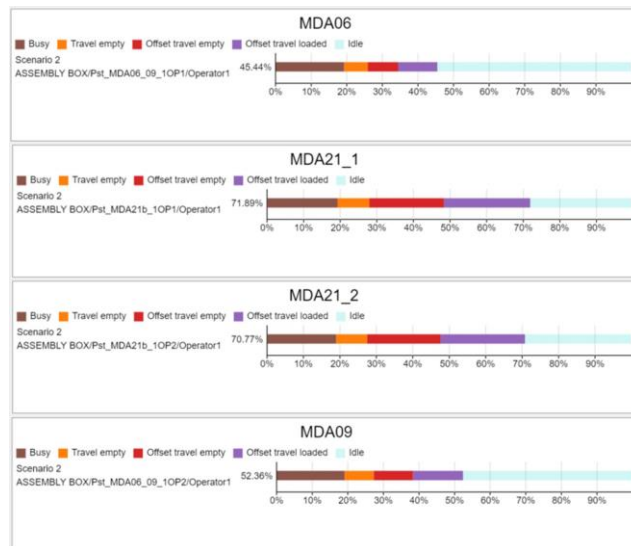


Figure 4.36: Taux d'utilisation (LAF)

### Nombre de palettes occupées/libres

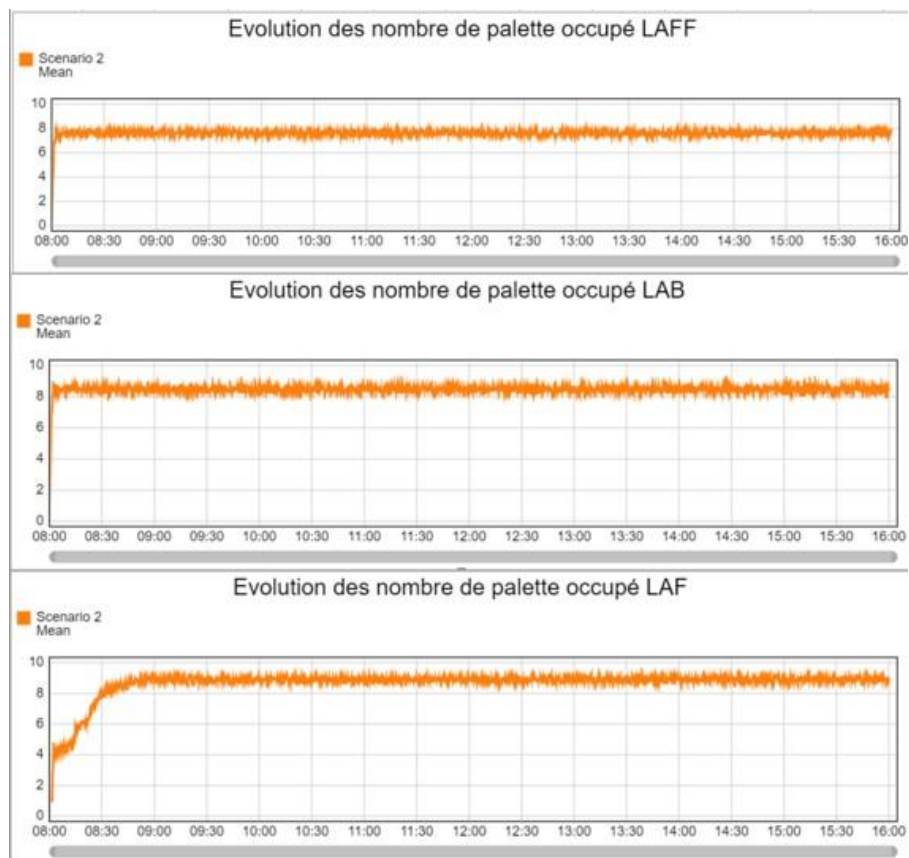


Figure 4.37: Évolution du nombre de palette occupées

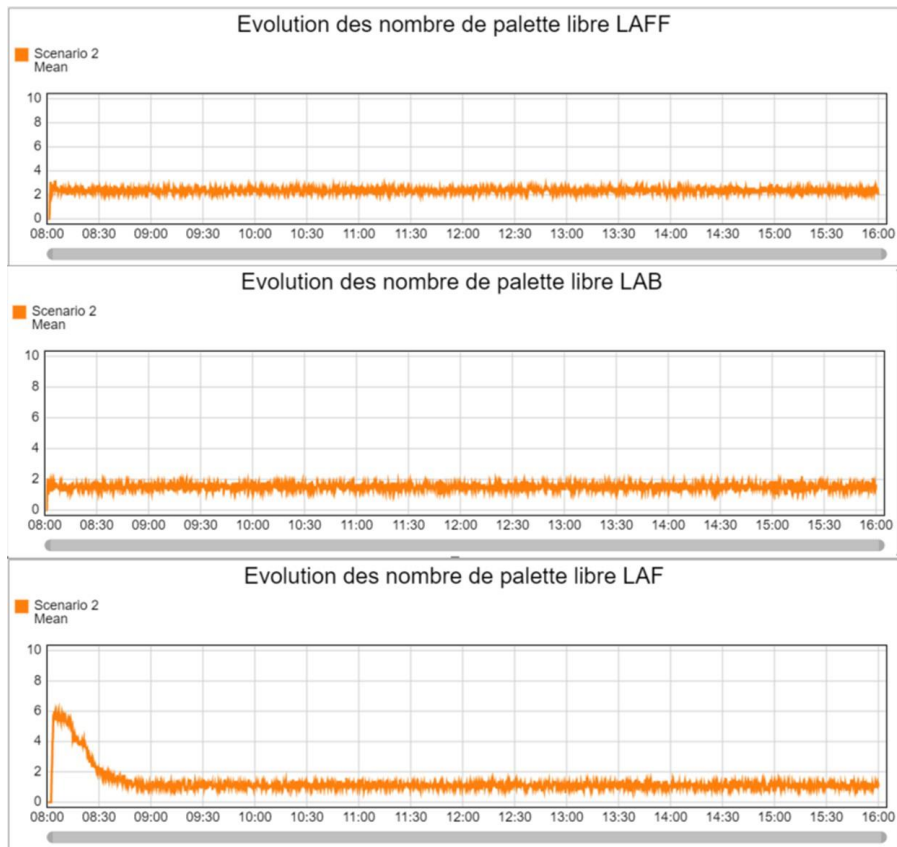


Figure 4.38: Évolution du nombre de palettes libres

### Nombre de produits semi-finis en attente

Table 4.20: valeurs statistique du nombre de produit semi finis (functional front face)

Scenario	Minimum - Mean	Maximum - Mean	Average - Mean
Scenario 1	0	2,3	0,14
Scenario 2	0	2,4	0,14
Scenario 3	0	97,5	47,66

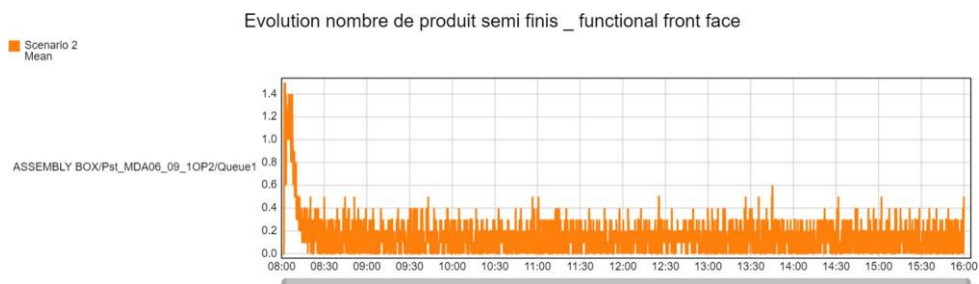


Figure 4.39: Évolution nombre de produit semi finis functional front face

Table 4.21: valeurs statistique du nombre de produit semi finis (Body)

Scenario	Minimum	Maximum	Moyen
Scenario 1	0	100,7	46,89
Scenario 2	0	100,8	46,37
Scenario 3	0	75,4	35,6



Figure 4.40: Évolution du nombre de produit semi fini

## Interprétation

D'après les résultats de simulation obtenus pour la deuxième configuration et en fonction des variations du temps opératoire des deux premiers robots des lignes d'assemblage LAFF et LAB, plusieurs observations peuvent être faites :

**Nombre de produits finis et défectueux :** Le nombre de produits finis et défectueux diffère légèrement entre les deux premiers scénarios. Cela indique que la réduction du temps opératoire (du scénario 1 au scénario 2) pour ces deux postes dans cette configuration à 1 opérateur n'a conduit qu'à une amélioration minimale des résultats, qui est négligeable car très faible. Cela signifie que ces deux postes ne créent pas de goulot d'étranglement pour cette configuration, et l'utilisation des paramètres par défaut (scénario 1) est efficace.

**Taux d'utilisation des ressources :** Le taux d'utilisation des ressources de manutention dans chaque poste de la ligne d'assemblage est élevé pour les deux premiers scénarios, similaire à la première configuration (robotisée). En particulier pour le deuxième scénario, on constate que l'utilisation du robot du premier poste diminue légèrement, montrant une réduction marginale de l'utilisation des ressources.

**Nombre de produits semi-finis en attente :** L'indicateur de produits semi-finis en attente ne change pas entre les deux scénarios. L'évolution du nombre de produits semi-finis (fonctionnalité frontale) se stabilise à une valeur de 0,14 pièce en stock. En revanche, pour les produits semi-finis (Body), il y a une augmentation constante du nombre de produits en attente, avec une moyenne de 46 pièces en stock. Cela indique un problème persistant de flux de produits dans le système, suggérant des goulots d'étranglement qui ne sont pas liés aux deux premiers robots des deux premières lignes.

Pour le scénario 3, avec des temps opératoires plus élevés, l'analyse vise à confirmer que la modification de ce paramètre peut influencer la cadence du système.

## 2.3 Paramètre : temps opératoire de soudage

### Nombre de produits finis

Table 4.22: nombre de produit finis pour chaque ligne

Scénario	Throughput LAFF	Throughput LAB	Throughput LAF
10 secondes	2013.7	1951.6	1929.3
20 secondes	2013.7	1951.6	1929.3
30 secondes	1844.8	1951.7	1825.3

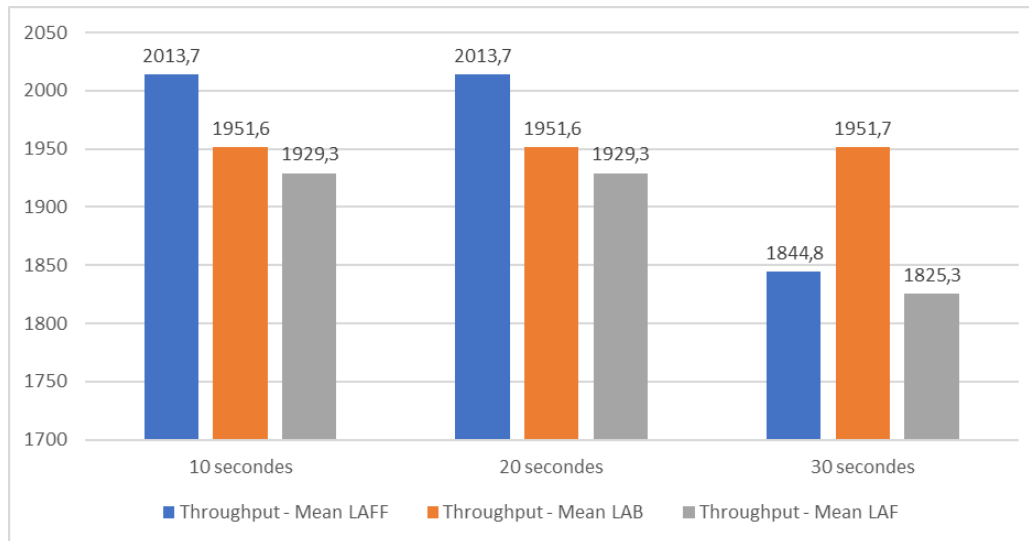


Figure 4.41: Nombre de produit finis pour chaque ligne

### Nombre de produits défectueux

Table 4.23: Nombre de produit défectueux pour chaque ligne

Scénario	Throughput LAFF	Throughput LAB	Throughput LAF
10 secondes	30,6	37	17,8
20 secondes	30,6	37	17,8
30 secondes	28,2	37	17

## Taux d'utilisation des ressources



Figure 4.42: Taux d'utilisation (LAF)

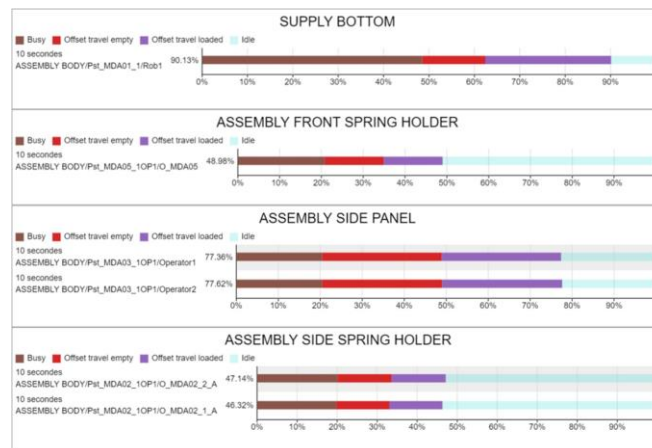


Figure 4.43: Taux d'utilisation (LAB)

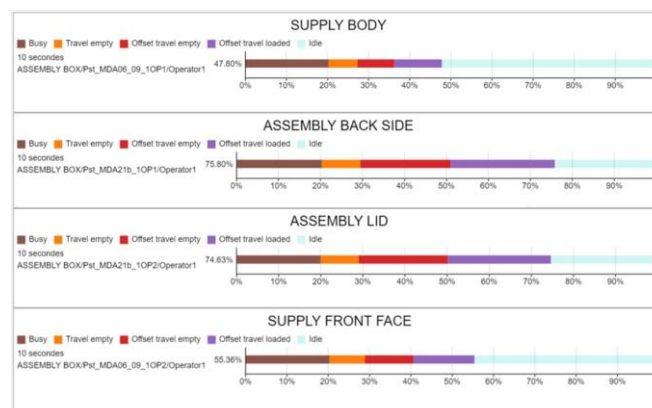


Figure 4.44: Taux d'utilisation (LAF)

## Nombre de palettes occupées/libres

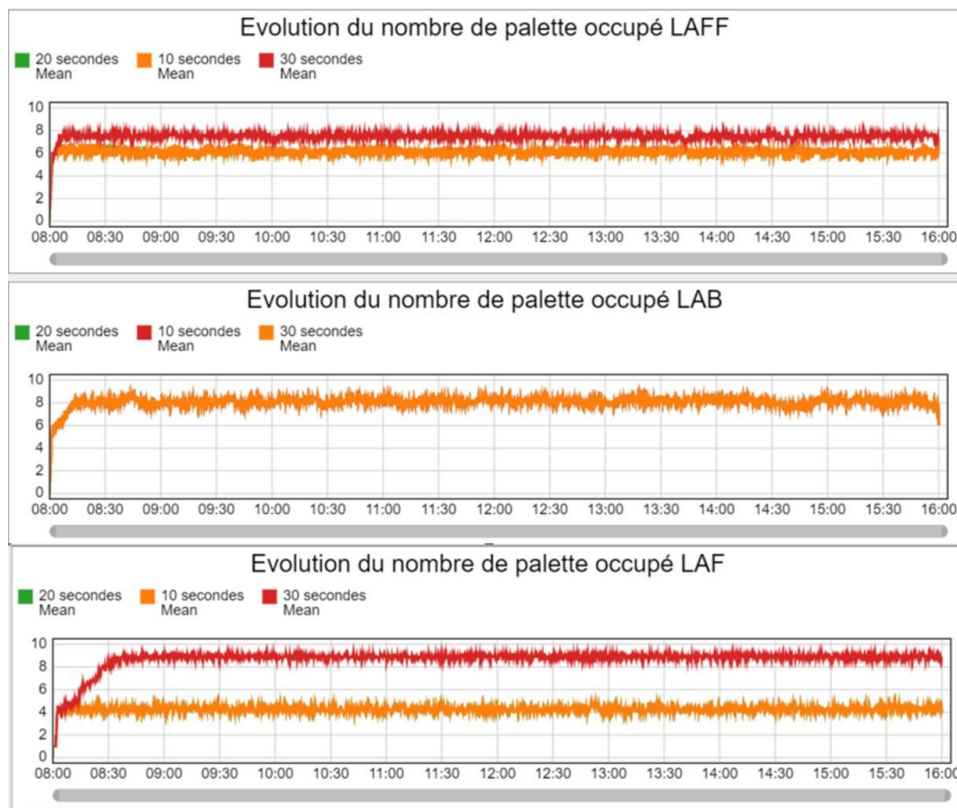


Figure 4.45: Évolution du nombre de palettes occupées

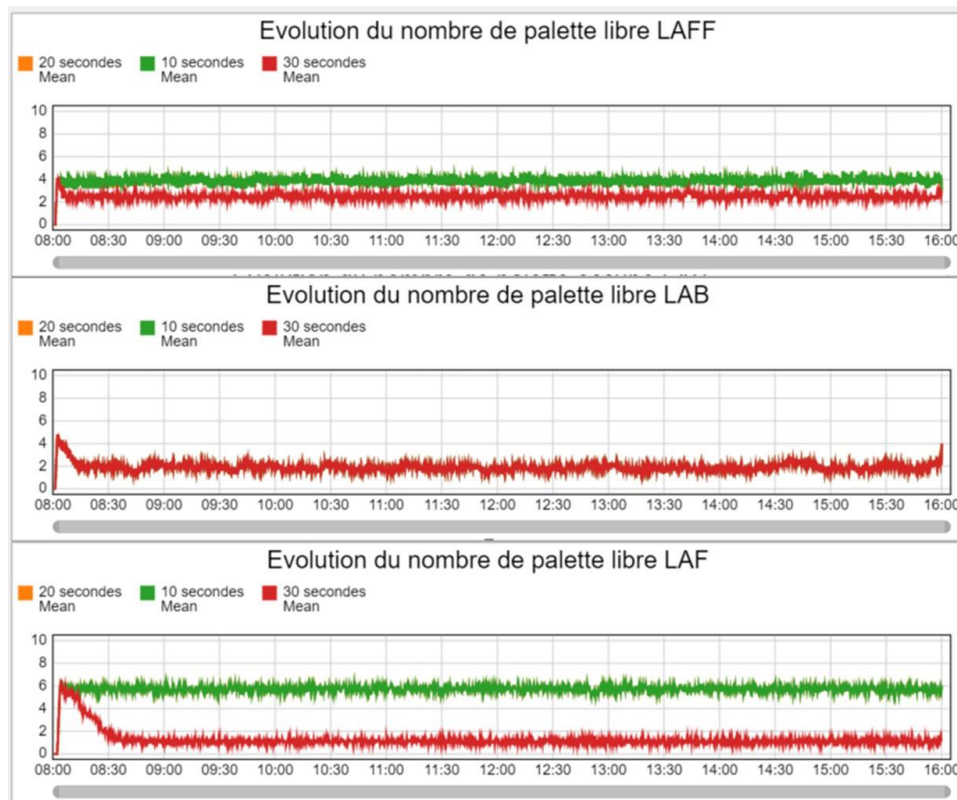


Figure 4.46: Evolution du nombre de palettes libres



## Nombre de produits semi-finis en attente

Table 4.24: valeurs statistique du nombre de produit semi finis (functional front face)

Scénario	Minimum	Maximum	Moyen
10 secondes	0	65,4	33,31
20 secondes	0	65,4	33,31
30 secondes	0	2,3	0,14

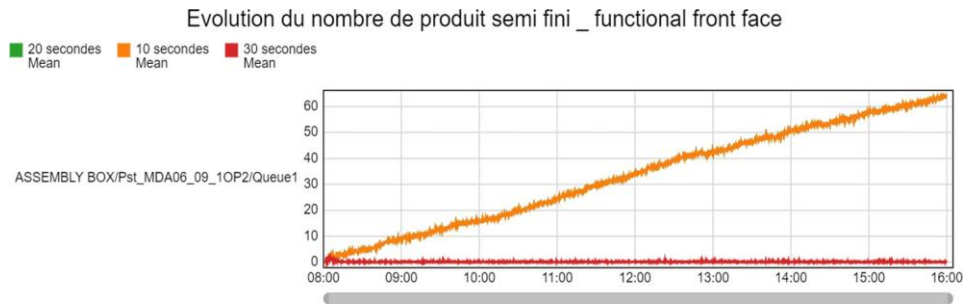


Figure 4.47: Évolution du nombre de produit semi fini (functional front face)

Table 4.25: valeurs statistique du nombre de produit semi finis (Body)

Scénario	Minimum	Maximum	Moyen
10 secondes	0	2,2	0,1
20 secondes	0	2,2	0,1
30 secondes	0	100,7	46,89



Figure 4.48: Évolution du nombre de produit semi finis (Body)

## Interprétation

D'après les résultats de simulation obtenus pour la première configuration et en fonction des variations du temps opératoire des deux premiers robots des lignes d'assemblage LAFF et LAB, plusieurs observations peuvent être faites :

**Nombre de produits finis et défectueux :** similaire à la configuration robotisé les résultats du nombre de produits finis et défectueux montre une augmentation pour le cas des 2 premiers scénarios (10 et 20 secondes) par rapport au au scénario par défaut du système (30 secondes), cela explique que le poste de soudage a été la source de goulot d'étranglement du système, et le changement de ressource de manutention n'a pas influencée le comportement et les résultats du système

**Taux d'utilisation des ressources :** pour cette configuration le changement du temps opératoire au poste de soudage a légèrement influencé le taux d'utilisation des ressources de manutention dans la ligne d'assemblage LAFF, où les résultats de ce dernier KPI ont diminué par rapport au taux d'utilisation de la ligne LAB.

**Nombre de produits semi-finis en attente :** Le changement du temps opératoire de soudure a eu une influence critique sur l'efficacité globale du système. Étant donné que la ligne d'assemblage final suit la cadence des deux lignes d'assemblage LAFF et LAB, on constate que pour les scénarios 1 et 2, l'évolution du nombre de produits semi-finis (fonctionnalité frontale) en attente présente une allure en constante augmentation par rapport au scénario 3 qui possède une stabilité de pièce en attente, cela veut dire que la cadence de la première ligne d'assemblage a augmentée le taux d'arrivée (pour le scénario 1 et 2) des pièces vers la ligne d'assemblage final. De même, pour l'évolution du nombre de produits semi-finis (Body), l'utilisation du temps opératoire de 10 et 20 secondes au poste de soudage permet une stabilisation des pièces en attente dans le stock pendant toute la durée de simulation,

### 3 Résultats - Configuration 2 opérateurs

#### 3.1 Paramètre : nombre de palettes

##### Nombre de produits finis

Table 4.26: Nombre de produit sortis pour chaque ligne

Scénario	Throughput LAFF	Throughput LAB	Throughput LAF
1 palette	165,2	151,2	75,6
2 palette	29,2	28,1	21,3
3 palette	58,2	197,7	53,1
4 palette	228,3	434,1	218,2
5 palette	885,9	961,5	823,7
6 palette	1617	1485,4	1481,9
7 palette	1791,8	1725,5	1721,3
8 palette	1821,8	1958,8	1894,3
9 palette	1822,9	2004,9	1891,2
10 palette	1823,4	2007,3	1896,9
11 palette	1820,8	2008,6	1894,1
12 palette	1818,7	2007,6	1894,7



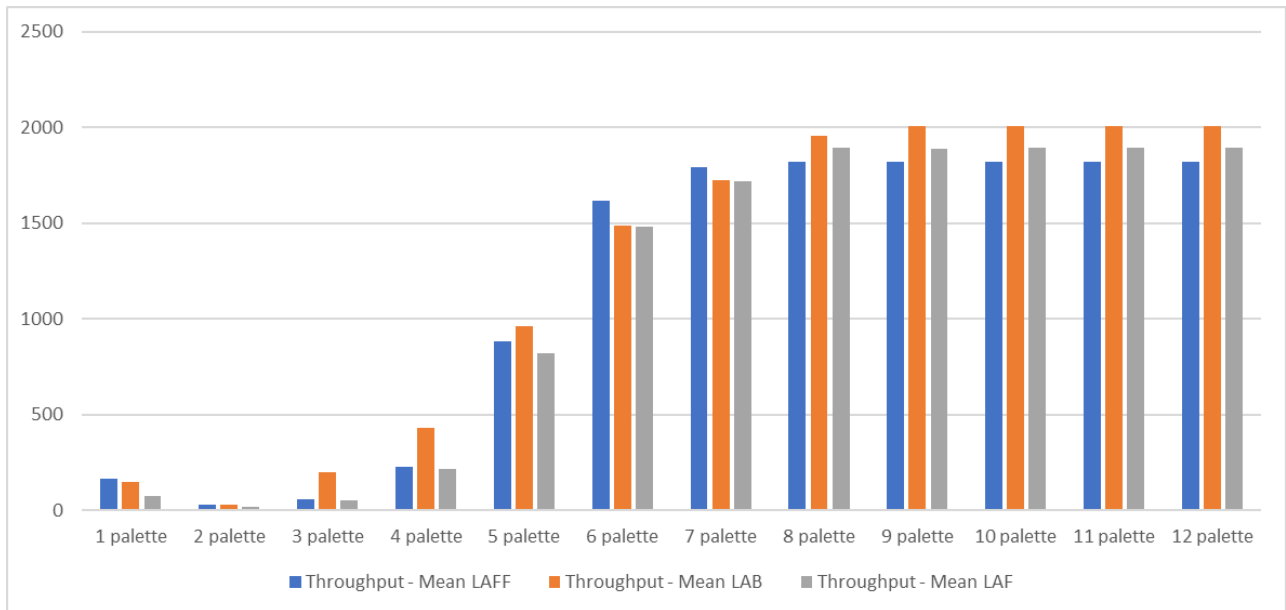


Figure 4.49: Nombre de produit finis

### Nombre de produits défectueux

Table 4.27: Nombre de produit défectueux pour chaque ligne

Scénario	Throughput LAFF	Throughput LAB	Throughput LAF
1 palette	4,3	4	1,1
2 palette	1,2	0,6	0,2
3 palette	2,4	4,4	0,9
4 palette	7	10,8	4,4
5 palette	27,8	26,7	16,2
6 palette	49,4	36,5	27
7 palette	51,4	44,9	31,8
8 palette	54,2	52,2	36,8
9 palette	54,4	53,5	33,4
10 palette	57,9	51,4	36,1
11 palette	54,6	50,2	36,8
12 palette	57,2	50,9	37,1

## Taux d'utilisation des ressources

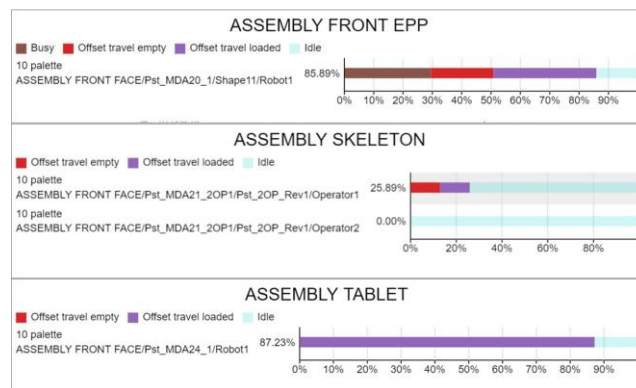


Figure 4.50: Taux d'utilisation (LAFF)

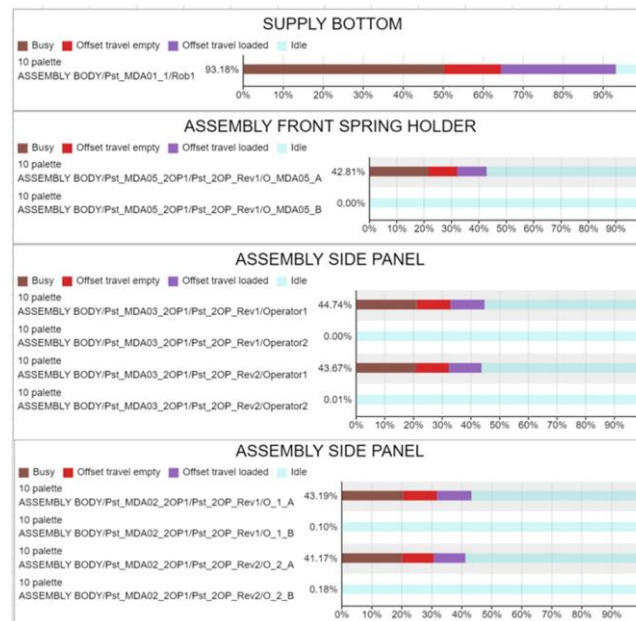


Figure 4.51: Taux d'utilisation (LAB)

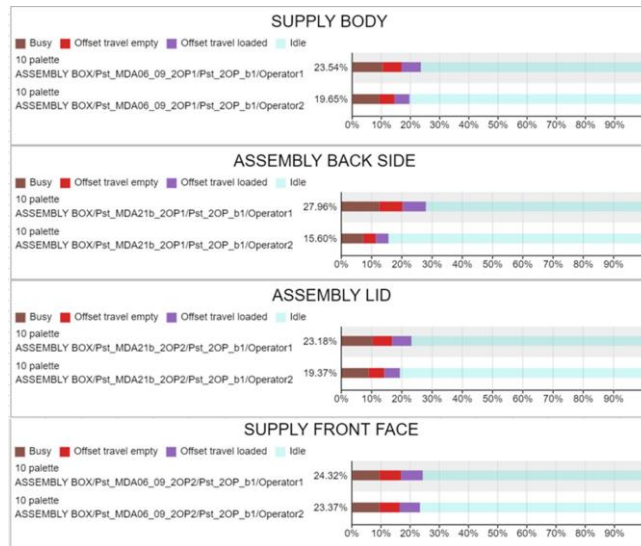


Figure 4.52: Taux d'utilisation (LAF)

### Nombre de palettes occupées/libres

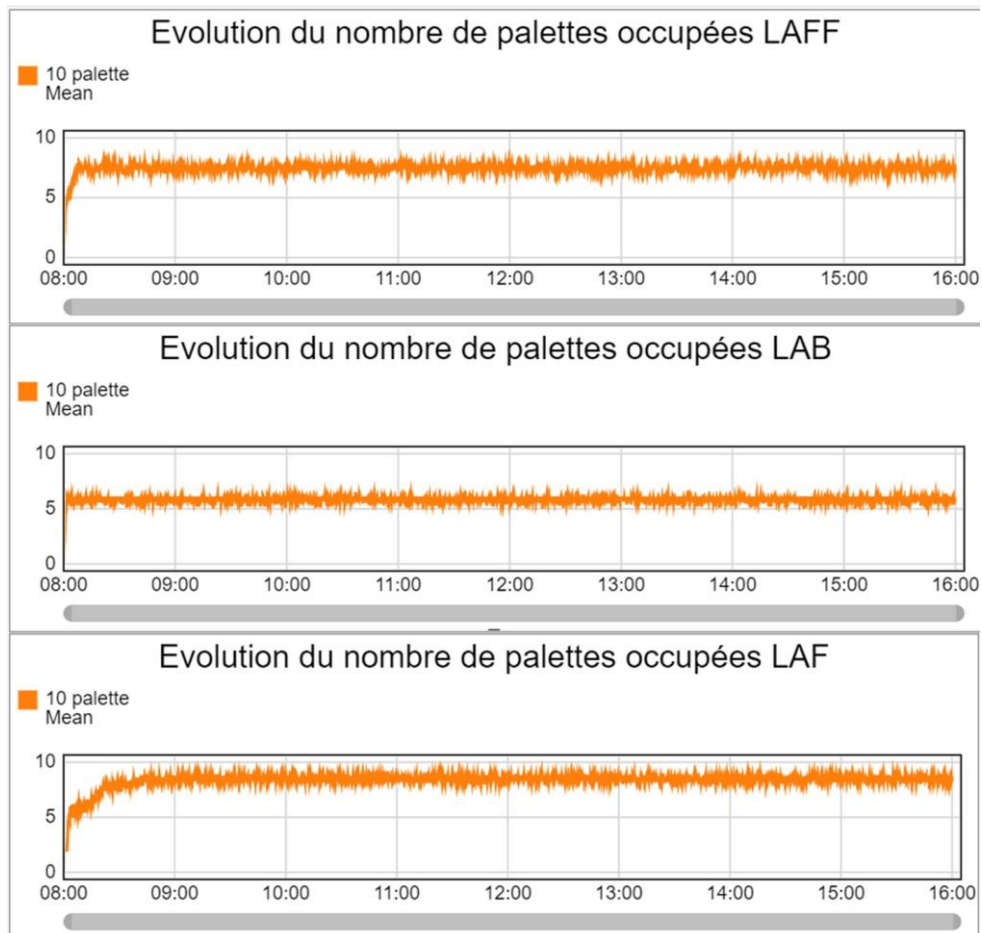


Figure 4.53: Évolution du nombre de palettes occupées

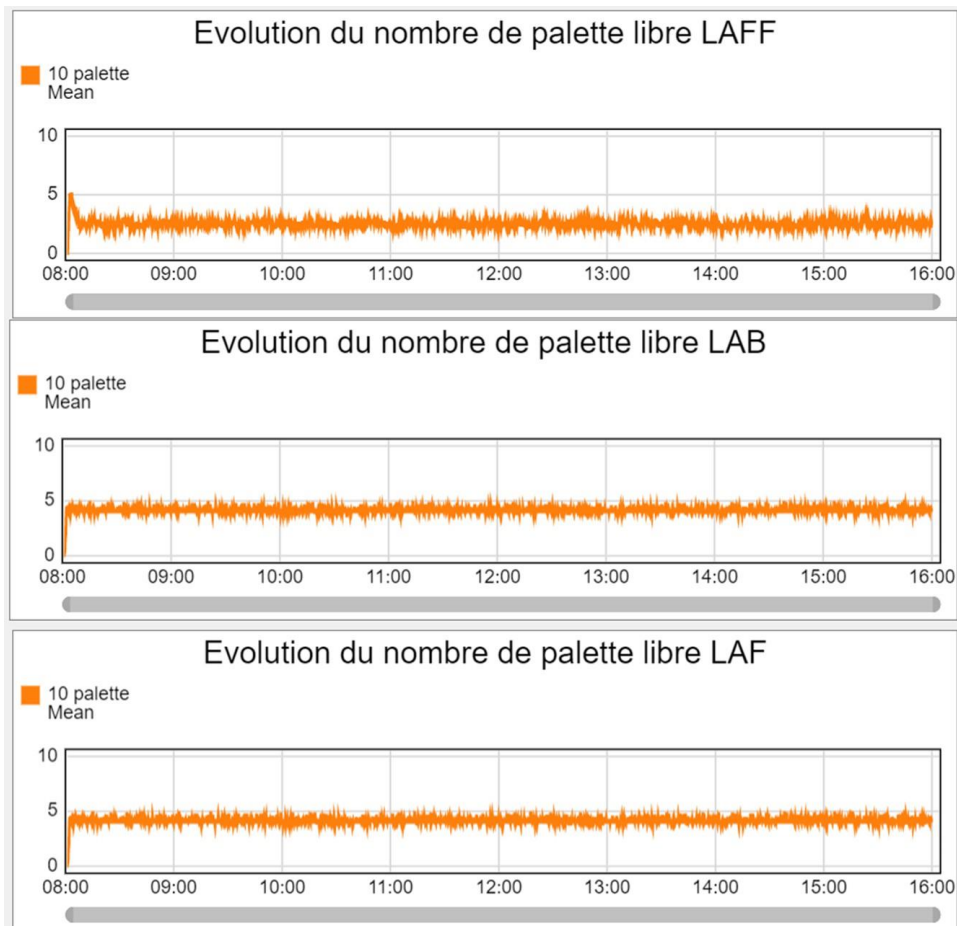


Figure 4.54: Évolution du nombre de palettes libres

### Nombre de produits semi-finis en attente

Table 4.28: valeurs statistique du nombre de produit semi finis (functional front face)

Scénario	Minimum	Maximum	Moyen
1 palette	0	46,55	23,25
2 palette	0	4,95	2,31
3 palette	0	5,35	2,12
4 palette	0	16,4	5,85
5 palette	0	55,25	26,36
6 palette	0	97	48,4
7 palette	0	69,55	34,39
8 palette	0	3,35	0,17
9 palette	0	3,15	0,12
10 palette	0	3,1	0,11
11 palette	0	3,1	0,11
12 palette	0	3,1	0,11

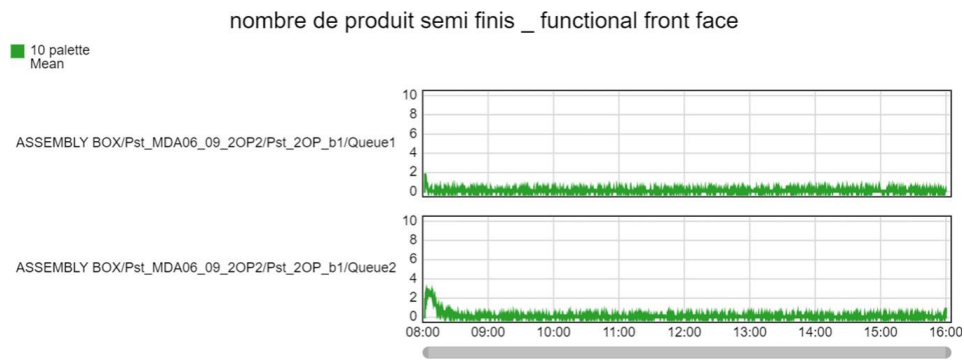


Figure 4.55: Nombre de produit semi finis (functional front face)

Table 4.29: valeurs statistique du nombre de produit semi finis (Body)

Scénario	Minimum	Maximum	Moyen
1 palette	0	38,2	18,67
2 palette	0	3,5	1,29
3 palette	0	72	33,93
4 palette	0	107,35	38,39
5 palette	0	67,95	25,13
6 palette	0	1	0,06
7 palette	0	1,05	0,06
8 palette	0	30,65	13,87
9 palette	0	54,35	25,45
10 palette	0	52,1	24,7
11 palette	0	53,85	24,08
12 palette	0	52,4	23,47

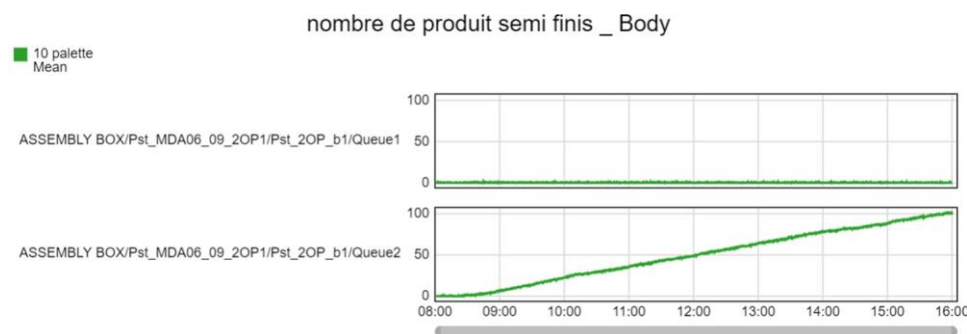


Figure 4.56: Évolution du nombre de produit semi finis (Body)

## Interprétation

D'après les résultats de simulation obtenus pour la troisième configuration et en fonction des variations du nombre de palettes utilisées dans chaque ligne d'assemblage, plusieurs observations peuvent être faites :

**Nombre de produits finis et défectueux :** Dans cette configuration avec deux opérateurs à chaque poste de travail, le nombre de produits finis et défectueux est légèrement supérieur à celui des deux configurations précédentes. Cependant, cette augmentation n'est pas significative par rapport à l'ajout d'un second opérateur, ce qui suggère que l'ajout d'un

deuxième opérateur n’améliore pas substantiellement les résultats en termes de production. Il est notable que les résultats de ce KPI se stabilisent à partir de 9 palettes ou plus pour chaque ligne d’assemblage (LAFF, LAB, LAF).

**Taux d’utilisation des ressources :** Une première analyse de ce KPI révèle que le deuxième opérateur n’est pas pleinement utilisé dans les lignes LAFF et LAB, indépendamment du nombre de palettes. Cela pourrait être dû à la cadence du premier robot de ces deux lignes et au faible temps de sortie des pièces, ce qui ne permet pas l’arrivée simultanée d’au moins deux pièces à chaque poste. En revanche, l’analyse du taux d’utilisation dans la dernière ligne (LAF) montre que les deux opérateurs sont utilisés simultanément, car le taux d’arrivée des pièces semi-finies est élevé, ce qui conduit à une cadence accrue permettant l’utilisation des deux opérateurs.

**Nombre de produits semi-finis en attente :** L’analyse du nombre de produits semi-finis en attente sur la ligne d’assemblage finale (LAF) montre que, dans cette configuration à 2 opérateurs, l’évolution du nombre de produits semi-finis (functional front face) se stabilise à une valeur de 0,11 pièce en stock pour un scénario de 10 palettes, légèrement inférieure à celle de la configuration robotisée (0,32) et de la configuration avec un seul opérateur (0,14). Cependant, pour les produits semi-finis (Body), une augmentation constante du nombre de produits en attente est observée dans le stock attribué au deuxième opérateur, tandis que le premier stock reste stable. Cela indique un problème persistant de flux de produits dans le système,

### 3.2 Paramètre : temps opératoire du premier robot

#### Nombre de produits finis

Table 4.30: Nombre de produit finis pour chaque ligne

Scénario	Throughput LAFF	Throughput LAB	Throughput LAF
Scenario PAR DEFAULT	1823,4	2007,3	1896,9
Scenario 1	1823,6	2515,7	1896,1
Scenario 2	56,2	122,8	48,8

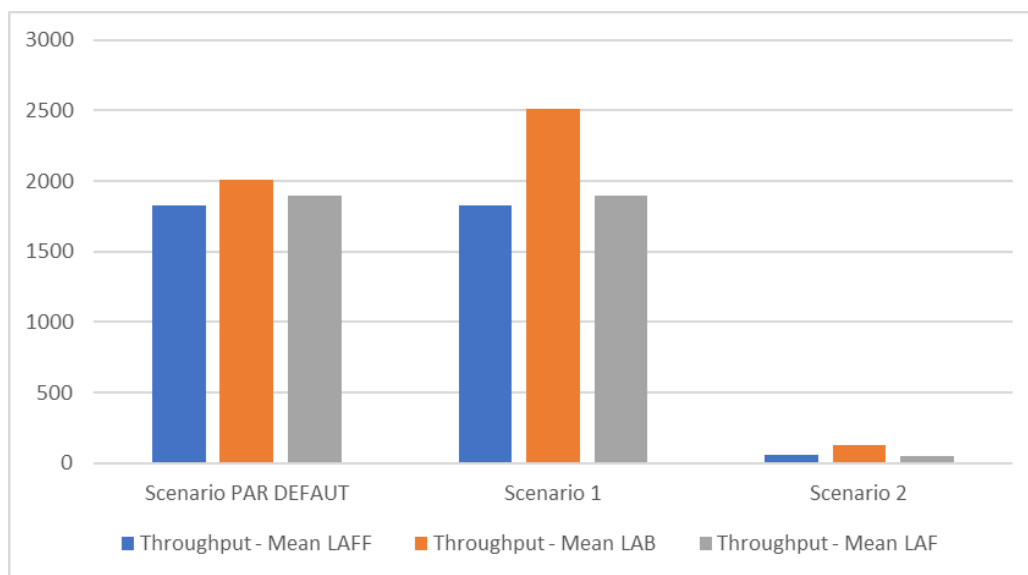


Figure 4.57: Nombre de produit finis pour chaque ligne

## Nombre de produits défectueux

Table 4.31: Nombre de produit défectueux pour chaque ligne

Scénario	Throughput LAFF	Throughput LAB	Throughput LAF
Scenario PAR DEFAULT	57,9	51,4	36,1
Scenario 1	53,5	65,5	34,2
Scenario 2	2,2	2,7	0,9

## Taux d'utilisation des ressources

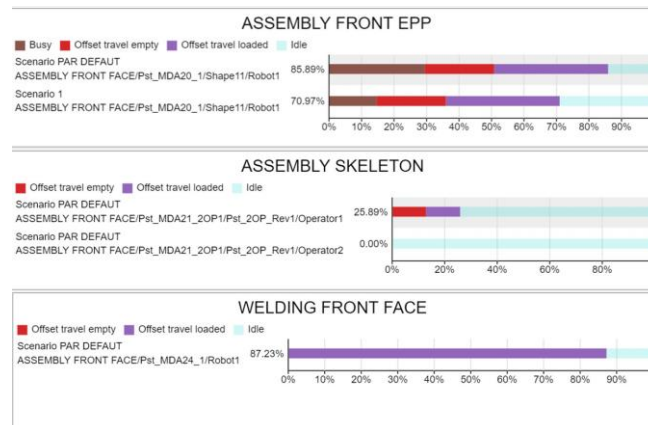


Figure 4.58: Taux d'utilisation (LAFF)

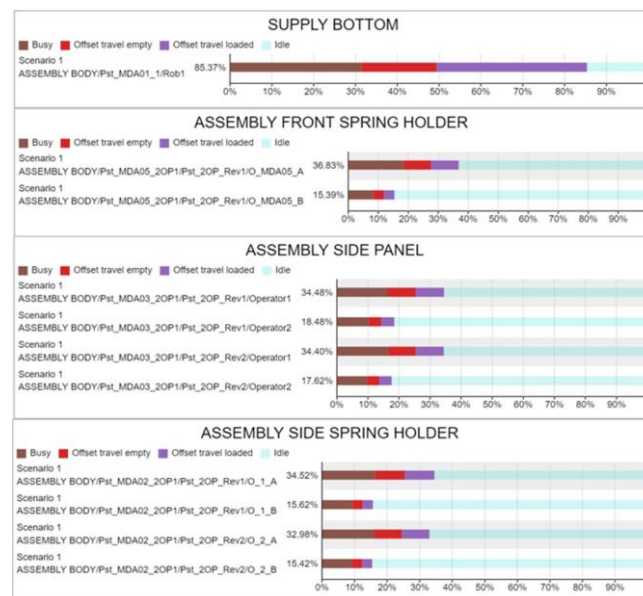


Figure 4.59: Taux d'utilisation (LAB)



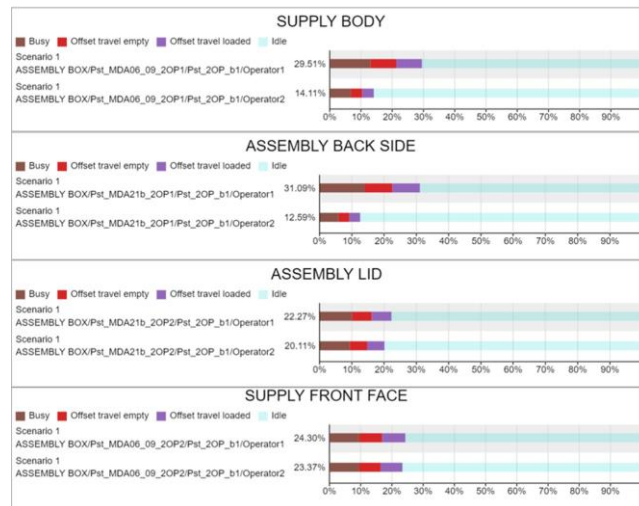


Figure 4.60: Taux d'utilisation (LAF)

### Nombre de palettes occupées/libres

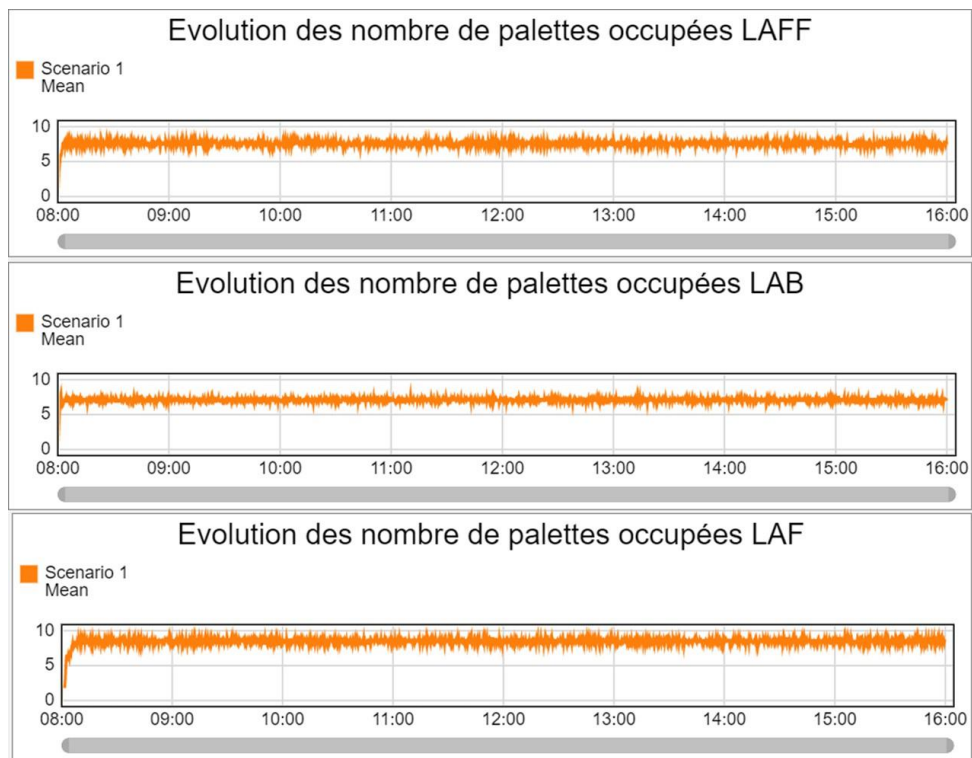


Figure 4.61: Evolution dU nombre de palettes occupées LAFF



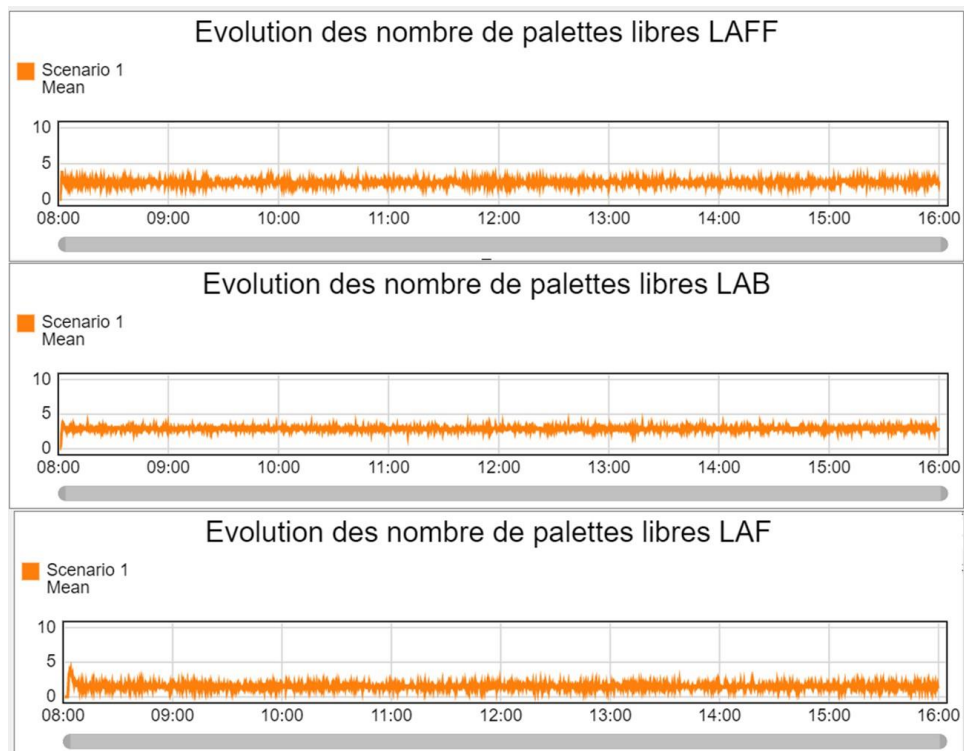


Figure 4.62: Evolution dU nombre de palettes libres LAFF

### Nombre de produits semi-finis en attente

Table 4.32: valeurs statistique du nombre de produit semi finis (functional front face)

Scénario	Minimum	Maximum	Moyen
Scenario PAR DEFAULT	0	3,1	0,11
Scenario 1	0	2,1	0,08
Scenario 2	0	5,7	2,61

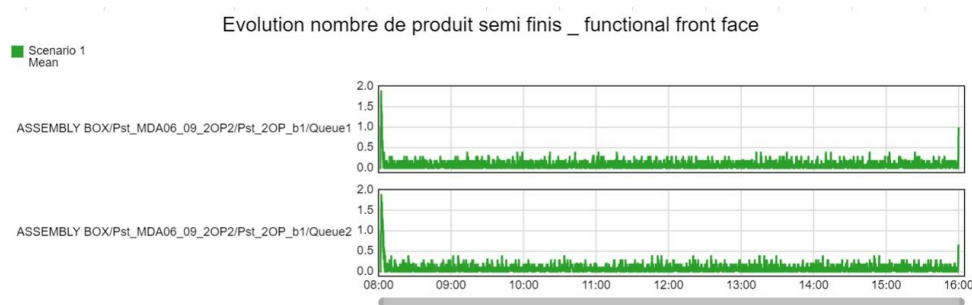


Figure 4.63: Évolution nombre de produit semi finis (functional front face)

Table 4.33: valeurs statistique du nombre de produit semi finis (Body)

Scenario	Minimum	Maximum	Moyen
Scenario PAR DEFAULT	0	52,1	24,7
Scenario 1	0	306,5	149,86
Scenario 2	0	36,55	16,68

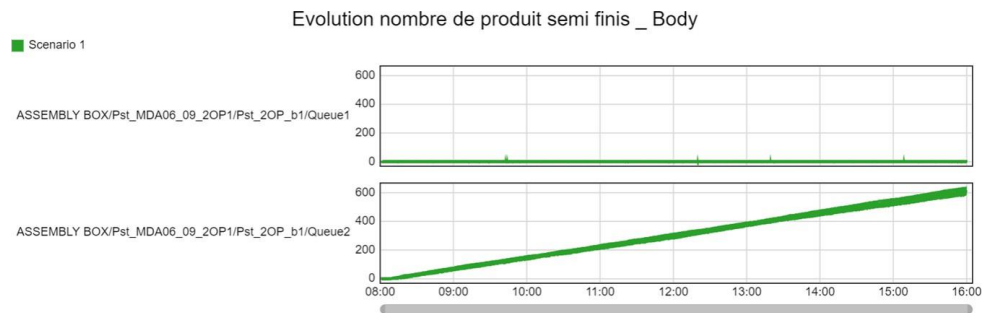


Figure 4.64: Évolution nombre de produit semi finis (Body)

## Interprétation

D'après les résultats de simulation obtenus pour la troisième configuration et en fonction des variations du temps opératoire des deux premiers robots des lignes d'assemblage LAFF et LAB, plusieurs observations peuvent être faites :

**Nombre de produits finis et défectueux :** L'analyse des résultats montre que l'application du scénario 1 améliore les résultats uniquement pour la deuxième ligne d'assemblage LAB, où on constate une augmentation de plus de 500 pièces finies par rapport au scénario par défaut. En revanche, pour la première ligne d'assemblage LAFF, aucune amélioration n'est observée pour le scénario 1 comparé au scénario par défaut. Cela est dû à la présence d'une machine goulot à la fin de la ligne qui empêche l'utilisation efficace de la configuration à 2 opérateurs.

**Taux d'utilisation des ressources :** Le taux d'utilisation des ressources de manutention a connu un changement significatif, notamment avec l'utilisation du deuxième opérateur dans les postes de travail de la ligne LAB pour le scénario 1, qui impose des temps opératoires minimaux par rapport au scénario par défaut. En revanche, le taux d'utilisation de la ligne LAFF n'a pas changé en raison de la dernière machine, le poste de soudage, qui est considérée comme le goulot d'étranglement du système.

**Nombre de produits semi-finis en attente :** L'analyse du nombre de produits semi-finis en attente sur la ligne d'assemblage finale (LAF) montre que, dans cette configuration à 2 opérateurs, l'évolution du nombre de produits semi-finis (fonctionnalité frontale) se stabilise à une valeur de 0,01 pièce en stock pour le scénario 1, légèrement inférieure à celle du scénario par défaut (0,11). La stabilité est observée pour les deux stocks correspondant aux deux opérateurs du poste. Cependant, pour les produits semi-finis (Body), une augmentation constante du nombre de produits en attente est observée dans le stock attribué au deuxième opérateur, tandis que le premier stock reste stable, indiquant la présence d'un problème de flux de produits dans le système.

## 3.3 Paramètre : temps opératoire de soudage

### Nombre de produits finis

Table 4.34: nombre de produit finis pour chaque ligne

Scénario	Throughput LAFF	Throughput LAB	Throughput LAF
10 secondes	1964,8	2006	2001,1
20 secondes	1952,6	2005,6	1998,7
30 secondes	1823,4	2007,3	1896,9

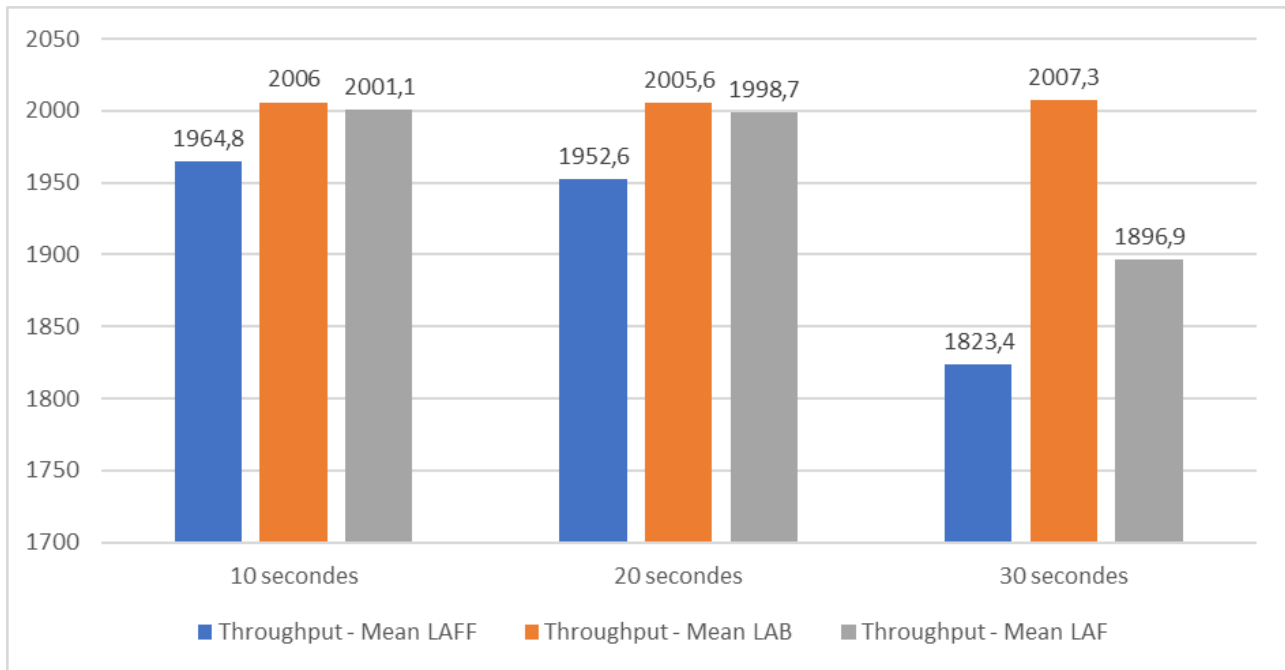


Figure 4.65: Nombre de produit finis

### Nombre de produits défectueux

Table 4.35: Nombre de produit défectueux pour chaque ligne

Scénario	Throughput LAFF	Throughput LAB	Throughput LAF
10 secondes	60,2	52,8	37,8
20 secondes	58,4	53,1	34,6
30 secondes	57,9	51,4	36,1

### Taux d'utilisation des ressources

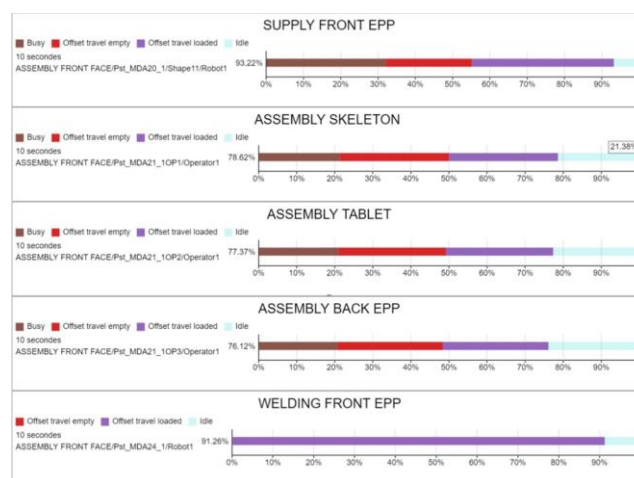


Figure 4.66: Taux d'utilisation (LAF)

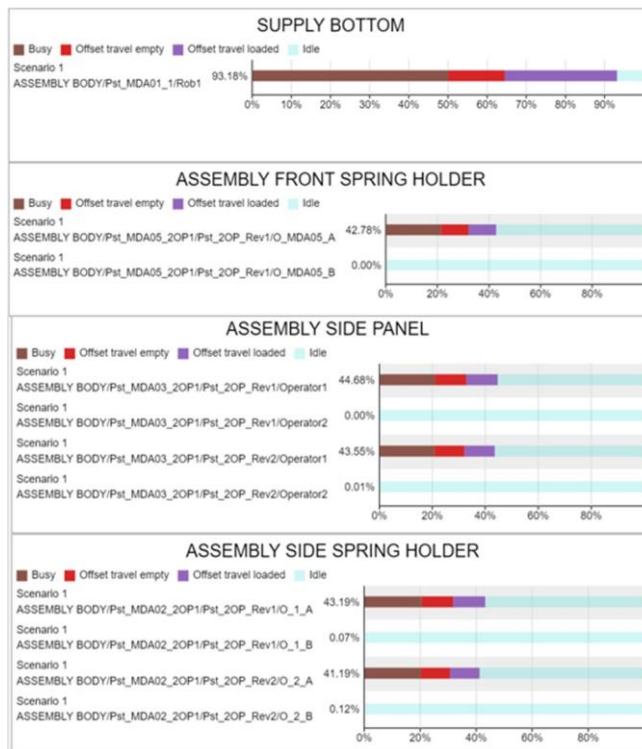


Figure 4.67: Taux d'utilisation (LAB)

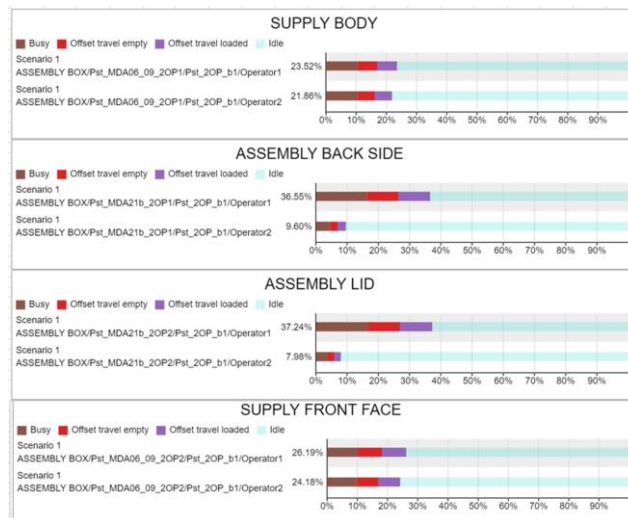


Figure 4.68: Taux d'utilisation (LAF)

## Nombre de palettes occupées/libres

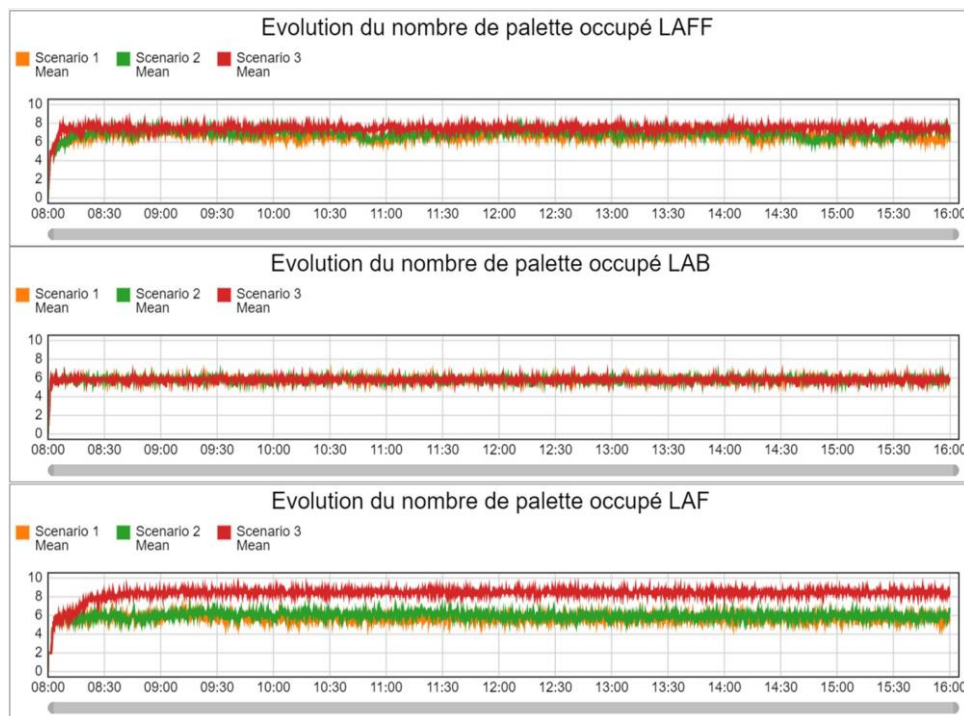


Figure 4.69: Évolution du nombre de palettes occupées

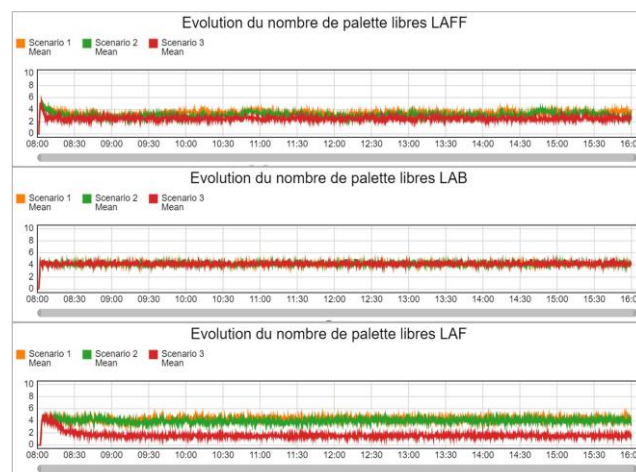


Figure 4.70: Évolution du nombre de palette libres

## Nombre de produits semi-finis en attente

Table 4.36: valeurs statistique du nombre de produit semi finis (functional front face)

Scénario	Minimum	Maximum	Moyen
10 secondes	0	21,75	9,88
20 secondes	0	15,35	6,66
30 secondes	0	3,1	0,11

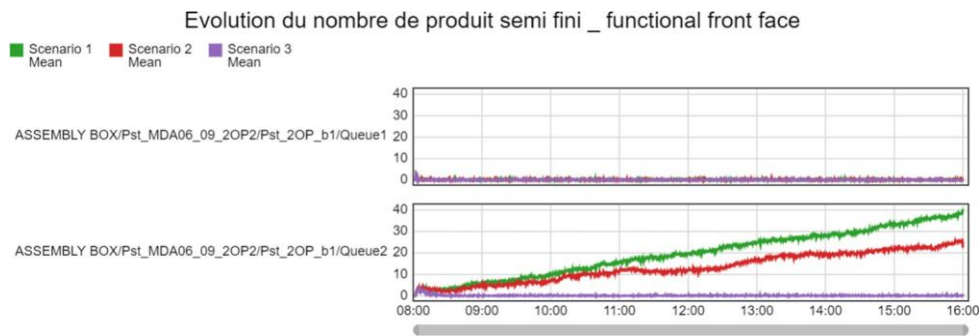


Figure 4.71: Évolution du nombre de produit semi fini (functional front face)

Table 4.37: valeurs statistique du nombre de produit semi finis (Body)

Scénario	Minimum	Maximum	Moyen
10 secondes	0	1,75	0,06
20 secondes	0	2,1	0,17
30 secondes	0	52,1	24,7

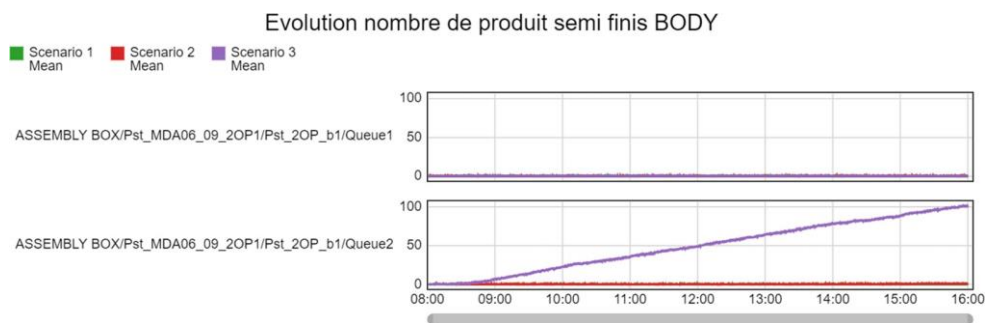


Figure 4.72: Évolution du nombre de produit semi finis (Body)

## Interprétation

D'après les résultats de simulation obtenus pour la troisième configuration et en fonction des variations du temps opératoire de soudage de la ligne d'assemblage LAFF, plusieurs observations peuvent être faites :

**Nombre de produits finis et défectueux :** D'après l'analyse des résultats, on observe que l'application du scénario 1 a amélioré les résultats de la première ligne d'assemblage LAFF, avec une augmentation de 100 pièces par rapport au temps opératoire par défaut (30 secondes). En revanche, la deuxième ligne d'assemblage LAB n'a montré aucun changement pour les scénarios 1 et 2, car cette dernière n'est pas directement influencée par la ligne d'assemblage LAFF. Il est à noter que l'amélioration de la ligne LAFF conduit également à une amélioration des résultats de la ligne finale LAF, ce qui contribue à une augmentation de l'efficacité globale du système.

**Taux d'utilisation des ressources :** Le taux d'utilisation des ressources de manutention pour la ligne LAFF a connu une légère diminution en termes de taux d'utilisation en raison du changement de temps opératoire. Cependant, pour les autres lignes, aucun changement notable du taux d'utilisation n'a été observé.

**Nombre de produits semi-finis en attente :** L'analyse du nombre de produits semi-finis en attente sur la ligne d'assemblage finale (LAF) montre que, dans cette configuration à 2 opérateurs, l'évolution du nombre de produits semi-finis (functional front face) est en

augmentation constante pour les scénarios avec des temps opératoires de 10 et 20 secondes. Cette augmentation est due à un changement de cadence de la ligne LAFF suite à la modification du temps opératoire de la machine goulot, et cette évolution se stabilise au cours de la simulation pour le scénario de 30 secondes. En revanche, pour les produits semi-finis (Body), l'inverse est observé : une augmentation du nombre de produits en attente pour le scénario de 30 secondes, tandis que la stabilité du nombre de produits semi-finis en stock est atteinte pour les scénarios avec des temps opératoires de 10 et 20 secondes.



# Conclusion générale

L'industrie moderne, confrontée à des défis croissants en matière de compétitivité, de qualité, et de réactivité, doit s'appuyer sur des outils et des méthodes avancés pour optimiser ses systèmes de production. Ce mémoire s'inscrit dans cette dynamique en explorant l'utilisation des systèmes à événements discrets (SED) et des indicateurs clés de performance (KPI) pour l'amélioration continue des systèmes industriels complexes.

La simulation des SED s'est révélée être un outil indispensable pour modéliser, analyser, et optimiser les systèmes de production. En utilisant FlexSim, un logiciel de simulation avancé, nous avons pu créer des modèles 3D détaillés et tester différentes configurations du système d'assemblage. Cette approche a permis de :

- Visualiser le comportement des systèmes dans différents scénarios sans perturber les opérations réelles.
- Tester diverses configurations de ressources de manutention (robots, opérateurs) et d'évaluer leur impact sur la performance du système.
- Identifier les goulots d'étranglement et les inefficacités potentielles, offrant ainsi des perspectives d'amélioration.

Les KPI ont joué un rôle crucial en fournissant des métriques quantifiables pour évaluer l'efficacité des configurations simulées. En se concentrant sur des KPI pertinents tels que la productivité, le taux de défauts, et l'utilisation des ressources, nous avons pu :

- Mesurer l'impact des différentes configurations sur la performance globale du système. Évaluer la flexibilité et l'agilité du système en réponse à des changements dans les paramètres opérationnels.
- Faciliter la prise de décision en fournissant des données précises sur lesquelles baser les améliorations.

Étude de Cas : Système d'assemblage L'étude de cas réalisée sur un système d'assemblage comprenant trois lignes distinctes (LAF, LAB, LAF) a démontré l'efficacité de notre approche. En explorant les 27 configurations possibles, nous avons mis en évidence :

- L'impact des ressources de manutention (robots vs. opérateurs) sur la productivité et la qualité.
- Les variations dans l'utilisation des ressources et leur corrélation avec le nombre de palettes et les temps opératoires.
- La capacité du système à s'adapter à différentes configurations, offrant des résultats importants pour optimiser la performance du système. Résultats et Implications

Les résultats de nos simulations ont fourni des recommandations concrètes pour améliorer le système d'assemblage étudié, principalement sur :



- Optimisation des ressources : L'utilisation optimale de robots ou d'opérateurs en fonction des besoins spécifiques du processus.
- Amélioration de la qualité : Réduction du taux de défauts grâce à des ajustements précis des paramètres opérationnels.
- Gestion efficace des palettes : Réduire les temps d'attente et améliorer le flux de production en ajustant le nombre de palettes. Ces résultats soulignent l'importance de la simulation et des KPI dans la gestion des systèmes complexes, offrant une base solide pour des décisions stratégiques qui améliorent la performance globale.

# 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>.
- Christos G. Cassandras and Stéphane Lafortune. *Introduction to Discrete-Event Systems*. Springer, 2nd edition, 2008. ISBN 978-1447157969.
- Averill M. Law. *Simulation Modeling & Analysis*. McGraw-Hill, New York, NY, USA, 5 edition, 2015.
- J. Banks. *Discrete-event System Simulation*. Prentice Hall, 2010. ISBN 9780136062127. URL <https://books.google.fr/books?id=cqSNnmrqqbQC>.
- Sheldon M. Ross. *Stochastic Processes*. Wiley, 2nd edition, 1996. ISBN 978-0471120629.
- John E. Hopcroft, Rajeev Motwani, and Jeffrey D. Ullman. *Introduction to Automata Theory, Languages, and Computation*. Addison-Wesley, 3rd edition, 2006. ISBN 978-0321455369.
- Sergey P. Orlov, Sergey V. Susarev, and Roman A. Uchaikin. Application of hierarchical colored petri nets for technological facilities' maintenance process evaluation. *Applied Sciences*, 11(11):5100, 2021. doi: 10.3390/app11115100. URL <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/11/5100>.
- Kurt Jensen. *Coloured Petri Nets*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2nd edition, 1996. ISBN 978-3-540-60943-8.

FlexSim Software Products, Inc. *Welcome to FlexSim*, 2024. URL <https://docs.flexsim.com/en/24.1>. Accessed: 2024-05-22.

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.

LivingPackets. *Livingpackets*, 2024. URL <https://fr.livingpackets.com/>. Consulté le 22 mai 2024.