

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



MEMOIRE DE PROJET DE FIN D'ETUDES

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

En : Génie industriel

Spécialité : Chaîne logistique

Par : ARBAOUI Nesrine

Intitulé

**APPLICATION DES Jumeaux Numériques dans la Gestion d'une
Chaîne Logistique (Etude de Cas)**

Soutenu publiquement, le 18 / 06 / 2025, devant le jury composé de :

M. SOUIER Mehdi	Professeur	Université de Tlemcen	Président
M ^{elle} GHOMRI Latefa	Professeur	Université de Tlemcen	Examinatrice
M ^{elle} HOUBAD Yamina	MCB	Université de Tlemcen	Examinatrice
M. GUEZZEN Amine Hakim	MCA	Université de Tlemcen	Encadrant

Année universitaire : 2024 / 2025

Remerciements

Nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont contribué au succès de notre mémoire et qui nous ont aidés lors de la rédaction de ce mémoire

Je tiens tout d'abord à remercier chaleureusement mon encadrant M. **GUEZZEN Amine Hakim**, pour sa persévérance, sa disponibilité, sa sagesse, la richesse de ses conseils, la clarté de ses orientations, ainsi que pour ses remarquables qualités humaines qui ont grandement contribué à la réussite de ce travail.

Nos profondes gratitude vont également à Monsieur **SOUIER Mehdi** président du jury, ainsi qu'à Madame **GHOMRI Latifa** et Madame **HOUBAD Yamina**, membres du jury, pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'évaluer notre travail et de participer à cette soutenance.

Nous souhaitons aussi remercier chaleureusement l'ensemble de nos enseignants, depuis l'école primaire jusqu'à l'université, pour leur engagement et les connaissances qu'ils nous ont transmises.

Enfin, un grand merci à toutes les personnes qui nous ont soutenus de près ou de loin, et qui ont contribué, par leurs encouragements ou leur aide, à la réussite de notre parcours académique.

Pour conclure, nous adressons nos remerciements à l'ensemble du corps professoral de l'Université **Abou Bekr Belkaid**, ainsi qu'au personnel administratif et aux responsables de la formation en Génie Industriel, pour les efforts considérables déployés afin de nous offrir un cadre d'étude favorable et propice à la réussite.

Dédicace

À mes chers parents,
Pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices et leur soutien sans faille tout au long
de mon parcours.

À ma chère sœur **Siham**,
Pour sa présence rassurante et ses encouragements constants.

À ma cousine **Besma**,
Pour son aide précieuse, sa bienveillance et sa complicité.

À ma copine **Nardjes**,
Pour son soutien moral et sa patience dans les moments difficiles.

À mes tantes et à toute ma chère famille maternelle **Merouane** ,
Merci pour votre tendresse, vos prières et votre présence chaleureuse à chaque étape.

Cette réussite est aussi la vôtre. Merci d'être toujours là pour moi.

Résumé :

Dans un contexte industriel en pleine mutation, la logistique joue un rôle stratégique dans l'amélioration de la performance des entreprises. Sa digitalisation permet de répondre aux exigences croissantes du marché en optimisant la gestion des flux et en facilitant la prise de décision. Le concept de jumeau numérique s'inscrit pleinement dans cette dynamique, en offrant une réplique virtuelle d'un système physique permettant son pilotage intelligent. Après une présentation théorique de ce concept et de ses composantes, le mémoire s'appuie sur un cas d'étude concret : un atelier de confection textile composé de deux unités de production. Ce système a été modélisé à l'aide du logiciel FlexSim, afin de simuler et d'analyser les flux logistiques du site. La simulation a permis de visualiser le fonctionnement global, de détecter les points critiques et d'évaluer la performance à travers plusieurs indicateurs. Enfin, une comparaison entre deux scénarios logistiques a été réalisée pour mesurer l'effet de la configuration des unités de production sur la performance de la chaîne, en se concentrant sur les délais, le rendement et l'occupation des entrepôts.

Mots clés : Chaîne logistique, jumeaux numériques, simulation, industrie 4.0

Abstract :

In a rapidly evolving industrial context, logistics plays a strategic role in enhancing company performance. Its digitalization meets growing market demands by optimizing flow management and facilitating decision-making. The digital twin concept fits perfectly into this dynamic by offering a virtual replica of a physical system, enabling intelligent control. After a theoretical presentation of this concept and its components, the thesis is based on a concrete case study: a textile manufacturing workshop composed of two production units. This system was modeled using the FlexSim software to simulate and analyze the site's logistics flows. The simulation helped visualize overall operations, identify critical points, and assess performance through various indicators. Finally, a comparison between two logistical scenarios was carried out to evaluate the impact of the production units' configuration on the overall supply chain performance, focusing on delivery times, workshop efficiency, and warehouse occupancy.

Keywords : Supply chain, digital twins, simulation, Industry 4.0

ملخص :

في سياق صناعي يشهد تطوراً مستمراً، تلعب اللوجستية دوراً استراتيجياً في تحسين أداء الشركات. ويساهم تحولها الرقمي في الاستجابة لمتطلبات السوق المتزايدة من خلال تحسين إدارة التدفقات وتسهيل عملية اتخاذ القرار. ويأتي مفهوم التوأم الرقمي في صميم هذا التحول، حيث يوفر نسخة افتراضية لنظام مادي تمكن من التحكم الذكي فيه. بعد عرض نظري لهذا المفهوم ومكوناته، يعتمد هذا البحث على دراسة حالة واقعية: ورشة خياطة نسجية تتكون من وحدتي إنتاج. تم نمذجة هذا النظام باستخدام برنامج FlexSim لمحاكاة وتحليل التدفقات اللوجستية للموقع. وقد ساعدت المحاكاة في تصور العمليات العامة، وتحديد النقاط الحرجة، وتقييم الأداء من خلال عدة مؤشرات. وأخيراً، تم إجراء مقارنة بين سيناريوهين لوجستيين لتقييم تأثير ترتيب وحدات الإنتاج على الأداء العام لسلسلة التوريد، مع التركيز على أزمدة التسليم، مردودية الورشات، ومستوى إشغال المخازن.

الكلمات المفتاحية: سلسلة التوريد، التوأم الرقمي، المحاكاة، الصناعة 4.0

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES CHAÎNES LOGISTIQUES INDUSTRIELS

I.1.Introduction.....	4
I.2. Rôle stratégique des chaînes logistiques dans les entreprises modernes.....	4
I.2.1. Fonction logistique en entreprise.....	4
I.2.2. Importance de la logistique en entreprise.....	4
I.2.3. Gestion de la logistique d'une entreprise.....	4
I.3. Logistique interne vs logistique externe.....	5
I.3.1. Logistique interne.....	5
I.3.2. Logistique externe.....	6
I.4. Impact de la transformation numérique sur l'évolution de la logistique.....	6
I.5.Avantages et enjeux de la digitalisation de la chaîne logistique.....	8
I.5.1.Avantages de la digitalisation de la chaîne logistique.....	8
I.5.2. Grands défis de la digitalisation de la chaîne logistique.....	9
I.6. Définition de l'Industrie 4.0.....	10
I.7. Industrie 4.0 : Vers une nouvelle révolution industrielle, économique et sociale.....	10
I.8. Contribution des jumeaux numériques à l'Industrie 4.0.....	12
I.9. Application des jumeaux numériques.....	13
I.10. Conclusion	16

CHAPITRE II : APPLICATION DES JUMEAUX NUMÉRIQUE POUR LA CHAÎNE LOGISTIQUE

II.1.Introduction.....	18
II.2. Concepts des jumeaux numériques.....	18
II.2.1. Histoire de la technologie de jumeau numérique.....	18
II.2.2.Historique du concept de jumeau numérique selon Grieves et Vickers (2017).19	19
II.2.3. Définition du jumeau numérique.....	20
II.2.4.Emergence du jumeau numérique dans le contexte de l'industrie 4.0.....	21
II.2.5.Définitions adaptées à chaque domaine d'application.....	22
II.2.6.Définition et niveau d'intégration du fil numérique.....	22
II.2.7. Composition du jumeau numérique.....	22
II.2.8. fonctionnement d'un jumeau numérique.....	24
II.2.9.Types de jumeaux numériques.....	27
II.2.10. Atouts et avantages des jumeaux numériques.....	28
II.2. 10.1. Optimisation de la recherche et du développement.....	28

II.2. 10.2. Amélioration de l'efficacité.....	28
II.2. 10.3. Fin de vie du produit.....	28
II.2.11. Marché des jumeaux numériques et secteurs d'activité.....	28
II.2. 11.1. Utilisation sélective des JN selon les besoins industriels.....	28
II.2. 11.2. Applications.....	29
II.3. Technologies du jumeau numérique et leur impact sur l'industrie du futur.....	30
II.4. Présentation du cas d'étude.....	31
II.4.1. Description du système logistique à modéliser.....	31
II.4.2. Structure des ateliers.....	32
II.4.3. Contexte de l'étude.....	34
II.4.4. Objectifs du cas d'étude.....	34
II.4.5. Définition des paramètres du modèle.....	35
II.5. Conclusion.....	38

CHAPITRE III: VERS UN JUMEAU NUMÉRIQUE LOGISTIQUE : APPROCHE PAR

SIMULATION DANS FLEXSIM

III.1 introduction.....	39
III.2 Présentation du logiciel flexim.....	39
III.2.1 Principales fonctionnalités de FlexSim.....	39
III.2.2. l'importance de l'utilisation de FlexSim dans le cadre de cette étude.....	41
III.3. Description de la Chaîne Logistique Modélisée.....	41
III.4. Méthodologie de Simulation avec FlexSim.....	42
III.4.1. Modélisation du système proposé.....	42
III.4.1.1 Définition des entités.....	43
III.4.1.2 Configuration des temps de traitement.....	45
III.4.1.3 Mise en place d'une répartition en pourcentage depuis les ateliers.....	46
III.4.1.4 Intégration des délais logistiques et modélisation de la distribution finale.	47
III.4.1.5. Modélisation du processus interne de l'atelier de confection.....	49
III.4.2. Configuration des Scénarios de Simulation.....	50
III.5. Méthodologie de création du jumeau numérique.....	51
III.5.1 Étapes de connexion entre deux PC pour la visualisation en temps réel.....	53
III.5.2 Configuration du serveur web de FlexSim.....	54
III.5.3 Installation et configuration du serveur Apache.....	56
III.6. conclusion.....	58

CHAPITRE IV: ANALYSE DES RÉSULTATS

IV.1. Introduction.....	60
IV.2. Analyse des tableaux de bord.....	60
IV.2.1. Temps d'attente des matières premières.....	60
IV.2.2. Rendement par heure.....	61
IV.2.3. Taux d'occupation des entrepôts.....	62
IV.2.4 . Taux d'occupation des ateliers.....	62
IV.2.5 . Taux d'occupation des entrepôts.....	64
IV.2.6 . Nombre de produits livrés.....	64
IV.2.7 . Délai de livraison pour les trois entrepôts.....	65
IV.3. Proposition d'amélioration (ajout d'un troisième atelier à Alger).....	65
IV.4. Comparaison entre les 2 scénarios.....	67
IV.4.1. Scénario 1 : Deux ateliers situés à Tlemcen.....	67
IV.4.2. Scénario 2 : Trois ateliers – Deux à Tlemcen, un à Alger.....	69
IV.5. Implantation de l'atelier supplémentaire.....	70
IV.6. Conclusion.....	71

CONCLUSION GÉNÉRALE

liste des figures

Figure I.1 : Différentes étapes de la chaîne logistique.....	5
Figure I.2 : Impact du numérique sur la logistique moderne.....	7
Figure I.3 : Grands défis de la digitalisation de la chaîne logistique.....	9
Figure I.4 : Leviers technologiques de la transformation numérique industrielle.....	12
Figure 1.5 : Application du jumeau numérique en chirurgie assistée par robot.....	15
Figure 1.6 : Visualisation d'un jumeau numérique appliqué au secteur du bâtiment...	16
Figure II.1 : Histoire de la technologie des jumeaux numériques.....	19
Figure II.2 : Jumeau numérique : de la collecte de données à la prise de décision.....	20
Figure II.3 : Lien entre la représentation physique et numérique.....	24
Figure II.4 : fonctionnement du jumeau numérique dans un système de production....	25
Figure II.5 : Représentation structurelle du flux logistique textile depuis les fournisseurs jusqu'aux clients.....	32
Figure II.6 : Flux logistique intégré des deux ateliers de production textil.....	33
Figure III.1 : logo du logiciel flexim.....	39
Figure III.2 : Schéma résumé des capacités de FlexSim.....	40
Figure III.3 : Représentation schématique du modèle étudié.....	42
Figure III.4 : Entrée du système.....	44
Figure III.5 : Entrepôts internes pour le stockage temporaire.....	44
Figure III.6 : Ateliers de production.....	44
Figure III.7 : Réception des produits par les clients finaux.....	45
Figure III.8 : Configuration des temps de traitement à l'aide de la loi uniforme.....	45
Figure III.9 : Schéma des deux configurations utilisées.....	46
Figure III.10 : Délais logistiques intermédiaires.....	47
Figure III.11 : Capture des spécificités géographiques du système.....	48

Figure III.12 : Processus interne de l'atelier de confection.....	49
Figure III.13 : Modélisation du processus interne de l'atelier.....	50
Figure III.14 : Capture d'écran du système dans flexim.....	51
Figure III.15 : Architecture de communication entre le simulateur FlexSim et le jumeau numérique.....	52
Figure III.16 : Etapes de connexion entre deux postes pour un suivi en temps réel.....	54
Figure III.17 : Lancement du serveur web de Flexsim.....	55
Figure III.18 : Configuration de l'accès réseau.....	55
Figure III.19 : Test local du jumeau numérique.....	56
Figure III.20 : Test d'accès à distance du jumeau numérique.....	58
Figure IV.1 : Rendement des deux ateliers par heure.....	61
Figure IV.2 : Taux d'occupation des entrepôts.....	62
Figure IV.3 : Taux d'occupation des deux ateliers.....	62
Figure IV.4 : Taux d'occupation des entrepôts.....	64
Figure IV.5 : Nombre de produits livrés.....	64
Figure IV.6 : Délai de livraison.....	65
Figure IV.7 : Scénario d'intégration d'un troisième atelier à Alger.....	66
Figure IV.8 : Capture d'écran de la simulation du deuxième scénario.....	66
Figure IV.9 : Taux d'occupation des entrepôts et des ateliers - Scénario 1	68
Figure IV.10 : Taux d'occupation des entrepôts et des ateliers - Scénario 2	69

liste des tableaux

Tableau II.1 : Données liées au fonctionnement des deux ateliers.....	36
Tableau II.2 : Données du système étudié.....	36
Tableau II.3 : contraintes du système.....	36
Tableau II.4 : Indicateurs de performance.....	37
Tableau IV.1 : Temps d'attente des matières premières.....	60
Tableau IV.2 : analyse des temps d'attente.....	61
Tableau IV.3 : Résultats clés - Scénario 1	68
Tableau IV.4 : Résultats clés - Scénario 2	70

INTRODUCTION GENERALE

L'évolution industrielle a connu plusieurs révolutions marquantes, chacune propulsée par de nouvelles technologies. La première révolution industrielle, vers 1790, était dominée par les innovations liées à la vapeur et au charbon, principalement au Royaume-Uni, avant de se répandre en Europe. La seconde révolution industrielle, vers 1850, s'est centrée sur l'exploitation de l'électricité. La troisième révolution industrielle, souvent appelée révolution technologique, a introduit l'automatisation des tâches humaines et l'émergence de nouveaux modes de production. Aujourd'hui, face à une évolution technologique rapide et à des exigences clients de plus en plus complexes, l'industrie est confrontée à la nécessité de s'adapter et de devenir plus innovante, compétitive et créatrice d'emplois tout en optimisant la production et en accélérant la mise sur le marché des produits.

C'est dans ce contexte de transformation que l'Industrie 4.0 émerge, révolutionnant l'entreprise manufacturière par l'intégration de technologies avancées telles que l'Internet des objets (IoT), la fabrication additive, et les systèmes de production intelligents, transformant ainsi l'entreprise en une "usine du futur". Cette ère industrielle se caractérise par une fusion du monde réel et virtuel, incarnée par le concept de jumeau numérique. Conçu comme une réplique virtuelle d'un produit, d'un processus ou d'un système physique, le jumeau numérique permet une simulation en temps réel de son équivalent dans le monde réel. Alimenté par des données continues provenant de capteurs installés sur les objets physiques, il offre une représentation fidèle et permet d'optimiser les performances avant même l'implémentation de changements dans le monde réel.

Cette approche innovante facilite la détection précoce des anomalies et la gestion proactive des équipements et des processus industriels. En fournissant une plateforme pour tester de nouvelles stratégies et idées, le jumeau numérique favorise l'innovation et l'amélioration continue, permettant ainsi aux entreprises de maintenir leur compétitivité dans un environnement dynamique et en constante évolution. Dans cette optique, les jumeaux numériques jouent un rôle central dans la transformation des processus industriels, notamment à travers des méthodes de gestion avancées telles que la simulation et l'intégration des technologies de l'industrie 4.0.

Dans le cadre de cette étude, l'objectif principal est d'explorer l'application de la simulation numérique, via le logiciel FlexSim, pour optimiser les opérations de production au sein d'un atelier textile. Cette approche permet de modéliser virtuellement les processus de fabrication, d'analyser les flux de production et

d'identifier les points de congestion potentiels. En simulant différents scénarios, il est possible d'évaluer l'impact de diverses configurations sur la performance globale, facilitant ainsi la prise de décisions éclairées avant la mise en œuvre réelle des changements. L'intégration de la simulation dans la gestion de la production vise à améliorer la fiabilité des prévisions, à optimiser l'utilisation des ressources et à renforcer l'efficacité opérationnelle de l'atelier.

Cette étude vise à clarifier le rôle et l'impact des jumeaux numériques et des techniques de simulation dans la transformation numérique des systèmes industriels. Les jumeaux numériques, en combinant des modèles virtuels et des données en temps réel, permettent de reproduire avec précision le comportement des systèmes physiques. Ils sont essentiels pour la modélisation et l'optimisation des processus industriels, offrant une vision prédictive des performances et facilitant l'anticipation des anomalies. Cette transformation numérique permet non seulement d'optimiser les coûts, mais aussi d'accélérer l'innovation, réduisant ainsi le besoin d'expérimentations physiques et améliorant la flexibilité des processus de production.

Le premier chapitre a souligné les enjeux fondamentaux de la logistique moderne et les bénéfices associés à sa digitalisation. Cette mutation technologique permet une gestion plus fine des flux et ouvre la voie à des systèmes intelligents, capables d'anticiper les aléas et d'optimiser les opérations.

Le deuxième chapitre a approfondi le concept de jumeau numérique, en détaillant ses composantes, ses avantages et son intégration progressive dans le secteur industriel. À travers l'étude d'un atelier textile, un cas concret a été introduit, servant de base à l'application des concepts abordés.

Le troisième chapitre s'est concentré sur la modélisation de la chaîne logistique de cet atelier à l'aide du logiciel FlexSim. Ce travail a permis de construire un modèle dynamique représentant fidèlement les flux de production, de stockage et de distribution. Grâce à la visualisation en temps réel via une architecture distribuée, un véritable jumeau numérique opérationnel a été mis en place, capable d'éclairer les décisions stratégiques et d'anticiper les dysfonctionnements.

Le quatrième chapitre a présenté une analyse comparative de deux scénarios logistiques simulés, démontrant l'impact concret de la configuration des unités de production sur la performance globale du système. Les résultats ont montré qu'une répartition plus équilibrée des ressources permet d'améliorer les délais de livraison, de mieux répondre à la demande locale et de réduire les coûts logistiques.

CHAPITRE I :
Généralités sur les chaînes
logistiques industriels

I.1.Introduction

Dans un environnement industriel en constante évolution, la logistique occupe une place centrale dans la performance globale des entreprises. Elle permet d'assurer la fluidité des flux physiques et informationnels tout au long de la chaîne d'approvisionnement. Aujourd'hui, la digitalisation de la chaîne logistique s'impose comme une réponse stratégique aux exigences croissantes du marché, en améliorant la réactivité, la traçabilité et la prise de décision. Ce chapitre présente l'importance de la logistique en entreprise, les méthodes de gestion logistique, ainsi que les avantages et les enjeux liés à sa transformation numérique.

I.2. Rôle stratégique des chaînes logistiques dans les entreprises modernes

I.2.1. Fonction logistique en entreprise

La logistique est l'arme de mise en œuvre de la stratégie [1] elle constitue une fonction essentielle au sein des entreprises, en particulier celles de taille intermédiaire. Elle intervient dans la gestion des flux physiques et des ressources, en veillant à leur disponibilité en fonction des besoins opérationnels. Son objectif principal est d'optimiser l'organisation des moyens matériels, humains et informationnels pour atteindre les objectifs stratégiques fixés. En tant que fonction transversale, la gestion logistique interagit avec l'ensemble des départements et joue un rôle déterminant dans la performance globale de l'entreprise. [2]

I.2.2. Importance de la logistique en entreprise

La logistique occupe une place stratégique au sein de l'entreprise, car elle guide et structure l'ensemble de ses activités au sein de la chaîne logistique. Elle constitue un levier concurrentiel essentiel, en contribuant à renforcer la coordination entre les différents services de l'organisation. L'objectif commun à ces efforts est d'assurer la satisfaction du client.

Dans certains secteurs d'activité, la logistique représente un véritable avantage concurrentiel. Elle agit à différents horizons temporels : à court terme, elle permet d'optimiser les flux physiques [3] ; à moyen et long terme, elle implique la mise en œuvre de stratégies visant à améliorer des paramètres clés tels que le stockage, la production et la distribution. [2]

I.2.3. Gestion de la logistique d'une entreprise

La logistique en entreprise consiste à gérer tout ce qui concerne le transport et le stockage des produits de l'entreprise : véhicules nécessaires au transport, fournisseurs

de l'entreprise, entrepôts, manutention..., en optimisant leur circulation pour minimiser les coûts et les délais. [4]

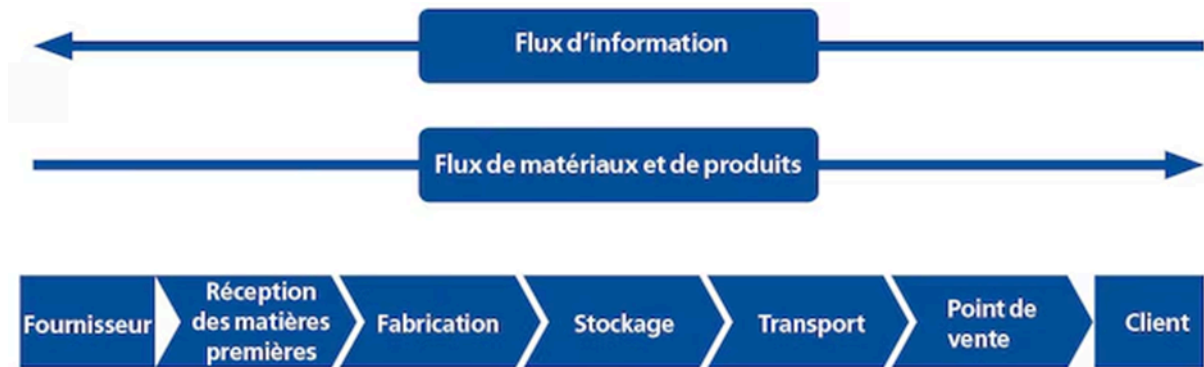


Figure I.1 : Différentes étapes de la chaîne logistique.[5]

La logistique est pilotée actuellement à l'aide des systèmes d'information de l'entreprise.

Il a l'obligation d'utiliser à l'occasion une codification claire et uniforme et recourir à la télétransmission des informations pour chaque rôle de l'entreprise afin qu'elle fonctionne à merveille.

La mission logistique s'efforce d'agencer les débits de production en synchronisme tout en allant chercher l'optimum des coûts en groupant les marchandises et pour alléger les délais de livraison [2].

I.3. Logistique interne vs logistique externe

La logistique peut être segmentée en deux grandes catégories : la logistique interne et la logistique externe. Cette distinction permet de mieux comprendre les rôles, les responsabilités et les enjeux liés à chaque niveau de gestion des flux.

I.3.1. Logistique interne

Également appelée intra-logistique, regroupe l'ensemble des opérations réalisées au sein même de l'entreprise. Elle couvre des fonctions telles que la gestion des stocks, la manutention, la planification de la production, ou encore la gestion des flux d'information internes. Ces activités visent à assurer une organisation efficace des ressources disponibles, à garantir la continuité de la production et à minimiser les pertes de temps et de matériaux. Comme le rappellent Chaib et al [45], une logistique interne bien structurée constitue un levier d'optimisation opérationnelle, notamment en lien avec les contraintes de réactivité et de flexibilité.

I.3.2. Logistique externe

La logistique externe concerne les opérations logistiques qui s'étendent en dehors des frontières de l'entreprise. Cela comprend le transport des marchandises, la distribution aux clients finaux, la gestion des retours et parfois même l'externalisation de certaines fonctions logistiques à des prestataires spécialisés. Cette dimension revêt une importance stratégique dans un environnement fortement concurrentiel, où la satisfaction du client dépend directement de la qualité de service offerte à l'externe [46]. Une logistique externe performante permet ainsi de maintenir des délais de livraison maîtrisés, tout en améliorant la traçabilité des flux et la relation client.

La coordination entre la logistique interne et externe est aujourd'hui devenue un enjeu central dans la gestion des chaînes d'approvisionnement. En effet, une séparation rigide entre ces deux fonctions peut entraîner des inefficacités, des ruptures d'information, voire des surcoûts logistiques. À l'inverse, une intégration fluide entre les opérations internes et les partenaires externes permet d'aligner les objectifs, d'améliorer la visibilité sur l'ensemble de la chaîne, et de favoriser la prise de décision collaborative. Comme l'indiquent Flynn, Huo et Zhao [47], l'intégration logistique interne et externe est un facteur déterminant de la performance globale, à condition qu'elle s'accompagne d'une volonté de partage d'information, de transparence et de coordination des processus.

Il convient de souligner que cette articulation entre les deux niveaux logistiques prend tout son sens dans le contexte de l'industrie 4.0, où les systèmes connectés et les outils numériques permettent de synchroniser les flux en temps réel, qu'ils soient internes ou externes. Le développement de solutions intégrées, telles que les ERP, les TMS (Transport Management Systems), ou les plateformes de collaboration inter-entreprises, facilite aujourd'hui cette convergence vers une chaîne logistique agile, réactive et pilotée par la donnée.

I.4. Impact de la transformation numérique sur l'évolution de la logistique

La logistique, traditionnellement perçue comme une fonction de soutien aux opérations, occupe désormais une place centrale dans la stratégie globale des entreprises. Cette évolution s'explique en grande partie par l'intégration croissante des technologies numériques dans les processus logistiques. Face à l'accélération des flux et à la complexité croissante des chaînes d'approvisionnement, la digitalisation apparaît comme une réponse incontournable pour renforcer l'agilité, la réactivité et la résilience logistique.



Figure I.2 : Impact du numérique sur la logistique moderne.

Aujourd'hui, la transformation digitale ne se limite plus à la simple automatisation des tâches. Elle implique une reconfiguration en profondeur de l'ensemble des processus métiers, y compris ceux liés à l'approvisionnement, au stockage, à la distribution et au transport. L'adoption d'outils comme l'intelligence artificielle, les objets connectés (IoT), ou encore l'analyse prédictive via les big data permet d'optimiser la prise de décision en temps réel et de réduire significativement les délais et les coûts liés aux opérations logistiques [40].

En outre, les réseaux numériques jouent un rôle déterminant dans la coordination des flux. Ils facilitent la transmission instantanée des informations entre les différents maillons de la chaîne logistique, permettant ainsi une meilleure synchronisation des opérations et une visibilité accrue sur l'ensemble du cycle logistique [41]. Cela favorise une gestion proactive des approvisionnements, une réduction des stocks excédentaires et une adaptation rapide aux évolutions de la demande.

Dans cette logique, la digitalisation devient un vecteur de performance globale. Elle offre aux entreprises la capacité non seulement de rationaliser leurs flux physiques, mais aussi de transformer leurs modèles organisationnels. Ainsi, la logistique moderne devient non plus un simple centre de coûts, mais un véritable levier de compétitivité, au service de la stratégie de croissance et de différenciation des entreprises [42].

Enfin, il convient de souligner que cette transition numérique n'est pas réservée aux grandes entreprises industrielles. Elle concerne également les structures de taille intermédiaire, pour lesquelles la logistique digitalisée constitue une opportunité

d'optimiser leurs ressources, d'améliorer la satisfaction client, et de s'intégrer plus efficacement dans des chaînes de valeur complexes et mondialisées.

I.5. Avantages et enjeux de la digitalisation de la chaîne logistique

I.5.1. Avantages de la digitalisation de la chaîne logistique

D'après une récente étude menée conjointement par le Council of Supply Chain Management Professional et Tools Group, expert dans le monde en solutions et logiciels de planification et d'optimisation de la chaîne logistique, 93 % des entreprises affirment être activement impliquées dans la digitalisation de leur chaîne logistique. Cette adoption étendue s'explique par les avantages stratégiques et concurrentiels significatifs qu'elle apporte aux entreprises [6] [7].

I.5.1.1. Réduction des coûts

L'automatisation et la digitalisation d'une chaîne logistique favorisent et améliorent une efficacité. Minimisent les erreurs humaines et accélèrent les processus contribuant à la réduction des coûts globaux cela permet aux équipes logistique de se libérer des tâches à moins valeur comme la saisie des bonnes livraisons afin de se focaliser sur des missions plus stratégiques.

I.5.1.2. Amélioration des prises de décision

L'acceptation des technologies innovantes telles que l'Internet des Objets, le BIG DATA et l'Intelligence Artificielle simplifie et favorise la prise de décision. En exploitant des flux de données précis, pertinents et actualisés en temps réel, avec le renforcement de l'agilité et la réactivité, les entreprises peuvent optimiser la gestion de leurs stocks et de leurs approvisionnements.

I.5.1.3. Améliorer la collaboration entre les différents acteurs

Cette mue numérique facilite et met en place également les échanges avec le réseau de fournisseurs et de partenaires commerciaux grâce à des outils tels que la messagerie EDI et les portails web. Cela contribue ainsi à améliorer la qualité plus grande, fiable et plus sûre des approvisionnements. À long terme, il est possible d'offrir un meilleur service au client final en réduisant les risques de rupture de stock et autres désagréments [7].

I.5.1.4. Grands enjeux de la digitalisation de la chaîne logistique

Afin de réussir la transformation numérique de sa chaîne d'approvisionnement, il y a plusieurs défis. Bien que la nature de ces défis dépende de la maturité de chaque entreprise, il reste trois enjeux incontournables concernant les outils techniques et les facteurs humains.

I.5.1.5. Système d'information et données

Aujourd'hui, l'un des principaux enjeux de la digitalisation de la chaîne logistique demeure avant tout technique. Cet enjeu se cristallise notamment autour de la modernisation du système d'information des entreprises, mais également autour de la qualité et de la disponibilité des données [7].

Pour réussir ce virage numérique, il est essentiel de disposer d'un socle technique solide, appuyé par des processus maîtrisés et une gouvernance efficace. Ce cadre constitue la base indispensable pour initier et soutenir une transformation digitale pérenne de la chaîne logistique.

I.5.1.6. Formation des équipes

L'insuffisance de collaborateurs qualifiés est aussi l'un des principaux handicaps à la digitalisation de la chaîne logistique. En cette qualité, un récent sondage intitulé « PwC's 2023 Digital Trends in Supply Chain Survey » met en évidence le fait que les deux tiers des décideurs s'attendent à ce que la digitalisation de leur chaîne d'approvisionnement doit comporter une certaine augmentation des compétences des collaborateurs.

En effet, les organisations ont besoin de compétences spécifiques (analyse de la donnée, modélisation statistique, etc.) pour avancer sur de tels projets stratégiques. Pourtant, le secteur de la chaîne logistique souffre d'une pénurie de talents. Il est donc indispensable pour les entreprises d'adapter leur stratégie de recrutement et de formation continue.[7]

I.5.2. Grands défis de la digitalisation de la chaîne logistique

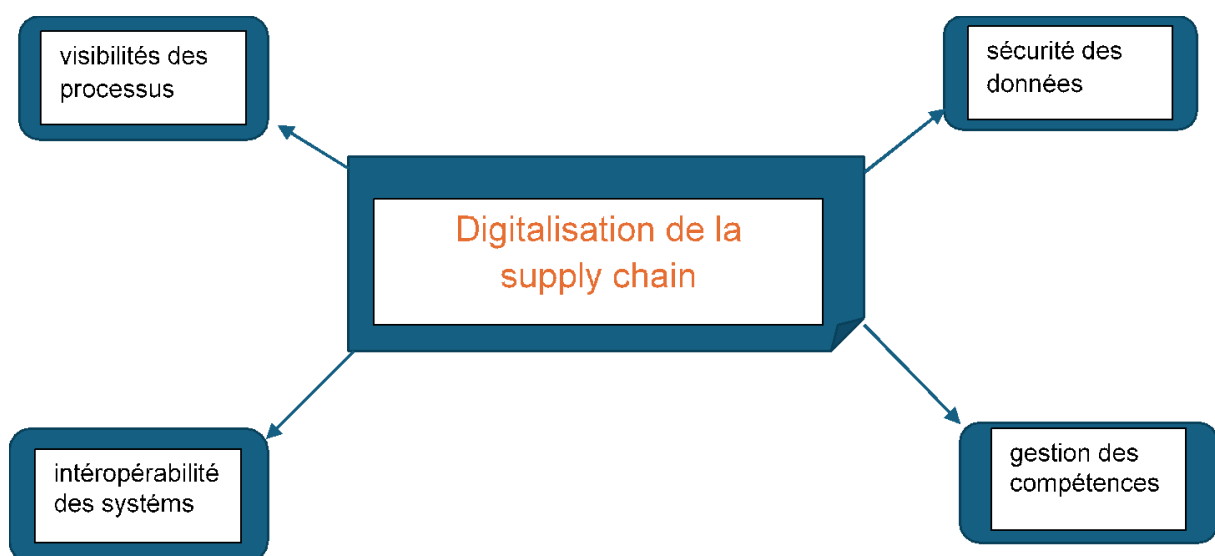


Figure I.3 : Grands défis de la digitalisation de la chaîne logistique.

I.6. Définition de l'Industrie 4.0

L'Industrie 4.0 symbolise l'entrée de l'industrie mondiale dans sa quatrième révolution, qui combine trois innovations technologiques, l'automatisation, l'internet des objets et l'intelligence artificielle pour créer des modèles industriels et économiques de rupture [8].

I.6.1 Principales caractéristiques de l'Industrie 4.0

1. Transformation technologique et numérique :

- Usines virtuelles, objets connectés, systèmes de production cyber-physiques, machines intelligentes, maintenance prédictive, impression 3D.
- Passage du logique push au logique pull (production sur demande, sans stocks).

2. Nouvelle logique économique :

- Optimisation du retour sur capital engagé (ROCE).
- Production flexible, personnalisée, localisée près de la demande.
- Réduction des coûts grâce aux technologies plus accessibles (capteurs, cobots, RFID...).

3. Transformation humaine et sociale :

- Apparition de nouveaux métiers (big data, cybersécurité et réalité virtuelle).
- Évolution des métiers existants vers des rôles plus empathiques et à forte valeur ajoutée.
- Amélioration de la qualité de vie au travail.

4. Changement de paradigme stratégique :

- Personnalisation de masse vs production de masse.
- Plus grande attractivité de l'industrie pour les jeunes.
- Repositionnement de pays comme la France ou le Japon [8].

I.7. Industrie 4.0 : Vers une nouvelle révolution industrielle, économique et sociale

L'Industrie 4.0, souvent qualifiée de quatrième révolution industrielle, ne se limite pas à une innovation technologique. Elle constitue une transformation systémique qui redéfinit en profondeur les modèles de production, les logiques économiques, les pratiques organisationnelles et les dynamiques sociales. Apparue en Allemagne en 2012, ce concept repose sur la convergence de trois technologies majeures : l'automatisation avancée, l'internet des objets (IoT) et l'intelligence artificielle, lesquelles permettent de

concevoir des systèmes de production cyber-physiques interconnectés et intelligents (Blanchet, 2017).

Contrairement à la production de masse héritée du taylorisme, le paradigme de l'Industrie 4.0 repose sur la personnalisation de masse, l'agilité, la flexibilité et la localisation des unités de production au plus proche de la demande. Ce nouveau modèle économique favorise une fabrication à la demande, sans stocks, et introduit une production adaptative et prédictive, plus efficiente et durable. Il remet également en question les mécanismes traditionnels de création de valeur, en optimisant le retour sur capital engagé (ROCE) grâce à une meilleure exploitation des actifs physiques, à la réduction des coûts de complexité et à l'intégration numérique des systèmes d'information.

Blanchet (2017) identifié cinq leviers technologiques fondamentaux de l'usine du futur :

1. **L'usine virtuelle**, permettant la simulation et l'industrialisation numérique des produits avant leur fabrication physique .
2. **L'automatisation des flux**, intégrant véhicules autonomes et cobots pour accroître la réactivité .
3. **Les machines intelligentes**, capables d'autocorrection et de fonctionnement autonome .
4. **La maintenance prédictive**, visant à anticiper les défaillances et à réduire les interruptions de production .
5. **Le cyber-système de production**, garantissant une personnalisation en temps réel grâce à une logique de production tirée par la demande (pull vs push).

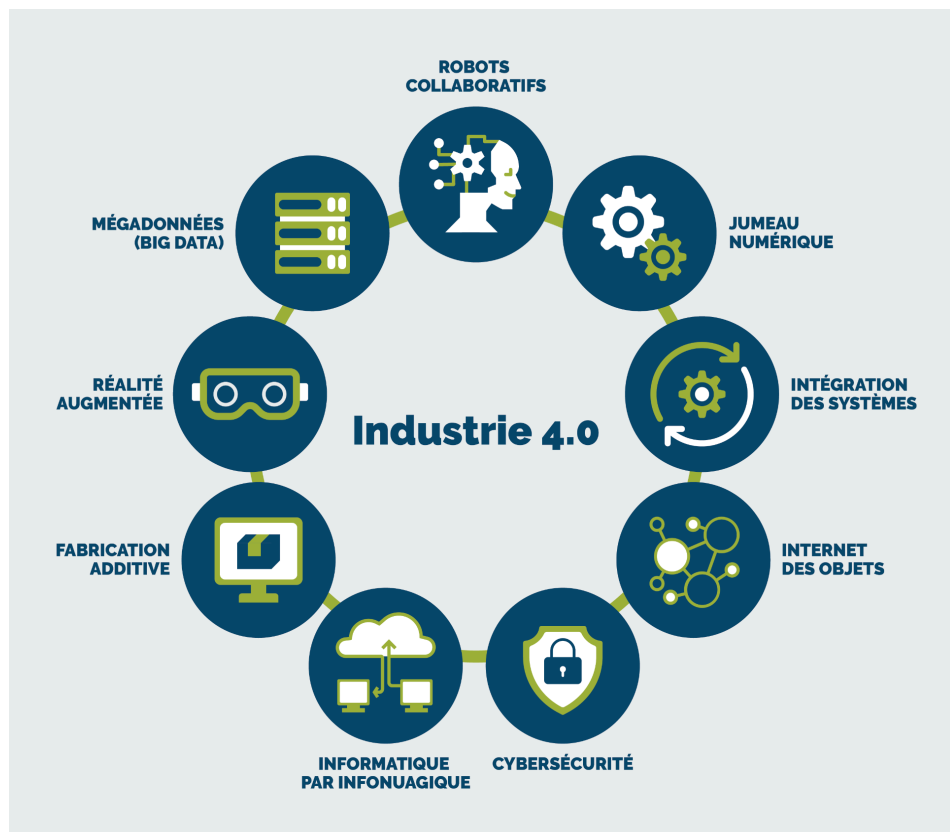


Figure I.4 : Leviers technologiques de la transformation numérique industrielle [9].

L'impact humain et organisationnel de cette mutation est également central. L'industrie 4.0 redéfinit les métiers existants en renforçant leur dimension empathique et collaborative, tout en simplifiant les tâches grâce à des interfaces intuitives (ex. : cobots, tablettes) [8]. De nouveaux emplois émergent dans les domaines du big data, de la cybersécurité, de la réalité augmentée ou encore de la gestion des systèmes cyber-physiques. Bien que cette révolution technologique puisse conduire à une réduction du nombre d'emplois industriels traditionnels, elle pourrait simultanément générer une relocalisation partielle de certaines activités et créer de nouvelles opportunités dans les services industriels.

Enfin, l'Industrie 4.0 se décline différemment selon les stratégies nationales. L'Allemagne mise sur la consolidation de sa compétitivité industrielle, la France y voit une opportunité de redémarrage industriel, les États-Unis ciblent la relocalisation de la production, tandis que la Chine et le Japon y perçoivent une solution à leurs contraintes structurelles respectives. Dans ce contexte, la transition vers ce nouveau modèle industriel ne saurait être uniforme ; elle s'inscrit dans des logiques différenciées, tant sur les plans économiques que sociaux [8].

I.8. Contribution des jumeaux numériques à l'Industrie 4.0

La transition vers l'Industrie 4.0 repose sur l'intégration croissante de technologies avancées permettant une convergence entre les mondes physique et numérique. Parmi ces technologies, le jumeau numérique (*digital twin*) occupe une place centrale en tant que réplique virtuelle d'un système ou d'un processus physique, alimentée par des données en temps réel. Son objectif principal est de simuler, surveiller, prédire et optimiser les performances du système réel tout au long de son cycle de vie [48].

Dans un contexte industriel, les jumeaux numériques permettent une meilleure maîtrise des opérations, notamment en matière de maintenance prédictive, de planification de production et de gestion de qualité. Leur rôle est particulièrement stratégique dans les environnements complexes où les décisions doivent être prises rapidement à partir de données multiples et variables [49].

L'un des domaines d'application les plus prometteurs des jumeaux numériques est la logistique, cœur névralgique de la chaîne d'approvisionnement. En logistique, le jumeau numérique permet de modéliser les entrepôts, les réseaux de transport, les flux de marchandises et les capacités de stockage. Il contribue à une amélioration de la visibilité sur la chaîne, à une optimisation des itinéraires, à la gestion des stocks en temps réel et à une réduction des temps d'arrêt [50]. Cette capacité à simuler différents scénarios logistiques permet aux entreprises d'anticiper les perturbations et d'adapter leurs stratégies en conséquence.

Cependant, la mise en œuvre de cette technologie soulève plusieurs défis, notamment en termes de standardisation des données, de cybersécurité, d'intégration intersystèmes et de coûts de déploiement. Ces contraintes techniques et organisationnelles peuvent freiner l'adoption à grande échelle, en particulier dans les petites et moyennes entreprises. Néanmoins, les perspectives restent encourageantes : les travaux de recherche récents visent à développer des modèles plus accessibles, interopérables et sécurisés, adaptés à divers secteurs industriels [51].

Ainsi, les jumeaux numériques constituent non seulement une brique technologique majeure de l'Industrie 4.0, mais aussi un levier d'innovation pour la logistique intelligente, en alignant performance opérationnelle et flexibilité décisionnelle.

I.9. Application des jumeaux numériques

a. Jumeau Numérique pour le pilotage en flux tiré Conwip (Dumoutier, Lions & Burlat,2022)

Dans le cadre de l'Industrie 4.0, Dumoutier, Lions et Burlat (2022) explorent l'intégration des jumeaux numériques dans la gestion des flux de production, en particulier à travers la méthode **Conwip** (Constant Work In Process). Traditionnellement utilisée pour maintenir un en-cours constant, cette méthode repose sur des tableaux physiques pour suivre l'avancement des ordres de fabrication. Cependant, la simple digitalisation de ces tableaux n'apporte que peu de valeur ajoutée, à moins d'y intégrer des fonctionnalités avancées offertes par un jumeau numérique.

Les auteurs proposent un modèle enrichi, où le jumeau numérique anticipe les files d'attente, prédit les dates de sortie des ordres de fabrication et génère un planning prévisionnel en temps réel. Cela permet non seulement d'optimiser les flux mais aussi d'améliorer la prise de décision, en offrant des prévisions plus fiables et un contrôle plus précis des ressources. Cette approche a montré des résultats positifs, notamment une réduction des délais de planification et une meilleure gestion des ressources grâce à une prise de décision plus autonome [27].

b. Jumeaux Numériques dans les Infrastructures

Dans l'industrie des infrastructures, le jumeau numérique émerge comme un outil clé pour la gestion durable et intelligente des actifs. Gürdür Broo et Schooling [28] analysent l'adoption des jumeaux numériques dans les grands projets d'infrastructure au Royaume-Uni. L'une des principales conclusions de leur étude est que, contrairement à des secteurs comme l'aéronautique ou la fabrication, l'industrie des infrastructures reste encore dans une phase expérimentale, bien que les bénéfices de cette technologie soient largement reconnus.

Les auteurs soulignent que les définitions des jumeaux numériques varient considérablement d'un projet à l'autre, rendant difficile une standardisation. Cependant, le principal avantage identifié par les professionnels du secteur réside dans l'optimisation de la gestion des actifs, notamment par une meilleure prévision des défaillances et une gestion proactive de la maintenance. Les défis sont toutefois nombreux, incluant la résistance au changement culturel, le manque de compétences numériques et la difficulté d'intégration des données provenant de systèmes disparates [28].

c. Jumeau Numérique pour le Pilotage de la Performance

Maher Barkallah et Mohamed Haddar se concentrent sur l'application du jumeau numérique dans le pilotage de la performance des ateliers de production. Il souligne que pour qu'un jumeau numérique soit efficace, il doit intégrer à la fois un jumeau de produit et un jumeau de processus, permettant ainsi de collecter des données en temps réel et d'optimiser les performances industrielles.

Les auteurs mettent en évidence que l'intégration d'un jumeau numérique dans la gestion de la production permet non seulement de mesurer la performance en continu, mais aussi de prédire les futures performances grâce à des simulations basées sur des données actuelles. Ce système de pilotage prévisionnel aide à anticiper les problèmes potentiels et à ajuster les stratégies de production en conséquence, améliorant ainsi l'efficacité opérationnelle et réduisant les coûts [29].

d. Applications dans le domaine médical

L'usage des jumeaux numériques en santé constitue une avancée significative dans la transformation numérique du secteur médical. Le jumeau numérique permet de créer une représentation virtuelle d'organes ou de systèmes biologiques, facilitant ainsi la personnalisation des soins et l'optimisation des traitements.

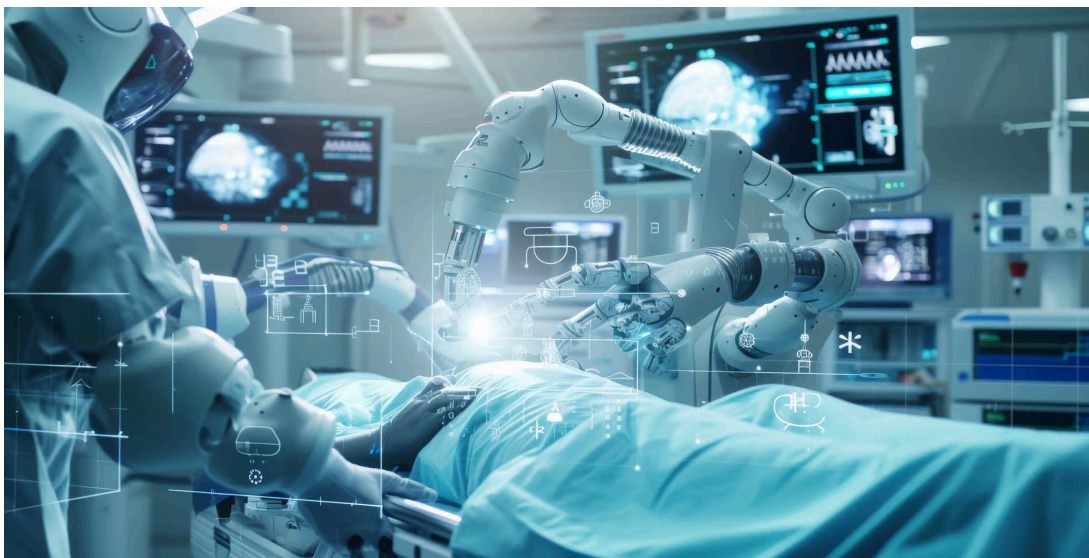


Figure 1.5 : Application du jumeau numérique en chirurgie assistée par robot [43].

Par exemple, Dassault Systèmes, en collaboration avec la Food and Drug Administration (FDA), a développé un jumeau numérique du cœur humain, utilisé pour évaluer les performances de dispositifs médicaux comme les pacemakers. Ce modèle permet de simuler des interventions et de mieux comprendre le comportement du cœur

dans diverses conditions cliniques (Dassault Systèmes & FDA, cité dans ResearchGate, 2023) [30].

Alcimed également l'utilisation de jumeaux numériques dans la médecine personnalisée. Ces technologies permettent la planification de chirurgies complexes et la simulation de réactions aux traitements, ouvrant la voie à une médecine plus prédictive et adaptée à chaque patient [31].

Enfin, selon KnowHow , l'intégration de capteurs connectés à des jumeaux numériques permet une surveillance continue de l'état de santé. Cette approche favorise la prévention grâce à une détection précoce des anomalies physiologiques [32].

e. Apport des jumeaux numériques à la maintenance et au suivi des infrastructures linéaires

Le secteur des infrastructures bénéficie également des capacités des jumeaux numériques, notamment pour la gestion et la maintenance des ouvrages.

Dans sa thèse, Yvan Tchana De Tchana propose un cadre d'intégration des jumeaux numériques dans la gestion d'infrastructures linéaires, en combinant les technologies BIM (Building Information Modeling) et PLM (Product Lifecycle Management). Cette approche vise à améliorer la coordination, la traçabilité et la performance opérationnelle tout au long du cycle de vie des infrastructures [33].

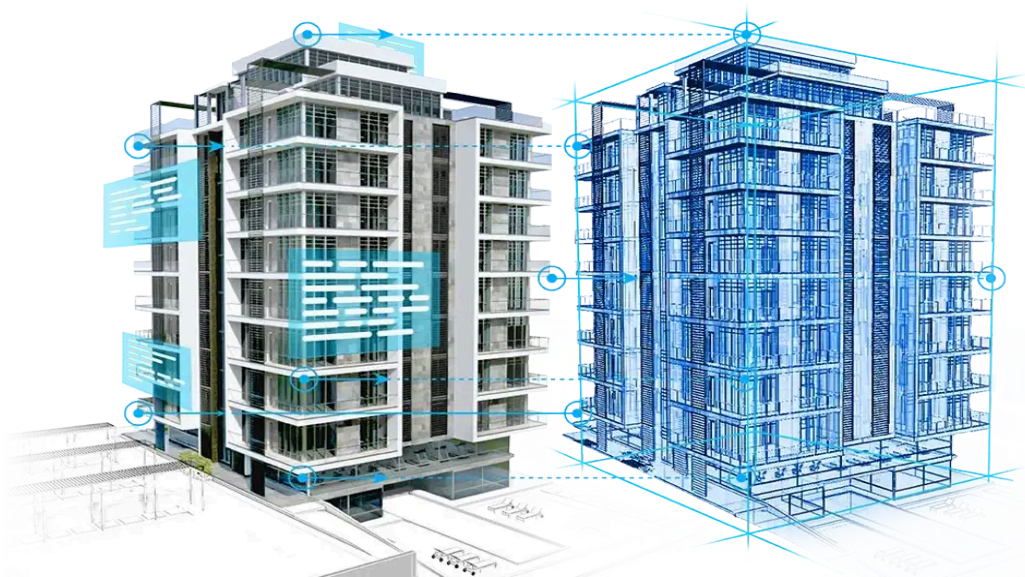


Figure 1.6 : Visualisation d'un jumeau numérique appliqué au secteur du bâtiment [44]

La société Innowise met en évidence l'usage des jumeaux numériques dans la maintenance prédictive des bâtiments. En surveillant en temps réel l'état des structures,

ces outils permettent d'anticiper les défaillances, de réduire les coûts d'entretien et d'augmenter la durée de vie des équipements [34].

Enfin, Josse (2024) explore les usages à grande échelle des jumeaux numériques dans la planification urbaine et territoriale. Selon lui, ces technologies peuvent simuler les impacts environnementaux, optimiser l'utilisation des ressources et accompagner les décisions d'aménagement dans une logique de durabilité [35].

I.10. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les fondements de la logistique en entreprise, en mettant en évidence son rôle essentiel dans la gestion des flux de matières et d'informations. Nous avons également abordé les enjeux liés à l'optimisation de la chaîne logistique, ainsi que les avantages qu'offre sa digitalisation. La transformation numérique, en particulier à travers l'intégration de technologies innovantes, permet aujourd'hui d'améliorer la réactivité, la traçabilité et la performance globale des chaînes logistiques. Ces éléments constituent une base indispensable pour comprendre les évolutions actuelles du secteur et les applications concrètes qui seront explorées dans les prochains chapitres.

CHAPITRE II :

**APPLICATION DES JUMEAUX
NUMÉRIQUE DANS LA CHAÎNE
LOGISTIQUE**

II .1.Introduction

Le jumeau numérique représente aujourd’hui une avancée clé dans le processus de transformation digitale des systèmes industriels. Ce concept, qui repose sur la création d’une réplique virtuelle dynamique d’un système physique, s’inscrit dans une logique d’optimisation, de prédiction et de contrôle intelligent. Afin de mieux comprendre son intérêt et son fonctionnement, ce chapitre retrace les origines du jumeau numérique, propose une définition claire, et détaille ses composantes, ses types, ainsi que les bénéfices qu’il offre dans un contexte industriel.

En complément de cet aperçu théorique, une présentation du cas d’étude retenu dans le cadre de ce mémoire est proposée. Il s’agit d’un atelier de confection textile composé de deux unités de production, qui servira de base à la modélisation et à la simulation de la chaîne logistique via un jumeau numérique.

II.2. Concepts des jumeaux numériques

II.2.1. Histoire de la technologie de jumeau numérique

L’idée des jumeaux numériques a été évoquée pour la première fois en 1991 dans le livre *Mirror Worlds* de David Gelernter. Mais c’est en 2002 que le Dr Michael Grieves, professeur à l’université du Michigan à l’époque, a appliqué cette idée à l’industrie manufacturière et a officiellement présenté l’idée d’un logiciel de jumeau numérique. En 2010, John Vickers, de la NASA, a popularisé quant à lui le terme « jumeau numérique ».

Cependant, l’utilisation d’une réplique virtuelle pour étudier un objet physique remonte à bien plus loin. Dès les années 1960, la NASA utilisait déjà ce principe dans ses missions spatiales en reproduisant au sol chaque vaisseau spatial afin de permettre des analyses et des simulations par ses équipes. On peut donc considérer l’agence spatiale comme l’un des précurseurs de cette technologie.

- **Années 2000** Le concept de "Digital Twin" a été formalisé par **Michael Grieves** à l’Université du Michigan dans un contexte de gestion du cycle de vie des produits (PLM).
- **Origines industrielles** Le terme a été popularisé par la NASA pour simuler les navettes spatiales et leurs comportements en orbite.
- **Évolution technologique** Avec l’essor de l’Internet des Objets (IoT), du Big Data et de l’intelligence artificielle, les jumeaux numériques sont devenus des outils puissants pour la modélisation, la simulation et l’optimisation en temps réel.
- **Industrie 4.0** Dans les années 2010, ils s’imposent comme une brique clé de la transformation numérique des entreprises, notamment dans l’automobile, l’aéronautique, et la fabrication agile [10][11]

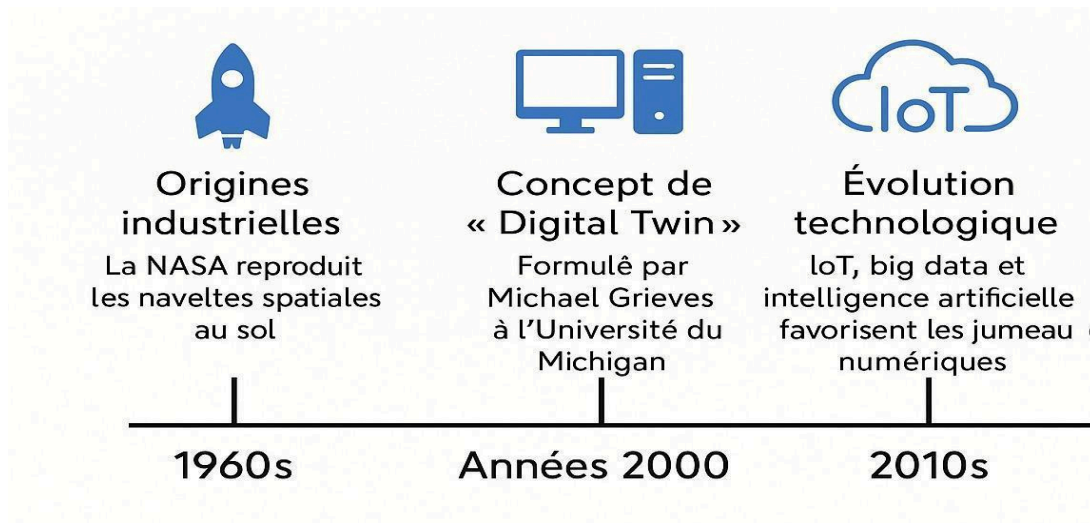


Figure II.1 : Histoire de la technologie des jumeaux numériques .

II.2.2. Historique du concept de jumeau numérique selon Grieves et Vickers (2017)

Le concept de jumeau numérique (ou *Digital Twin*) trouve ses origines au début des années 2000, dans le domaine de la gestion du cycle de vie des produits (*Product Lifecycle Management*, PLM). Il a été formulé pour la première fois par **Michael Grieves** en 2002, avec pour objectif de créer une représentation numérique fidèle d'un produit physique. Cette représentation virtuelle permettait de superviser, simuler et optimiser l'ensemble des phases du cycle de vie d'un produit, depuis sa conception jusqu'à sa mise hors service [12].

Le développement du concept a été fortement influencé par les travaux menés au sein de la **NASA**, notamment dans le cadre de ses programmes aérospatiaux. L'agence spatiale américaine utilisait déjà des modèles numériques détaillés pour reproduire virtuellement les comportements de ses systèmes physiques, ce qui a permis d'acquérir une expérience précieuse en matière de simulation à distance. Un exemple emblématique est celui de la mission Apollo 13, durant laquelle des modèles numériques ont été utilisés pour analyser des pannes et assister les équipes au sol dans la résolution des problèmes. Ces pratiques ont jeté les bases du jumeau numérique tel qu'il est envisagé aujourd'hui.

Grieves a ensuite formalisé le concept autour de trois composantes fondamentales :

- L'entité physique réelle,
- Sa représentation numérique virtuelle,
- les flux d'informations bidirectionnels qui assurent la synchronisation entre les deux.

Cette structure tripartite permet de créer une interaction dynamique entre le système réel et sa copie numérique, ouvrant ainsi la voie à des capacités d'analyse, de simulation et de prise de décision en temps réel.

Enfin, le concept de jumeau numérique a évolué de manière significative avec l'intégration de technologies récentes telles que l'Internet des Objets (IoT), le cloud computing, la modélisation 3D, les systèmes de simulation avancée, ainsi que l'exploitation du Big Data et de l'intelligence artificielle. Ces avancées ont renforcé la capacité des jumeaux numériques à représenter fidèlement des systèmes complexes et à anticiper leurs comportements futurs dans des environnements dynamiques [12].

II.2.3. Définition du jumeau numérique

Un jumeau numérique est une réplique virtuelle d'un objet physique (comme un système), créée pour en imiter les caractéristiques avec précision. Il suit l'ensemble du cycle de vie de cet objet, se mettant à jour en temps réel grâce aux données recueillies. En intégrant des outils comme la simulation, l'apprentissage automatique (machine learning) et des mécanismes de raisonnement, il permet de prendre des décisions plus éclairées et efficaces [11]. Autrement dit, Un jumeau numérique est un ensemble de constructions virtuelles d'information qui décrit entièrement un produit manufacturé, potentiel ou réel, depuis le niveau micro-atomique jusqu'au niveau macro-géométrique. [13].

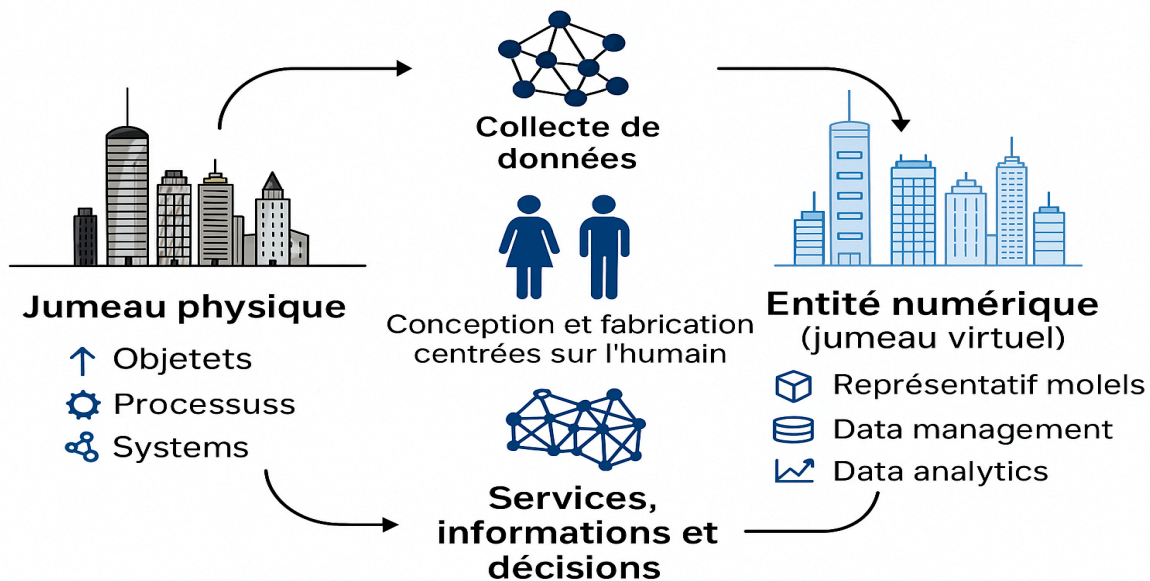


Figure II.2: Jumeau numérique : de la collecte de données à la prise de décision [14].

Le jumeau numérique offre à l'utilisateur un accès continu, tout au long du cycle de vie du système, aux informations, analyses et recommandations les plus pertinentes. Il permet de disposer à tout moment d'une représentation précise de l'état et du fonctionnement du système étudié. Par le biais de la simulation, il devient possible d'anticiper le comportement du système physique à l'aide d'un modèle numérique

évolutif. Cette représentation contribue ainsi à une prise de décision éclairée, fondée sur l'exploitation et l'analyse des données disponibles [15].

II.2.4. Emergence du jumeau numérique dans le contexte de l'industrie 4.0

La transformation progressive de l'industrie vers le paradigme de l'industrie 4.0 représente un véritable défi pour le secteur manufacturier. Cette mutation s'appuie sur l'intégration de technologies avancées, parmi lesquelles le jumeau numérique (JN) occupe une place centrale. Considéré comme l'un des concepts-clés de l'industrie du futur, le jumeau numérique suscite un intérêt croissant tant dans la recherche que dans les applications industrielles.

Toutefois, grâce aux travaux de recherche menés au sein de la communauté scientifique et industrielle, la compréhension du concept s'est progressivement clarifiée. Il convient néanmoins de souligner que le jumeau numérique est parfois confondu avec d'autres outils ou approches tels que la simulation ou la simple visualisation, ce qui peut en complexifier la mise en œuvre [13] [16], la notion de jumeau numérique basé sur ses origines dans les premières définitions proposées par Michael Grieves [13] et parallèlement, par Glaessgen et Stargel. Dès ses débuts, le JN est envisagé comme une réplique numérique fidèle de son équivalent physique, formant ainsi une sorte de miroir entre le monde réel et le monde virtuel.

Cependant, en raison de la jeunesse du concept, de sa complexité technique, ainsi que des perspectives prometteuses qui l'entourent, la compréhension du jumeau numérique a parfois été biaisée ou simplifiée à l'excès. Cette situation a contribué à une diffusion partielle, voire inexacte, de ce que recouvre réellement cette technologie.

Une avancée significative dans la définition du JN a été proposée par Tao et al. (2018) [17]. Ces auteurs reprennent les bases posées par Grieves [13]. Mais y ajoutent explicitement deux dimensions essentielles : la donnée et le service. Ces éléments renforcent la vision du JN comme un système intégré, capable d'interagir dynamiquement avec son environnement réel.

Afin d'apporter davantage de clarté à cette notion, **Jones et al.** ont réalisé une synthèse approfondie de la littérature existante. Leur travail a permis de faire émerger douze dimensions qui permettent de décrire et de caractériser un jumeau numérique de manière plus structurée. [18].

Au fil des années, de nombreuses autres revues de la littérature ont vu le jour, contribuant progressivement à démystifier le concept et à mieux en définir les contours. Ces efforts témoignent d'un intérêt scientifique croissant et d'une volonté de structurer une technologie encore en pleine évolution [16].

II.2.5. Définitions adaptées à chaque domaine d'application

Le jumeau numérique (JN) est une technologie polyvalente, utilisée dans des secteurs très variés. Cette diversité d'applications a conduit à l'émergence de définitions spécifiques selon les domaines. Par exemple, Stark et al (2014) [19] ont proposé une définition centrée sur la gestion du cycle de vie des produits, tandis que Negrie et al. (2017) [20] ont formulé une approche plus adaptée au secteur manufacturier.

Ces définitions sectorielles ont l'avantage de mieux cadrer l'usage du JN dans un contexte donné. Elles aident à comprendre plus concrètement les possibilités offertes par cette technologie et à déterminer comment l'implémenter de manière efficace dans un environnement particulier.

Toutefois, cette spécialisation peut aussi poser un problème : en se focalisant sur des usages précis, ces définitions peuvent réduire la portée globale du concept. En d'autres termes, en limitant la vision du jumeau numérique à un seul champ d'application, on risque de passer à côté de son potentiel transversal, pourtant essentiel dans une perspective d'innovation interdisciplinaire [16].

II.2.6. Définition et niveau d'intégration du fil numérique

Afin de mieux comprendre le JN et de lui associer des fonctionnalités, des cas d'usages, des technologies, une décomposition en sous-catégories suivant son niveau de connexion automatisée entre le réel et le virtuel a été proposé par Kritzinger et al. en 2018 [21]. Cette communication entre le réel et le virtuel est nommée « fil numérique ». Les trois sous-catégories proposées sont le « modèle numérique » où la communication est complètement manuelle, « l'ombre numérique » où la communication monodirectionnelle entre le réel et le virtuel est automatisée, et le « jumeau numérique » où le niveau de communication est bidirectionnel entre le réel et le virtuel. Cette décomposition fait actuellement débat au vu des avancées de la recherche sur le JN [16] [22].

II.2.7. Composition du jumeau numérique

❖ Une agrégation de technologie

Le jumeau numérique se présente comme une agrégation de technologies, conçue pour répondre aux besoins complexes tout au long du cycle de vie d'un produit ou d'un système. Parmi ces technologies, la simulation joue un rôle important, mais elle ne constitue qu'un élément intégré parmi d'autres. Contrairement aux simulations traditionnelles, qui reposent sur des données théoriques et des conditions initiales figées, la simulation au sein d'un jumeau numérique s'appuie sur des données réelles et actuelles, permettant ainsi d'obtenir des résultats plus réalistes et adaptés au contexte.

Le jumeau numérique offre donc une vision enrichie et dynamique du système physique, bien au-delà des capacités d'une simulation classique.

❖ Composition du jumeau numérique

Le jumeau numérique se structure généralement autour de trois composantes essentielles : **une entité physique réelle, une réplique virtuelle, et une couche de services**. La connexion entre le monde réel et sa représentation numérique est assurée par ce que l'on nomme le fil numérique, qui permet une communication bidirectionnelle et en temps réel entre les deux entités.

La composante physique désigne l'objet, le système ou le processus observé dans le monde réel, tandis que sa contrepartie virtuelle en reproduit fidèlement les caractéristiques, le comportement et les états. Cette synchronisation constante repose sur l'acquisition, la transmission et le traitement continu de données.

La couche de services constitue un élément déterminant du jumeau numérique. Elle permet non seulement de surveiller et d'analyser l'état du système, mais également de prédire son évolution [16]. Ces services peuvent être mobilisés à différentes fins : compréhension des causes d'un dysfonctionnement, anticipation des défaillances, optimisation des performances ou encore simulation de scénarios futurs.

Dans un contexte industriel, ces fonctionnalités sont susceptibles de bénéficier à une diversité d'acteurs. Les opérateurs peuvent, par exemple, s'appuyer sur le JN pour améliorer la précision de leurs actions, tandis que les décideurs peuvent l'exploiter comme un outil d'aide à la décision stratégique, afin d'optimiser les indicateurs de performance et de réduire les coûts opérationnels.

En outre, le JN apporte une valeur ajoutée significative grâce à des fonctionnalités telles que la maintenance prédictive, la simulation avancée ou l'amélioration continue des processus. Ces capacités permettent de limiter les arrêts non planifiés, de prolonger la durée de vie des équipements, et d'accroître l'efficacité globale du système.

Cette modularité fonctionnelle rend le jumeau numérique adaptable à une grande variété de secteurs, tels que la fabrication industrielle, la santé, ou encore le bâtiment. Elle confirme ainsi la pertinence du concept dans des contextes multiples, tout en soulignant sa scalabilité en fonction des besoins spécifiques de chaque domaine.

Enfin, il convient de souligner que les technologies sous-jacentes aux JN évoluent rapidement et ne sont pas encore entièrement standardisées. L'adoption de normes ouvertes constitue un levier essentiel pour favoriser l'interopérabilité, la durabilité et l'évolution continue de ces systèmes dans un environnement technologique en perpétuelle transformation [16].

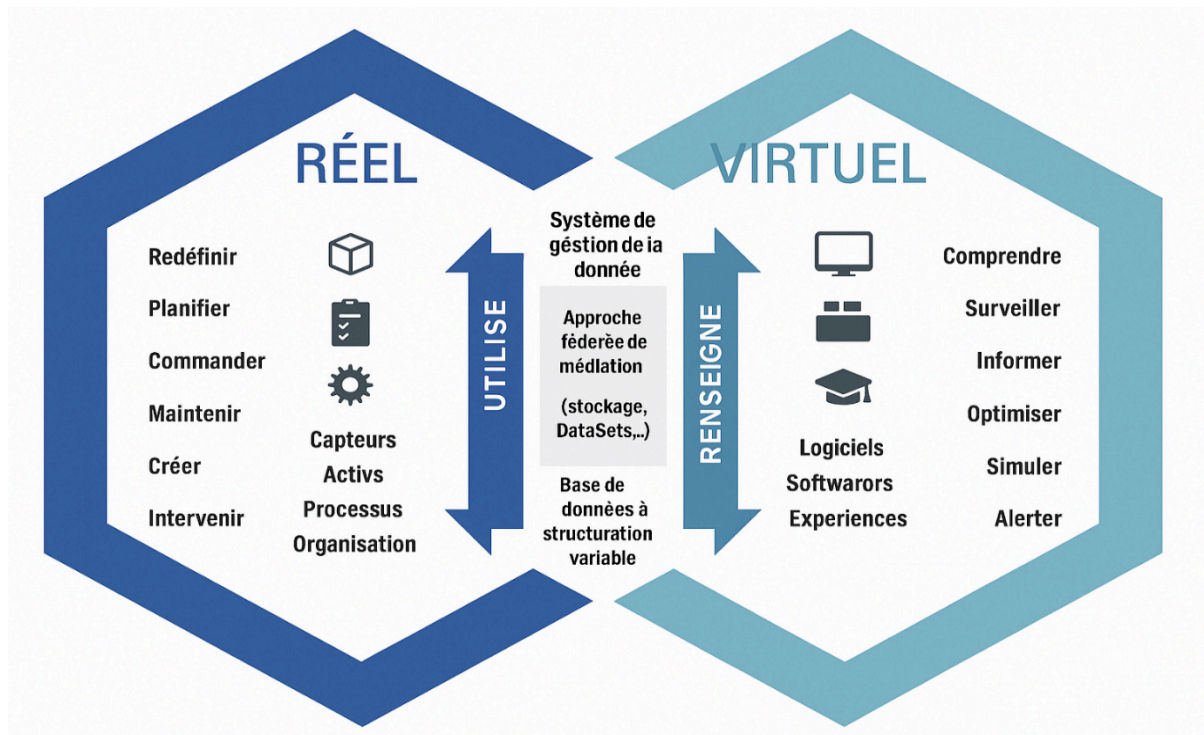


Figure II.3 : Lien entre la représentation physique et numérique [23].

La figure II.3 illustre la circulation continue des flux de données entre le monde réel (physique), constitué notamment de capteurs et d'actionneurs, et son double numérique (virtuel), constamment mis à jour.

II.2.8. fonctionnement d'un jumeau numérique

Le concept de jumeau numérique repose sur l'analyse continue des flux de données recueillies par des capteurs positionnés tout au long du processus matériel. Ces capteurs enregistrent des informations relatives à l'évolution des produits, transmises en temps réel à une plateforme numérique. Celle-ci procède à une analyse quasi instantanée en vue d'optimiser le processus de manière transparente et continue. Ce dispositif permet non seulement d'analyser les données et de contrôler le système, mais également de prédire d'éventuelles défaillances, facilitant ainsi des interventions proactives et des réparations anticipées [24]. Et aussi que Le concept de jumeau numérique repose sur la reproduction numérique en temps réel d'un système physique, rendue possible par la collecte continue de données issues de capteurs intégrés. Ces capteurs permettent de surveiller en permanence différents paramètres critiques liés à l'état et au fonctionnement de l'objet étudié. Par exemple, dans le cas d'une éolienne, les capteurs peuvent mesurer la production d'énergie, la température des composants ou encore les conditions météorologiques environnantes. Ces données, une fois collectées, sont transmises à une plateforme numérique dédiée [11].

La plateforme traite ces informations et les intègre dans un modèle virtuel qui reproduit fidèlement le comportement du système physique. Ce modèle offre une visualisation dynamique, mais également des capacités d'analyse avancées permettant de détecter en temps réel les écarts ou anomalies. Le jumeau numérique ne se limite donc pas à une simple fonction de surveillance : il constitue un véritable outil d'aide à la décision. Il permet d'optimiser les processus, d'anticiper les défaillances potentielles, et de planifier des interventions ciblées avant qu'un incident ne survienne.

De plus, il offre la possibilité de simuler divers scénarios opérationnels afin d'évaluer l'impact de certaines décisions ou de tester des pistes d'amélioration. Cette approche s'inscrit dans une dynamique d'amélioration continue, où chaque donnée captée enrichit le modèle virtuel, renforçant ainsi sa capacité d'adaptation et d'optimisation. L'objectif principal est d'accroître la fiabilité, l'efficacité et la résilience du système physique par le biais de son double numérique [11].

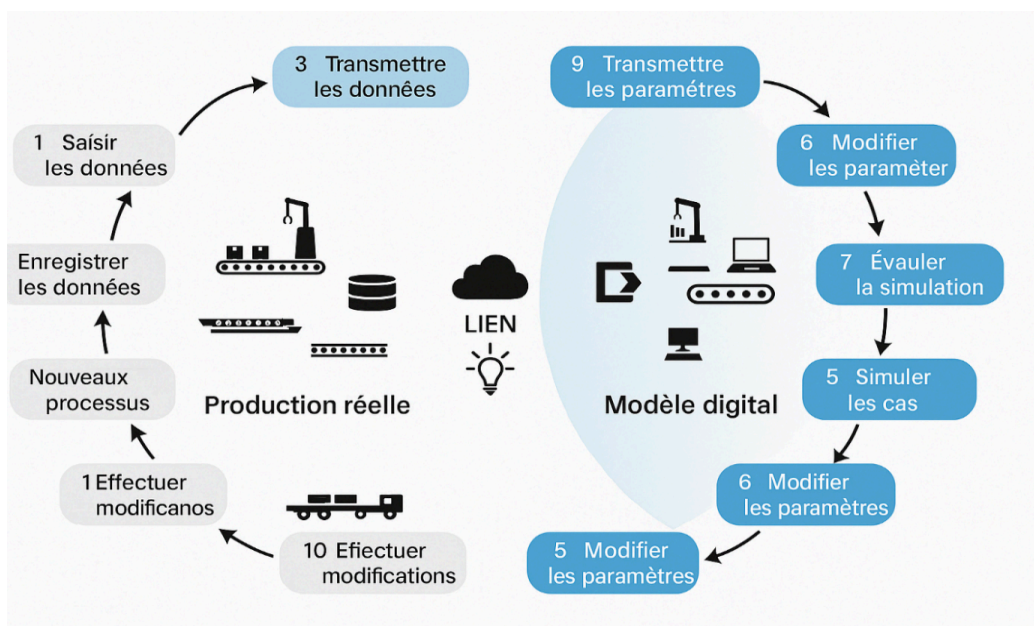


Figure II.4 : Fonctionnement du jumeau numérique dans un système de production [25].

Les éléments évoqués sont détaillés dans les sections suivantes :

1. Saisis des données

Cette première étape consiste à collecter les données provenant du système physique (production réelle). Ces données peuvent inclure des mesures de capteurs, des observations humaines ou des historiques de production.

2. Enregistrement des données

Une fois les données captées, elles sont enregistrées dans un système informatique ou une base de données industrielle. Cette phase assure la traçabilité et la conservation de l'information.

3. Transmission des données

Les données enregistrées sont ensuite transmises vers le modèle digital via une connexion réseau. Cette transmission peut être continue (temps réel) ou périodique selon l'architecture du système.

4. Analyse & évaluation des données

Le modèle digital traite et analyse les données reçues à l'aide d'algorithmes (statistiques, IA, Machine Learning...). L'objectif est d'interpréter les performances du système, détecter des anomalies, ou anticiper des dérives.

5. Modification des paramètres

Après analyse, les ingénieurs ou le système intelligent peuvent ajuster certains paramètres dans le modèle digital pour tester des améliorations ou corriger des problèmes.

6. Simulation des cas

Le modèle digital simule plusieurs scénarios à partir des nouveaux paramètres. Cela permet d'évaluer les impacts potentiels sans prendre de risque dans la production réelle.

7. Évaluation de la simulation

Les résultats des simulations sont analysés pour en mesurer l'efficacité, les coûts, les délais, ou les performances. Cette étape permet de sélectionner les meilleures options à appliquer dans la réalité.

8. Enregistrement des résultats

Les résultats des évaluations sont enregistrés pour documenter les scénarios testés et conserver une base de connaissance numérique pour des améliorations futures.

9. Transmission des paramètres

Les paramètres validés ou optimisés sont envoyés depuis le modèle digital vers le système physique. Cette étape ferme la boucle du jumeau numérique en permettant une interaction descendante (du digital vers le réel).

10. Effectuer des modifications

Dans l'atelier ou la ligne de production, les opérateurs ou les systèmes automatisés appliquent les ajustements : réglages de machine, changement d'ordre de fabrication, modification de planning...

11. Nouveaux processus

Grâce aux modifications appliquées, de nouveaux processus plus performants peuvent être mis en place. La production entre dans une phase d'amélioration continue, renforcée par les capacités prédictives du jumeau numérique.

II.2.9.Types de jumeaux numériques

Les jumeaux numériques se définissent en de nombreux types, selon le niveau de détail du produit ou du système étudié. La principale variation entre ces types est dans leur champ d'application. Il n'est pas étonnant que plusieurs jumeaux numériques soient présents dans un même processus ou système afin de veiller à une modélisation plus exhaustive. Voyons à présent de manière détaillée les différents types de jumeaux numériques et leurs applications [11].

II.2.9.1. Jumeaux de composants ou de pièces

Les jumeaux de composants sont l'élément clé d'un jumeau numérique, reprenant un composant fonctionnel. Les jumeaux de pièces suivent le même principe, mais il s'agit là sur des éléments moins envergurant dans le système.

II.2.9.2. Jumeaux d'actifs

Quand un ensemble de composants interagit pour créer un système fonctionnel, on a affaire à un actif. Les jumeaux d'actifs décrivent ces interactions et il est possible d'étudier leur fonctionnement global. Les jumeaux d'actifs donnent ainsi des données exploitables qui peuvent être converties en informations précieuses pour optimiser les performances.

II.2.9.3. Jumeaux de systèmes or d'unités

À un niveau d'agrandissement supérieur, les jumeaux de systèmes ou d'unités offrent une vue d'ensemble sur la manière dont les différents actifs s'assemblent pour former un système fonctionnel complet. Ces jumeaux fournissent une visibilité sur les interactions entre les actifs et peuvent suggérer des pistes d'amélioration des performances.

II.2.9.4 .Jumeaux numériques de processus

Les jumeaux de processus, qui représentent une vue d'ensemble à un niveau macro, montrent comment les différents systèmes interagissent pour créer un ensemble de production cohérent. Ces systèmes sont-ils parfaitement synchronisés pour fonctionner à leur pleine capacité ? Ou bien, des retards dans l'un d'eux ont-ils un impact sur les autres, Les jumeaux de processus permettent de visualiser les schémas de synchronisation précis qui déterminent l'efficacité générale du système [11].

II.2. 10. Atouts et avantages des jumeaux numériques

II.2. 10.1. Optimisation de la recherche et du développement

Grâce aux jumeaux numériques, la recherche et la conception de produits deviennent plus performantes, bénéficiant d'une multitude de données sur les performances potentielles. Ces informations précieuses permettent aux entreprises d'optimiser leurs produits et d'apporter des améliorations avant même leur mise en production.

II.2. 10.2. Amélioration de l'efficacité

Même après le lancement d'un produit, les jumeaux numériques offrent une surveillance continue des systèmes de production. Ils permettent d'optimiser les performances et de garantir une efficacité maximale tout au long du processus de fabrication.

II.2. 10.3. Fin de vie du produit

Les jumeaux numériques peuvent également aider les fabricants à déterminer la meilleure façon de traiter les produits arrivés en fin de cycle, que ce soit par le recyclage ou d'autres mesures. Grâce à ces jumeaux, ils peuvent identifier les matériaux récupérables dans les produits.

II.2.11.Marché des jumeaux numériques et secteurs d'activité

II.2. 11.1. Utilisation sélective des JN selon les besoins industriels

Malgré leurs multiples avantages, les jumeaux numériques ne sont pas toujours nécessaires pour tous les constructeurs ni pour tous les produits. Certains produits, trop dépourvus de complexité, n'ont pas besoin du grand volume de données créé par les

capteurs. En outre, la génération d'un jumeau numérique est un investissement considérable, ce qui peut ne pas être rentable pour certaines entreprises, eu égard aux coûts associés à la modélisation d'une réplique fidèle d'un objet physique.

Cependant, certains projets tirent un bénéfice direct de l'utilisation de modèles numériques :

- **Grande échelle projets** : les constructions, les ponts et les autres grands composants complexes sont soumis à des directives de conception stricte.
- **Projets mécaniquement sophistiqués** : turbines à réaction, voitures et avions, où les jumeaux numériques contribuent à optimiser l'efficacité des machines complexes et des moteurs puissants.
- **Appareils énergétiques** : ils sont à la fois les organes de production et de transmission d'énergie.
- **Industriel applications** : les jumeaux numériques sont un excellent moyen d'optimiser la performance des processus dans des environnements industriels, avec des systèmes de machines connectés [11].

II.2. 11.2. Applications

Les jumeaux numériques sont déjà largement utilisés dans les domaines suivants :

a) Équipements de production d'énergie

Les gros moteurs, comme les moteurs à réaction, les moteurs de locomotives et les turbines d'énergie production, bénéficient considérablement des jumeaux numériques. Les jumeaux numériques permettent notamment l'optimisation de la préparation des opérations de maintenance préventive.

b) Structures et leurs systèmes

Les jumeaux numériques ont un rôle central dans la conception et l'exploitation des infrastructures de grande envergure, tels que les immeubles de grande hauteur ou les plateformes offshore. Les jumeaux numériques ne permettent pas seulement d'optimiser la phase de conception, mais aussi de représenter et d'améliorer les systèmes internes, tels que le chauffage, la ventilation et la climatisation (CVC).

c) Opérations de fabrication

Désignés pour une représentation fidèle du tout-cycle de vie d'un produit, les jumeaux numériques sont présents dans toutes les étapes du processus de production

(11). De la création jusqu'à la production finale, en passant par les étapes intermédiaires, ils sont essentiels à l'optimisation et au suivi du développement des produits.

d) Services de santé

À l'image des produits modélisés par des jumeaux numériques, les patients dans le domaine de la santé peuvent également être suivis grâce à cette technologie. Les capteurs collectent des données en temps réel sur différents indicateurs de santé, permettant ainsi une surveillance continue et la génération d'informations essentielles pour les soins médicaux.

e) Secteur automobile

Dans le secteur automobile, où les véhicules intègrent de nombreux systèmes complexes et interconnectés, les jumeaux numériques jouent un rôle clé. Ils sont utilisés aussi bien pour optimiser la production que pour améliorer les performances des voitures

f) Urbanisme

Les ingénieurs civils et les urbanistes tirent un grand bénéfice des jumeaux numériques, qui leur permettent de visualiser des données spatiales en 3D et 4D en temps réel.

Cette technologie facilite également l'intégration de la réalité augmentée dans les environnements construits, améliorant ainsi la planification et la gestion des infrastructures urbaines [11].

II.3. Technologies du jumeau numérique et leur impact sur l'industrie du futur

Le jumeau numérique constitue un outil polyvalent, capable d'intégrer plusieurs technologies clés de l'industrie du futur :

- **La réalité virtuelle ou augmentée**, utilisée notamment pour l'assistance à la fabrication ou au dépannage à distance. Elle représente une solution innovante en matière d'interface homme-système.
- **La modélisation comportementale assistée par ordinateur**, qui permet la création de modèles de maintenance prédictive et soutient également les systèmes d'apprentissage automatisé.

- **L'internet des objets (IoT)**, essentiel pour la collecte et la transmission des données terrain, assurant ainsi la cohérence entre le jumeau physique et sa réplique numérique.
- **Le recours à des serveurs distants (cloud computing)**, permettant le stockage, le traitement et la mise à disposition des données, aussi bien localement qu'à distance.
- **Les actionneurs et systèmes de contrôle automatisé**, qui offrent la possibilité au jumeau numérique d'interagir directement avec le système physique.

L'intégration de ces technologies permet au jumeau numérique de proposer une large gamme de services à l'utilisateur :

- L'aide à la conception, par l'intégration des règles de conception dans le système.
 - L'aide au chiffrage, facilitée par la connexion du jumeau numérique au système d'information de l'entreprise.
 - L'aide à l'ordonnancement, rendue possible grâce à cette même intégration dans le système d'information.
 - L'assistance à la fabrication, à travers la génération automatique de notices de montage virtuelles.
 - L'aide à l'utilisation, via les indicateurs générés par le jumeau numérique.
 - Le suivi des performances,
 - La maintenance prédictive,
 - L'aide à la reconfiguration,
- Et d'autres services adaptables selon les besoins de l'entreprise [26].

II.4. Présentation du cas d'étude

II.4.1. Description du système logistique à modéliser

Dans le cadre de ce mémoire, nous nous intéressons à l'application d'un jumeau numérique pour renforcer la performance globale de la chaîne logistique au sein d'un atelier de confection textile. Cette chaîne comprend deux unités de production distinctes ainsi que deux entrepôts dédiés aux matières premières, et se prolonge jusqu'à la livraison finale du produit au client. L'intégration d'un jumeau numérique à notre cas d'étude permet d'apporter une série de services à forte valeur ajoutée, tels que : l'aide au chiffrage et à l'ordonnancement grâce à sa connexion directe avec le système d'information de l'entreprise ; l'assistance à la fabrication via la génération automatique de notices de montage virtuelles ; l'aide à l'utilisation à travers des indicateurs opérationnels ; le suivi des performances ; la maintenance prédictive ; ainsi que l'aide à la reconfiguration des processus logistiques. Ces fonctionnalités contribuent à une gestion plus agile, précise et réactive de notre chaîne logistique.

La structure de production est composée de :

- Un atelier interne, dédié à la fabrication des Articles textiles pour bébé.
- Un atelier de sous-traitance, consacré à la confection de robes.

Après la production, les articles finis sont expédiés vers trois entrepôts régionaux situés à **Tlemcen, Oran** et **Alger**. Il est important de préciser que ces entrepôts n'appartiennent pas à l'atelier lui-même, mais sont ceux de service de livraison, chargé de la distribution à travers le territoire national.

Une fois que les produits quittent l'atelier, ils sont pris en charge par service de livraison, et leur acheminement suivi via un système en ligne proposé par ce prestataire, permettant de consulter l'état de l'expédition en temps réel.

Les produits stockés dans ces entrepôts régionaux sont ensuite livrés aux clients finaux.

Le schéma suivant représentant la description du système logistique :

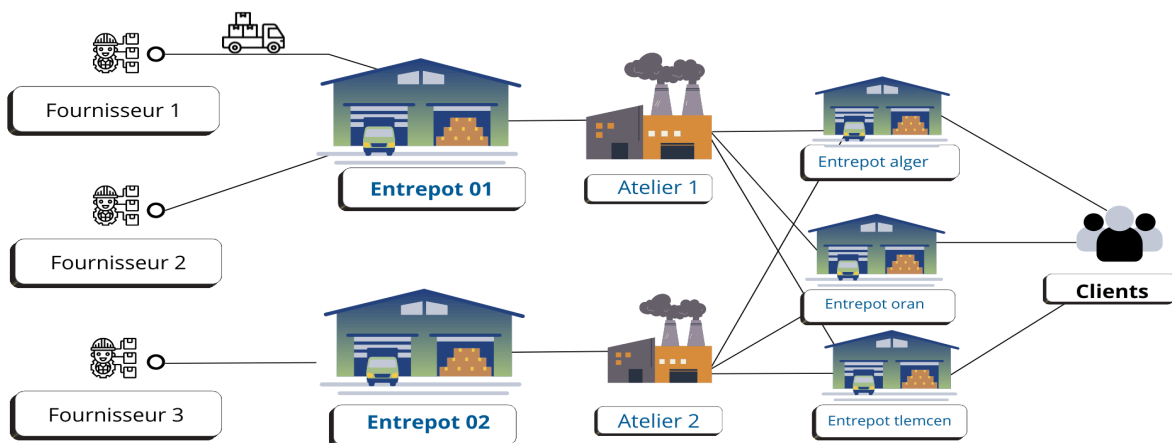


Figure II.5: Représentation structurelle du flux logistique textile depuis les fournisseurs jusqu'aux clients.

II.4.2. Structure des ateliers

L'atelier de confection textile étudié dans ce mémoire est structuré en plusieurs zones fonctionnelles, permettant une organisation fluide et séquencée de la chaîne de production.

- **Entrepôt de matières premières :** Cette zone constitue le point d'entrée de la chaîne logistique interne. Elle est dédiée au stockage des matières premières essentielles à la production, notamment les tissus de types A et B, ainsi que les

fibres textiles utilisées dans la confection. Ces matériaux sont entreposés selon des critères de traçabilité, de rotation des stocks et de conditions de conservation spécifiques, afin de garantir leur disponibilité et leur qualité avant traitement.

- **Zone de découpe** : Une fois les matières premières prélevées, elles sont transférées vers la zone de découpe. Cette étape est cruciale, car elle conditionne la précision et la conformité des pièces à assembler. Les rouleaux de tissu sont déroulés et découpés selon des gabarits définis en fonction des caractéristiques de chaque produit à fabriquer. Cette opération peut être réalisée manuellement ou à l'aide de machines automatisées. Elle nécessite une coordination fine avec les prévisions de production et les commandes en cours.

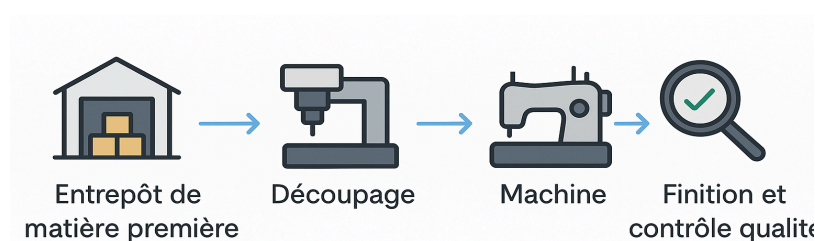


Figure II.6 : Flux logistique intégré des deux ateliers de production textile.

- **Zone de confection (machines de fabrication)** : Dans cette zone, les différentes pièces de tissu découpées sont acheminées vers les postes de travail pour être assemblées conformément aux spécifications du produit. À l'aide de machines de fabrication adaptées, les opérateurs réalisent les opérations de couture, d'assemblage et de finition nécessaires à la création du produit final, qu'il s'agisse de vêtements ou d'articles pour bébé. Cette étape mobilise un savoir-faire technique et une coordination rigoureuse pour assurer la qualité et la conformité des produits.
- **Entrepôt des produits finis** : Une fois la confection achevée et les contrôles de qualité effectués, les articles sont transférés vers l'entrepôt de produits finis. Ce dernier assure le stockage temporaire des articles fabriqués, en attente de leur expédition vers les entrepôts régionaux ou directement vers les clients. L'organisation de cette zone vise à garantir la traçabilité des produits, la gestion efficace des flux sortants, et le respect des délais de livraison.

Le flux logistique commence donc par la réception et le stockage de la matière première dans les entrepôts de chaque atelier. Ensuite, les tissus sont acheminés vers la zone de découpe, puis vers les machines de fabrication. Une fois les produits finalisés, ils

transitent par l'entrepôt de produits finis, d'où ils sont ensuite livrés vers les points de distribution ou de vente.

La chaîne logistique est conçue pour fonctionner de manière coordonnée, malgré la séparation physique des deux ateliers. La modélisation de ce système permettra d'analyser les performances globales de la chaîne, d'identifier les goulets d'étranglement éventuels et d'évaluer l'impact de certaines décisions de gestion (répartition de la production, stockage, délais, etc.) en temps réel via des tableaux de bord.

II.4.3. Contexte de l'étude

L'étude s'inscrit dans le cadre d'un atelier de confection textile caractérisé par une chaîne logistique intégrée et segmentée en plusieurs unités opérationnelles. Cet environnement industriel comprend notamment deux unités de production distinctes, dédiées à différentes étapes de la fabrication, ainsi que deux entrepôts réservés au stockage des matières premières et des produits finis. La chaîne s'étend jusqu'à la livraison finale des articles, couvrant ainsi l'ensemble du cycle logistique.

Le secteur textile, marqué par une forte pression sur les délais, la qualité et la flexibilité, nécessite des outils innovants pour optimiser les processus et améliorer la réactivité face aux fluctuations de la demande. Dans ce contexte, le recours à un jumeau numérique apparaît comme une solution prometteuse pour offrir une visibilité accrue et un contrôle précis sur l'ensemble des opérations.

L'étude vise à analyser l'application pratique de cette technologie dans un cadre réel, en évaluant comment elle peut contribuer à améliorer la gestion des flux, la planification, la maintenance et la prise de décision au sein de l'atelier. Cette démarche s'inscrit dans une perspective plus large de transformation digitale et d'industrie 4.0, visant à renforcer la compétitivité et la durabilité des processus industriels.

II.4.4. Objectifs du cas d'étude

L'objectif principal de ce cas d'étude est d'explorer et de démontrer la valeur ajoutée de l'intégration d'un **jumeau numérique** dans la gestion d'une chaîne logistique interne, appliquée à un **atelier de confection textile**. À travers cette démarche, plusieurs objectifs spécifiques sont visés :

- **Concevoir un modèle** de jumeau numérique représentant le fonctionnement réel de l'atelier textile.
- **Simuler les flux physiques et d'information** pour identifier les points de blocage ou de perte de performance.
- **Proposer des améliorations** sur la base des résultats de simulation

- **Intégrer la phase de distribution dans la modélisation**, en tenant compte des entrepôts régionaux et des délais de livraison vers les clients finaux.
- **Analyser l'impact des délais d'expédition** sur la performance globale de la chaîne logistique, notamment à travers l'indicateur clé de performance (KPI) du temps total de cycle.
- **Évaluer les capacités de stockage** et de production des deux ateliers afin d'optimiser l'enchaînement des opérations et réduire les temps d'attente.
- **Mettre en place des scénarios de simulation** pour comparer différentes configurations (variations de demande, saturation des entrepôts, modification des délais de traitement...).
- **Suivre le produit** depuis la réception de la matière première jusqu'à la livraison finale, afin de mesurer la traçabilité et la réactivité du système logistique.

Dans cette étude, nous avons particulièrement mis l'accent sur un indicateur clé de performance (KPI) : le délai de livraison, mesuré depuis la réception de la matière première jusqu'à la remise du produit au client. Ce choix s'explique par l'importance stratégique que revêt la rapidité de service dans le secteur textile, où le respect des délais est souvent un facteur déterminant de satisfaction client.

II.4.5. Définition des paramètres du modèle

Pour pouvoir modéliser au mieux le système logistique étudié, Nous avons d'abord identifié les données essentielles liées au fonctionnement des deux ateliers. Le tableau ci-dessous présente les principales informations, comme les volumes de production, les horaires de travail et la capacité de production par opérateur. Ces éléments m'ont permis de construire un modèle réaliste et fidèle à la réalité du terrain.

Élément	Type de donnée	Valeur / Intervalle	Commentaires
Temps d'arrivée - Fibre	Délai d'approvisionnement	entre 12h et 24h	Arrive au stock MP2
Temps d'arrivée - Tissu Type A	Délai d'approvisionnement	entre 16h et 48h	Utilisé dans l'atelier trousseaux
Temps d'arrivée - Tissu Type B	Délai d'approvisionnement	entre 24h et 60h	Utilisé dans l'atelier robes
Capacité de stockage MP1	Nombre d'unités	300 mètres	Matières premières (Tissu A + B)
Capacité de stockage MP2	Nombre d'unités	150 kg	Matière fibre uniquement
Temps de découpe - Atelier 2	Temps de traitement	30 min à 1h	Traitement tissu B pour robes
Temps de découpe - Atelier 1	Temps de traitement	25 min à 45 min	Traitement tissu A

CHAPITRE II APPLICATION DES JUMEAUX NUMÉRIQUE DANS LA CHAÎNE LOGISTIQUE

Temps de confection - Atelier 2	Temps de production	40min à 1h	Confection robes
Temps de confection - Atelier 1	Temps de production	50min à 1h	Confection trousseaux bébé
Capacité de production par jour	Nombre d'unités	Atelier 1 : 35 à 55 unités / jour Atelier 2 : 20 à 54 unités / jour	Dépend du nombre d'opérateurs et du temps disponible et de type de produit
Temps de transit vers entrepôts régionaux	Temps logistique	Alger : 6h - 19h Oran : 3h - 12h Tlemcen : 2h - 3h	Transport externe (service de livraison)
Temps de stockage dans entrepôt régional	Délai moyen	2h - 4h	Avant expédition finale vers client

Tableau II.1 : Données liées au fonctionnement des deux ateliers.

Élément	Valeur	Description
Temps de travail	8 heures par jour	Durée journalière de fonctionnement de chaque atelier
Capacité max	60 pièces/jour	capacité de production max par jour (atelier 01)
Capacité max	58 pièces/jour	capacité de production max par jour (atelier 02)
Délai de livraison	entre 12 h et 72 h	Respect des délais de transfert inter-sites

Tableau II.2 : Données du système étudié.

La simulation du système repose également sur un ensemble de contraintes qui reflètent les limites physiques, humaines et organisationnelles de l'environnement réel. Ces contraintes doivent être rigoureusement définies afin de garantir la validité et la fiabilité des résultats issus de la modélisation. Le tableau ci-dessous présente les principales Contraintes du système :

Contrainte	Description
Capacité maximale de production par opérateur	Un opérateur ne peut produire que 4 pièces par jour
Aucun produit ne peut être finalisé plus vite, même en cas de surcharge	Chaque produit nécessite un temps minimum de fabrication (ex. : 30 minutes)
Respect des délais de transfert inter-sites	Une fois le produit fini, il doit être expédié vers l'un des entrepôts régionaux dans un certain délai (3 jour max).
Respecter les quantités fixées par destination	Les produits finis doivent être répartis entre Tlemcen, Oran et Alger selon des pourcentages ou quantités prédéfinies (ex. : 45 % Alger, 35% Tlemcen, 20 % Oran).

Tableau II.3 : Contraintes du système

Afin de préparer l'évaluation des performances de la chaîne logistique dans le cadre de la simulation présentée au chapitre suivant, plusieurs indicateurs clés de performance (KPI) ont été identifiés. Ces indicateurs serviront de base pour analyser différents aspects du système, notamment la productivité, l'efficacité dans l'utilisation des ressources, le respect des délais de production, ainsi que la gestion des stocks tout au long du processus.

Le tableau ci-dessous présente les principaux indicateurs retenus pour cette analyse.

Indicateur	Définition	Objectif / Utilité
Temps moyen de traitement par atelier	Moyenne du temps passé par chaque produit dans l'atelier 1 ou 2 (robes ou trousseaux).	Identifier les goulets d'étranglement.
Taux de rendement par opérateur	2 / 4 pièces / opérateur	Suivre la productivité individuelle
Délai total de livraison (lead time global)	Temps total écoulé entre la réception de la matière première et la livraison finale du produit au client	Minimiser ce délai tout en respectant les contraintes de qualité et de capacité.
Niveau de stock (MP et PF)	Unités / jour	Suivre le niveau de matière première et de produits finis
Délai moyen de livraison par wilaya	Temps moyen entre la sortie du produit fini de l'atelier et son arrivée dans l'entrepôt régional. Wilaya d'Alger (à forte demande) doit être analysée séparément	Comparer les performances entre Alger, Oran et Tlemcen.
Temps de cycle moyen par produit	par Heurs	Temps total de fabrication d'une pièce
Taux de respect des délais de livraison	Pourcentage de commandes livrées dans le délai prévu. Peut-être ventilé par wilaya.	$(\text{Commandes livrées à temps} \div \text{Commandes totales}) \times 100$

Taux de file d'attente dans les ateliers ou entrepôts	Proportion de produits en attente de traitement ou d'expédition.	Détecter les congestions logistiques.
Répartition des volumes livrés par région	Pourcentage de produits livrés à chaque wilaya. Alger = 45 %, Oran = 20 %, Tlemcen = 35%	Vérifier le respect des quotas définis
Nombre de pièces produites par jour	Unités	Évaluer la performance quotidienne de l'ensemble du système

Tableau II.4 : Indicateurs de performance.

II.5.Conclusion

Ce chapitre a permis de poser les fondements conceptuels du jumeau numérique, tout en montrant son intérêt stratégique pour les entreprises en quête d'agilité et de performance. Sa capacité à reproduire en temps réel un système physique, à simuler différents scénarios et à faciliter la prise de décision en fait un outil précieux dans un environnement industriel en mutation.

La présentation du cas d'étude a introduit un exemple concret d'application dans le secteur textile. Ce cas servira de support pratique pour les chapitres suivants, qui seront consacrés à la modélisation, à la simulation et à l'analyse des résultats dans le cadre d'une démarche d'optimisation logistique.

CHAPITRE III:

**VERS UN JUMEAU NUMÉRIQUE
LOGISTIQUE : APPROCHE PAR
SIMULATION DANS FLEXSIM**

III.1 introduction

Dans ce chapitre, nous présentons le travail de simulation réalisé à l'aide du logiciel FlexSim, dans le but de représenter fidèlement le fonctionnement logistique de l'atelier textile étudié. L'objectif est de traduire l'ensemble des étapes de la chaîne logistique - depuis l'arrivée des matières premières jusqu'à la livraison des produits finis - en un modèle dynamique capable de simuler les flux réels ainsi que les comportements du système.

Cette simulation nous a permis de visualiser plus clairement le déroulement des opérations, d'identifier les éventuels goulots d'étranglement, et surtout, d'évaluer la performance globale du système à l'aide de plusieurs indicateurs clés.

Ce chapitre retrace donc les principales étapes de construction du modèle, les données exploitées, les contraintes prises en compte, ainsi que les choix techniques adoptés tout au long du processus de modélisation.

III.2 Présentation du logiciel flexim

FlexSim est un logiciel de simulation d'événements discrets en 3D, développé par FlexSim Software Products. Il permet de modéliser, analyser et optimiser des systèmes complexes dans divers secteurs tels que la fabrication, la logistique, la santé et la chaîne d'approvisionnement. Grâce à une interface intuitive et des outils puissants, FlexSim aide les entreprises à prendre des décisions éclairées en simulant virtuellement leurs processus opérationnels.



Figure III.1 : logo du logiciel flexim [36].

III.2.1 Principales fonctionnalités de FlexSim

1. Modélisation 3D intuitive

FlexSim offre une interface de type glisser-déposer avec une bibliothèque d'objets standard (machines, opérateurs, convoyeurs, AGV, etc.), facilitant la création de modèles réalistes. Les modèles peuvent être enrichis avec des objets personnalisés et des effets visuels avancés pour une meilleure immersion.

2. Construction de logique sans code (Process Flow)

L'outil Process Flow permet de définir la logique des processus à l'aide de diagrammes de flux, remplaçant ainsi la nécessité de coder manuellement. Il est particulièrement utile pour modéliser des systèmes complexes de manière structurée et évolutive.

3. Analyse et optimisation intégrées

FlexSim intègre des outils tels que l'Expérimenter et OptQuest pour tester différents scénarios, effectuer des analyses statistiques et optimiser les performances du système. Ces outils permettent d'évaluer l'impact de diverses modifications sans risque pour les opérations réelles.

4. Visualisation en temps réel

Grâce à des animations 3D et des tableaux de bord interactifs, FlexSim permet de visualiser en temps réel le fonctionnement du système simulé, facilitant ainsi l'identification des goulots d'étranglement et des inefficacités.

5. Intégration avec d'autres systèmes

FlexSim peut être intégré à divers systèmes d'information tels que les ERP, WMS et MES, permettant une synchronisation des données et une analyse plus approfondie des processus.

6. Support multilingue et documentation complète

Le logiciel est disponible en plusieurs langues, dont l'anglais, le chinois (simplifié et traditionnel) et le japonais, et est accompagné d'une documentation détaillée pour faciliter la prise en main [36].

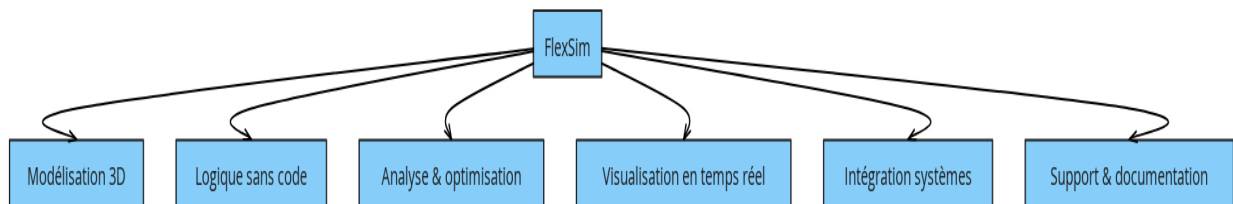


Figure III.2 : Schéma résumé des capacités de FlexSim.

III.2.2. l'importance de l'utilisation de FlexSim dans le cadre de cette étude

Dans le cadre de ce mémoire, nous avons choisi d'utiliser FlexSim comme outil principal de simulation pour modéliser et analyser le système logistique de notre atelier de confection textile. FlexSim est un logiciel de simulation 3D orienté objet qui permet

de représenter de manière visuelle et précise les différents processus industriels. Sa facilité d'utilisation, combinée à la richesse de ses fonctionnalités, en fait un choix particulièrement adapté pour le cas étudié. Grâce à FlexSim, nous avons pu construire un modèle proche à la réalité de la chaîne logistique étudiée, en intégrant :

- 1- Le flux de réception des matières premières.
- 2- Le stockage intermédiaire.
- 3- Les opérations de production dans les deux unités (robes et articles pour bébés)
- 4- la distribution des produits finis.

L'utilisation de FlexSim nous a permis non seulement de visualiser l'ensemble de notre flux logistique, mais aussi de simuler différentes configurations, d'analyser les temps de traitement, les niveaux de stock, et le taux d'utilisation des ateliers. Cela nous a offert une vision claire des points d'amélioration possibles et une meilleure compréhension des mécanismes internes de notre système.

En se basant sur la littérature spécialisée (ISIMA, DIGIFO, Formation FlexSim 21.0), FlexSim apparaît comme un outil largement reconnu dans l'industrie pour sa capacité à optimiser les processus et à réduire les risques opérationnels en testant virtuellement différentes stratégies sans impacter la production réelle. Ainsi, le choix de FlexSim dans cette étude s'est révélé stratégique pour améliorer l'efficacité du flux logistique, anticiper les goulets d'étranglement, et proposer des pistes d'amélioration réalistes et fondées sur une analyse précise [37] [38] [39].

III.3. Description de la Chaîne Logistique Modélisée

Dans cette partie du travail, nous avons étudié et simulé le système logistique textile complet, modélisé depuis la réception des matières premières jusqu'à la livraison finale au client. Nous avons représenté une chaîne de production répartie sur deux ateliers distincts, intégrée à un réseau de distribution régional.

La chaîne logistique à modéliser comprend :

- **Deux unités de production :**
 - Un atelier interne dédié à la fabrication d'articles textiles pour bébé.
 - Un atelier de sous-traitance spécialisé dans la confection de robes.
- **Deux entrepôts de matières premières :** Fournissant les matériaux nécessaires aux deux ateliers.
- **Trois entrepôts régionaux :** situés à Tlemcen, Oran et Alger, gérés par un service de livraison externe.
- **Un système de livraison :** assuré par un prestataire tiers avec un suivi en ligne des expéditions.
- **Clients finaux :** Représentant la demande pour les produits finis.

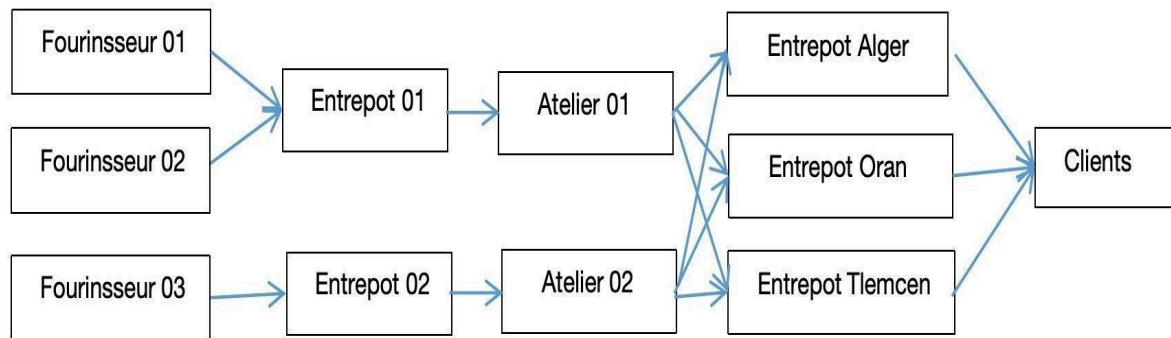


Figure III.3 : Représentation schématique du modèle étudié.

La simulation avec FlexSim vise à reproduire ces éléments, en intégrant les flux de matières, les processus de production, le stockage, et la distribution, tout en connectant le modèle au système d'information pour une synchronisation des données en temps réel.

III.4. Méthodologie de Simulation avec FlexSim

Dans cette section, nous décrivons les étapes suivies pour modéliser et simuler la chaîne logistique textile à l'aide de FlexSim. Pour initier le processus, nous avons commencé par simuler le modèle réel de la chaîne logistique avec FlexSim afin de visualiser son comportement actuel. Cette étape initiale a permis d'identifier les flux, les goulots d'étranglement et les inefficacités du système existant. Par la suite, nous avons développé un jumeau numérique pour enrichir la simulation avec des capacités d'analyse prédictive et d'optimisation en temps réel.






III.4.1. Modélisation du système proposé


La modélisation dans FlexSim repose sur une approche orientée objet, où chaque élément de la chaîne logistique est représenté par des entités spécifiques (objets 3D, flux, etc.). Les étapes suivantes ont été suivies :

III.4.1.1 Définition des entités

La première étape de la construction du modèle dans FlexSim a consisté à représenter les principaux composants physiques de la chaîne logistique étudiée. Pour cela, nous avons utilisé les objets standards disponibles dans la bibliothèque du logiciel, en les adaptant à notre cas d'étude.

- **Ateliers** : modélisés comme des processeurs (Processors) dans FlexSim, représentant les étapes de fabrication (coupe, couture, assemblage, etc.).

- **Entrepôts de matières premières** : Représentés comme des zones de stockage (Racks) avec des capacités définies pour les tissus, fils, et autres matériaux.
 - **Entrepôts régionaux** : Modélisés comme des zones de stockage intermédiaires, avec des règles de répartition basées sur la localisation géographique.
 - **Service de livraison** : Simulé par des transporteurs (Transports) avec des temps de transit basés sur les distances entre les entrepôts et les clients.
 - **Clients** : Représentés comme des sinks (points de sortie) avec des profils de demande variables.
- 1  **Source**
 - 2  **Queue**
 - 3  **Processor**
 - 4  **Transports**
 - 5  **Sink**

- **Source**  : Nous avons inséré trois objets de type Source que nous avons renommés respectivement fournisseur 01, fournisseur 02, et fournisseur 03. Ces objets représentent les trois fournisseurs externes de matières premières, à savoir le tissu de type A, le tissu de type B, et la fibre.

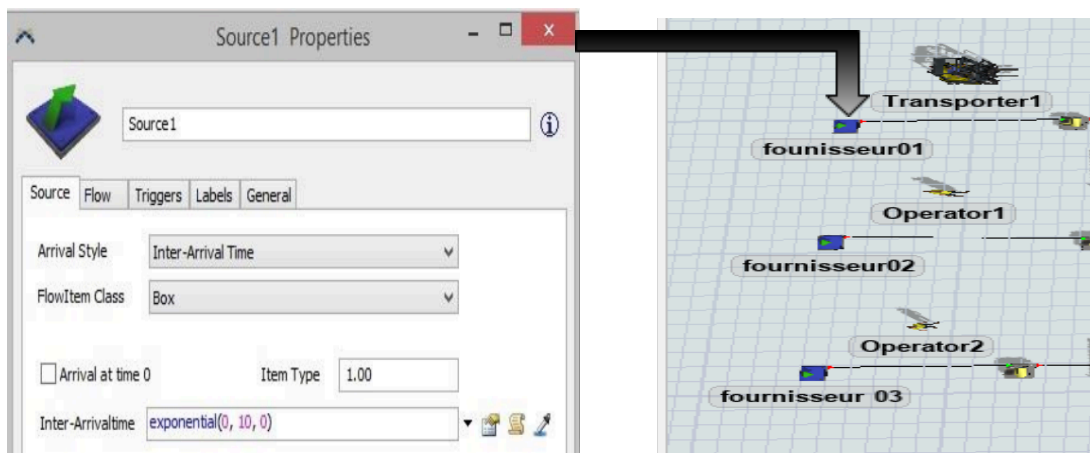



Figure III.4 : Entrée du système.

- **Queue**  (File d'attente) : Deux objets Queue ont été ajoutés et renommés en entrepôt 1 et entrepôt 2. Ces queues jouent le rôle d'entrepôts internes pour le stockage temporaire des matières premières avant leur transfert vers les unités de production.

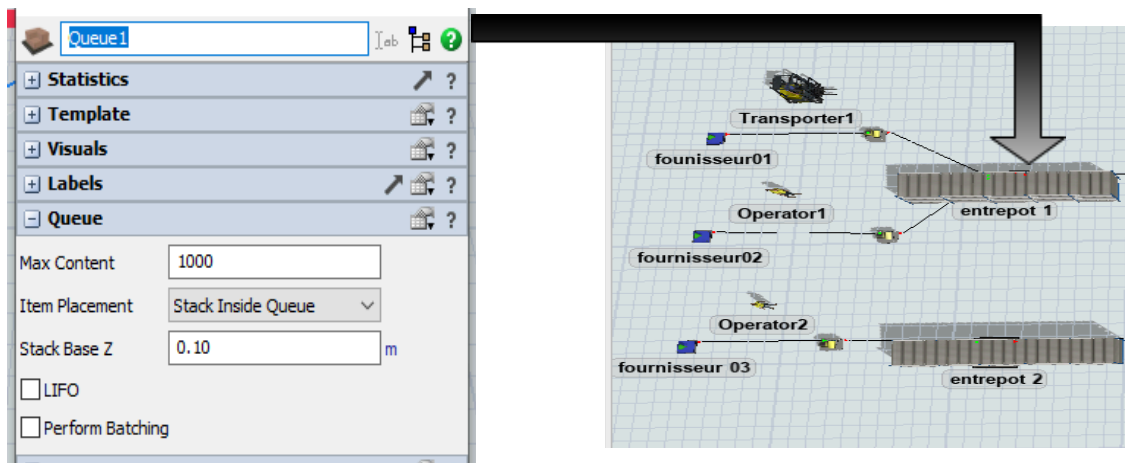



Figure III.5 : Entrepôts internes pour le stockage temporaire.

- **Processor**  : (ateliers) : Nous avons ensuite intégré deux objets (Processor) pour représenter les deux ateliers de production :

Atelier 1 : destiné à la confection d'articles pour bébés.

Atelier 2 : dédié à la fabrication des robes.

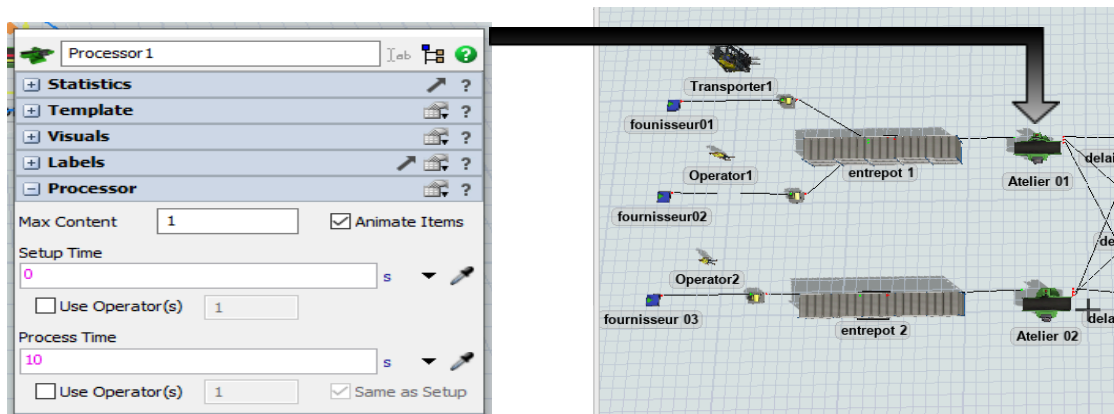


Figure III.6 : Ateliers de production.


- **Sink**  : (sortie finale d'un flux logistique dans FlexSim). Dans ce modèle, il symbolise la réception des produits par les clients finaux après leur expédition depuis les entrepôts régionaux. Il permet notamment de suivre et de comptabiliser les produits livrés, et de calculer des indicateurs clés tels que le temps total de parcours dans le système.



Figure III.7 : Réception des produits par les clients finaux.

III.4.1.2 Configuration des temps de traitement

Afin de refléter la variabilité des temps de production dans les deux ateliers, nous avons opté pour l'utilisation de la loi de distribution uniforme lors de la configuration des objets Processor. Cette approche permet de définir un intervalle de temps réaliste dans lequel chaque tâche peut être exécutée, tout en prenant en compte l'incertitude inhérente à la production réelle.

Concrètement, pour chaque Processor (atelier 1 et atelier 2), nous avons accédé aux propriétés de l'objet. Dans la fenêtre de configuration "**Process Time**", Nous avons introduit une expression en FlexScript utilisant la fonction $\text{uniform}(a, b)$.

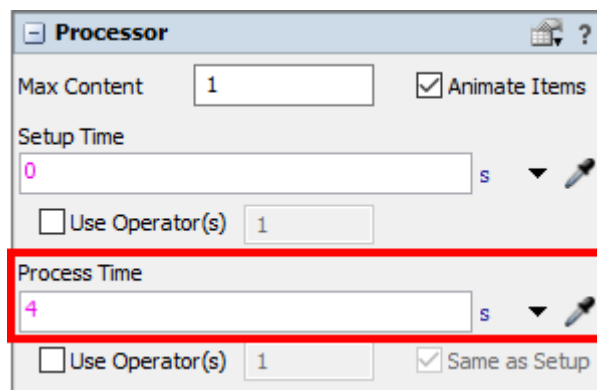


Figure III.8 : Configuration des temps de traitement à l'aide de la loi uniforme .

Voici les deux configurations utilisées :

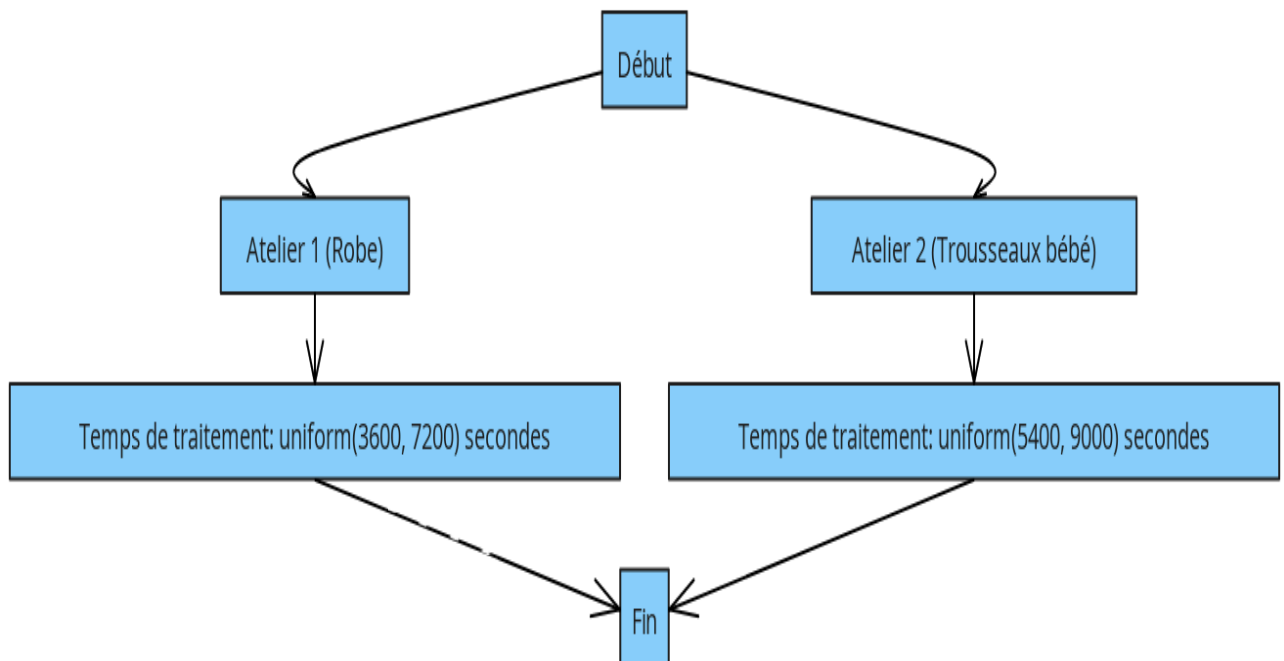


Figure III.9 : Schéma des deux configurations utilisées.

Ce paramétrage permet à chaque produit traité dans les ateliers d’avoir un temps de traitement aléatoire compris dans un intervalle donné, garantissant ainsi une simulation plus réaliste du comportement de la chaîne logistique.

III.4.1.3 Mise en place d’une répartition en pourcentage depuis les ateliers

Dans le but de simuler une distribution équilibrée des produits finis vers les différentes destinations (Alger, Oran, Tlemcen), nous avons adopté une logique de routage par pourcentage à la sortie des « *Processors* » représentant les ateliers.

Pour cela, nous avons utilisé la fonctionnalité "**Send to Port**" dans les propriétés des objets « **Processor** » (Atelier 1 et Atelier 2). Les pourcentages appliqués sont issus d’une expérience professionnelle de 3 ans dans ce domaine, ce qui a permis d’observer des tendances réelles de répartition vers ces régions.

✓ Étapes suivies :

- L’objet « **Processor** » (par exemple, *Atelier 1*) a été sélectionné dans le modèle.
- Dans les propriétés de l’objet, l’onglet "**Flow**", puis la section "**Send to Port**" ont été ouverts pour configurer le comportement de sortie.

- Le mode d'envoi par défaut, "**Next Available**", a été remplacé par le mode "**By Expression**", afin de permettre un routage conditionnel des entités.
- Un script **FlexScript** a ensuite été saisi pour définir la direction du flux de sortie en fonction de pourcentages prédéfinis.

Ainsi, chaque produit traité par le « **Processor** » est automatiquement dirigé vers l'un des trois ports de sortie, selon les proportions configurées, ce qui permet de simuler une répartition réaliste des flux dans le processus.

III.4.1.4 Intégration des délais logistiques et modélisation de la distribution finale

Après avoir mis en place la structure générale du système, nous avons poursuivi la modélisation en ajoutant les composants permettant de représenter les délais de traitement et les temps de transit. Ces éléments sont indispensables pour refléter de manière réaliste le fonctionnement de la chaîne logistique étudiée.

Pour cela, nous avons intégré trois objets justes après les ateliers de production. Ces objets jouent le rôle de délais intermédiaires entre la fin de la fabrication et le début de la distribution vers les entrepôts régionaux. Ces composants sont nommés comme suit :

- délai d'expédition 1 : pour les produits issus des deux ateliers à destination d'Alger,
- délai d'expédition 2 : pour les produits issus des deux ateliers vers Oran.
- délai d'expédition 3 : pour les produits issus des deux ateliers vers Tlemcen.

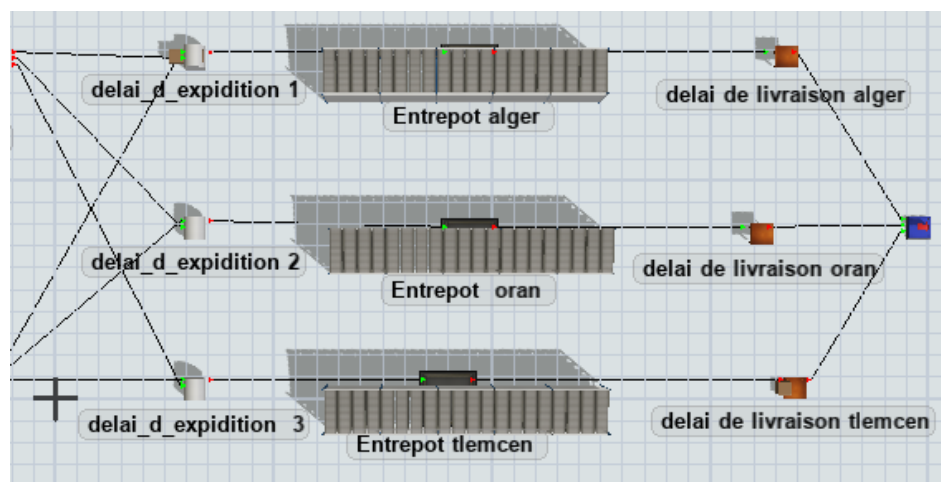


Figure III.10 : Délais logistiques intermédiaires.

L'objectif ici est de tenir compte de la variabilité des délais logistiques en fonction des zones de livraison, tout en maintenant une cohérence avec les spécificités géographiques

du système. Pour cela, nous avons intégré dans notre simulation le module GIS (Geographic Information System) disponible dans FlexSim comme il est indiqué sur la figure III.11, afin de modéliser avec précision les distances, les trajets et les temps de transport réels entre les différentes entités logistiques.

Ensuite, nous avons inséré trois objets « Queue », chacun représentant un entrepôt régional. Par la suite, des délais de transit ont été configurés en fonction des distances estimées entre l'atelier de production et ces plateformes respectivement de Entrepôt Alger, Entrepôt Oran et Entrepôt Tlemcen. Ces valeurs de temps ont été choisies en se basant sur la réalité.

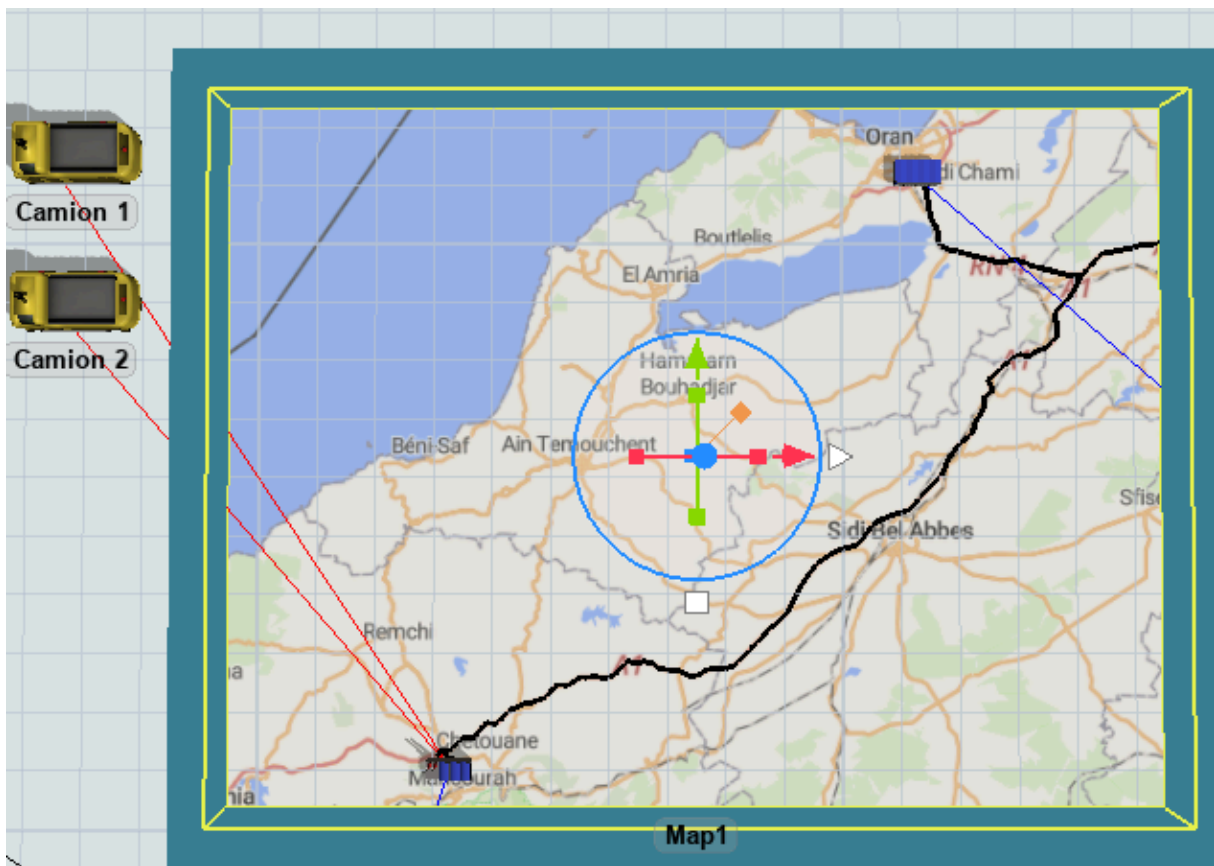


Figure III.11 : Capture des spécificités géographiques du système.

Pour modéliser la dernière étape de la livraison, nous avons également ajouté trois composants. Ils représentent le temps nécessaire entre le départ de l'entrepôt régional et la réception par le client :

- délai de livraison 01 : depuis Alger,
- délai de livraison 02 : depuis Oran,
- délai de livraison 03 : depuis Tlemcen.

Enfin, le processus s’achève avec l’objet Sink, qui représente la réception finale des produits par les clients. Tous les flux convergent vers cet objet, marquant la fin du cycle de simulation dans le modèle.

III.4.1.5. Modélisation du processus interne de l’atelier de confection

La modélisation des processus internes des ateliers de confection constitue une étape clé. Cette section se concentre sur la représentation des opérations réalisées au sein de l’atelier de sous-traitance, spécialisé dans la confection de robes. À l’aide du logiciel FlexSim, nous avons modélisé les processus internes de cet atelier, en tenant compte des flux de matières, des étapes de production, et des interactions avec les autres composantes de la chaîne logistique. Cette modélisation permet de visualiser le comportement de l’atelier, d’identifier les inefficacités, et de tester des scénarios d’optimisation.

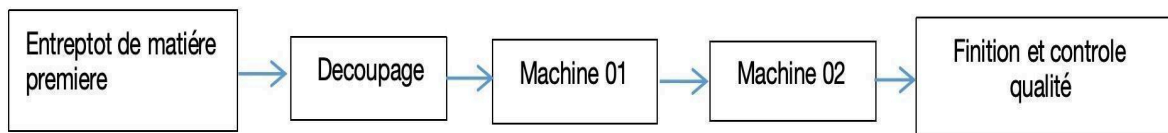


Figure III.12 : Processus interne de l’atelier de confection.

Pour modéliser le processus interne de l’atelier dans FlexSim, nous avons adopté une approche structurée, en suivant les étapes suivantes :

a) Source (Arrivée des matières premières)

Cette étape représente le point d’entrée des matières premières dans le système de production. Dans FlexSim, l’objet Source est utilisé pour générer les entités qui symbolisent les intrants du processus (tissus, accessoires, etc.).

b) Machine de découpe (Préparation des composants)

Modélisée à l’aide d’un objet *Processor*, cette machine simule l’opération de découpe des tissus selon les spécifications des produits. Un temps de traitement est défini pour refléter la durée réelle de cette activité.

c) Queue intermédiaire (Stock en cours de fabrication)

L’objet *Queue* représente un espace tampon où les pièces découpées sont temporairement stockées avant leur assemblage. Cette file permet d’évaluer les niveaux de stock intermédiaire et d’identifier d’éventuels goulots d’étranglement.

d) Machine d'assemblage et contrôle qualité

Une seconde *Processor* est utilisée pour modéliser l'étape d'assemblage des pièces et le contrôle qualité final. Cette machine reflète les opérations de couture, de finition et de vérification des produits finis avant leur expédition.

e) Sink (Sortie du système)

Le module *Sink* représente la fin du processus de production, où les articles conformes sont stockés en tant que produits finis prêts à être expédiés vers les clients ou les centres logistiques.

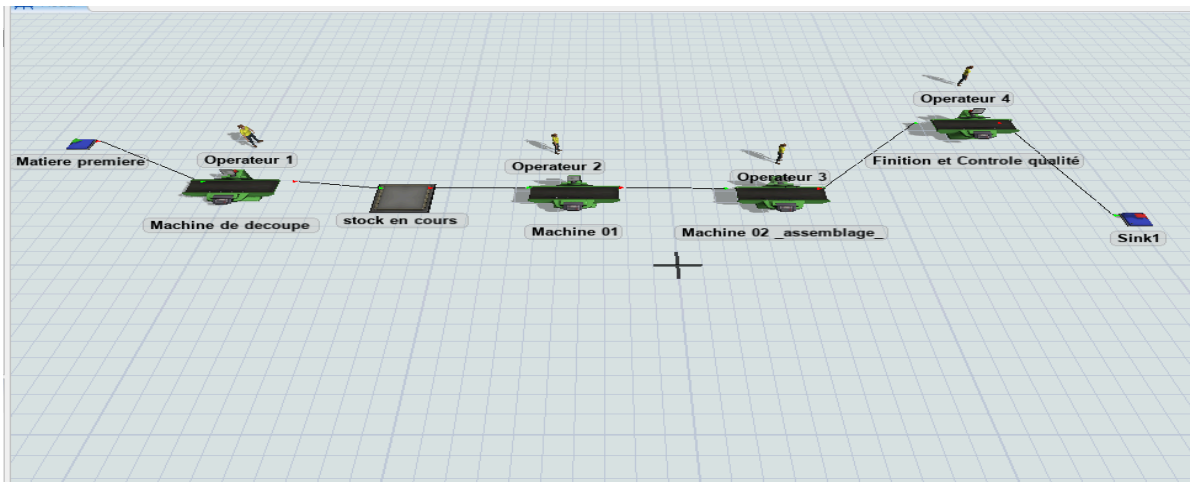


Figure III.13 : Modélisation du processus interne de l'atelier.

III.4.2. Configuration des Scénarios de Simulation

Plusieurs scénarios sont testés pour répondre aux objectifs identifiés :

- **Scénario de base** : Représentation de la chaîne logistique actuelle pour identifier les inefficacités (goulots d'étranglement, surstocks, etc.).
- **Scénario optimisé** : Ajustement des paramètres (ex. : augmentation de la capacité de production, réduction des délais de livraison) pour améliorer les performances.
- **Scénario de maintenance prédictive** : Simulation de pannes potentielles pour évaluer leur impact et tester des stratégies de maintenance.
- **Scénario de reconfiguration** : Test de nouvelles configurations, comme l'ajout d'un entrepôt régional ou la réorganisation des flux de transport.

Dans cette section, plusieurs scénarios de simulation peuvent être envisagés pour analyser et optimiser les performances de la chaîne logistique à l'aide du jumeau numérique. Cependant, dans le cadre de ce chapitre, nous nous concentrerons

exclusivement sur le **scénario de base**. Ce scénario correspond à la représentation fidèle du système logistique actuel (Fig-III.14), sans modification ni optimisation.

L'objectif est de créer un modèle numérique reflétant le plus précisément possible le comportement réel du système. Cette étape constitue la base de la démarche de jumeau numérique : en reproduisant le fonctionnement existant, il devient possible d'en visualiser les dynamiques, d'identifier les dysfonctionnements et de disposer d'un point de référence pour les futures expérimentations. Les scénarios alternatifs (optimisation, maintenance prédictive, reconfiguration) seront abordés ultérieurement, une fois le modèle de base validé et calibré.

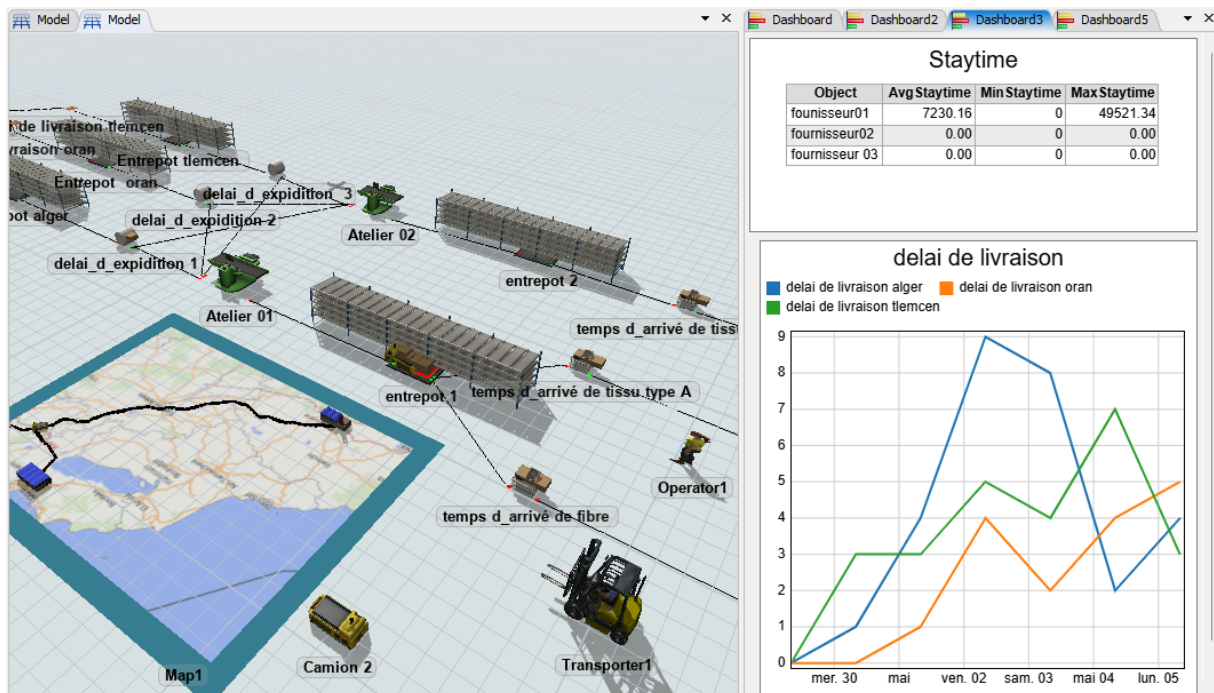


Figure III.14 : Capture d'écran du système dans flexim.

L'ensemble de cette structure logistique a été modélisé dans FlexSim afin d'analyser les performances du système, notamment en termes de délai de livraison, de saturation des ateliers, et de gestion des flux.

III.5. Méthodologie de création du jumeau numérique

Dans le cadre de cette étude, le jumeau numérique de la chaîne logistique a été développé à l'aide du logiciel FlexSim. Le jumeau numérique a été conçu pour simuler une chaîne logistique comprenant des fournisseurs, des entrepôts, des systèmes de transport, des centres de distribution et des clients finaux. Pour répondre aux besoins de visualisation à distance, le modèle principal est exécuté sur un premier ordinateur (PC1), tandis que son comportement et ses indicateurs clés de performance (KPI) sont visualisés sur un second ordinateur (PC2) dans le même réseau local. Cette section

détaille les étapes nécessaires à la connexion des deux PC, la configuration du serveur web de FlexSim, et l'installation du serveur Apache pour permettre l'accès au jumeau numérique via un navigateur web sur PC2.

Cette interconnexion permet non seulement une surveillance instantanée du système simulé, mais incarne également l'un des fondements du concept de jumeau numérique. En effet, elle offre une représentation numérique synchronisée du système physique simulé, rendant possible l'analyse, la prédiction et l'ajustement des opérations logistiques avant toute mise en œuvre réelle.

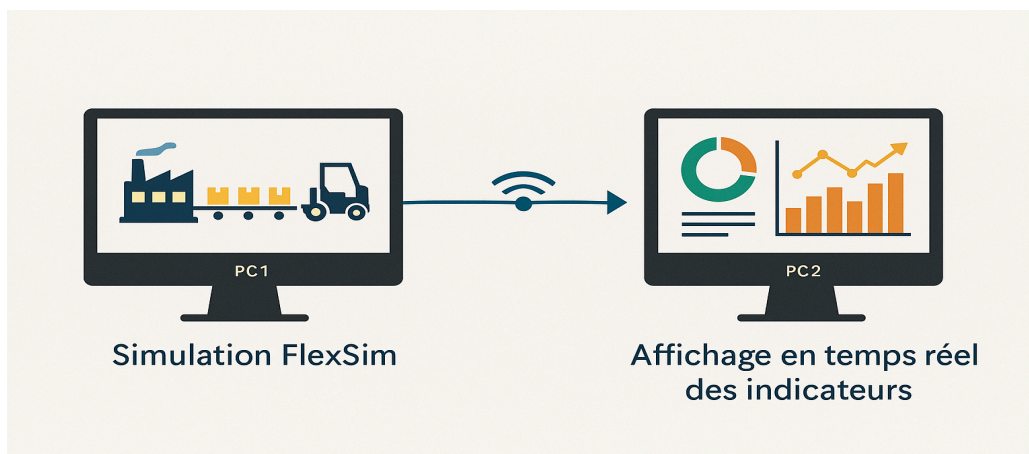


Figure III.15 : Architecture de communication entre le simulateur FlexSim et le jumeau numérique.

Cette approche, à la fois modulaire, temps réel et collaborative, s'inscrit pleinement dans les logiques de l'Industrie 4.0, où l'interopérabilité des systèmes et l'accès instantané à l'information sont des éléments clés de performance.

Cette méthode constitue un levier stratégique de pilotage. En effet, la possibilité de simuler en temps réel les flux de matières, les délais de production, ou encore l'état des stocks sur le premier poste (**PC1**), et de visualiser instantanément les indicateurs de performance (comme le taux de service, les retards, ou l'utilisation des ressources) sur un second poste (**PC2**) via un tableau de bord dynamique, permet :

- Une meilleure anticipation des points de congestion dans la chaîne d'approvisionnement
- Une réactivité accrue face aux variations de la demande ou aux aléas de production
- Une décision plus éclairée, grâce à la visualisation continue des performances logistiques.

Ce dispositif facilite également l'analyse croisée entre le scénario simulé et les résultats attendus, ce qui contribue à affiner les hypothèses de travail et à ajuster les

choix stratégiques en matière de planification, d'ordonnancement ou d'approvisionnement.

Ainsi, cette méthode favorise une lecture humanisée et opérationnelle des données logistiques, tout en restant compatible avec les exigences de flexibilité et de digitalisation propres au secteur textile.

III.5.1 Étapes de connexion entre deux PC pour la visualisation en temps réel

Pour permettre la communication entre PC1 (hébergeant la simulation) et PC2 (visualisant le jumeau numérique), les deux ordinateurs doivent être connectés au même réseau local (LAN ou Wi-Fi). Les étapes suivantes ont été suivies :

1. Vérification de la connectivité réseau :

Nous avons déterminé l'adresse IP locale de **PC1** en exécutant la commande `ipconfig` dans l'invite de commande Windows. L'adresse IPv4 obtenue (par exemple : **192.168.1.100**) a été notée comme référence pour permettre l'accès depuis **PC2**.

2. Test de connectivité :

Nous avons ensuite effectué un test de connectivité depuis **PC2** à l'aide de la commande `ping 192.168.1.100`, afin de confirmer que **PC1** est bien accessible sur le réseau.

3. Configuration du pare-feu :

Nous avons configuré le pare-feu de **PC1** pour autoriser les connexions entrantes sur le **port 8080**, utilisé par le serveur web de FlexSim.

Une règle de trafic entrant a été créée dans le **Pare-feu Windows Defender** avec les paramètres appropriés pour garantir l'accès.

- Type : Port
- Protocole : TCP
- Port spécifique : 8080
- Action : Autoriser la connexion
- Profil : Tous (Domaine, Privé, Public)

4. Vérification de l'accès :

Une fois la configuration réseau validée, **PC2** peut accéder au serveur web de **PC1** via une URL de la forme **http://192.168.1.100:8080**, où **192.168.1.100** est l'adresse IP de **PC1**.

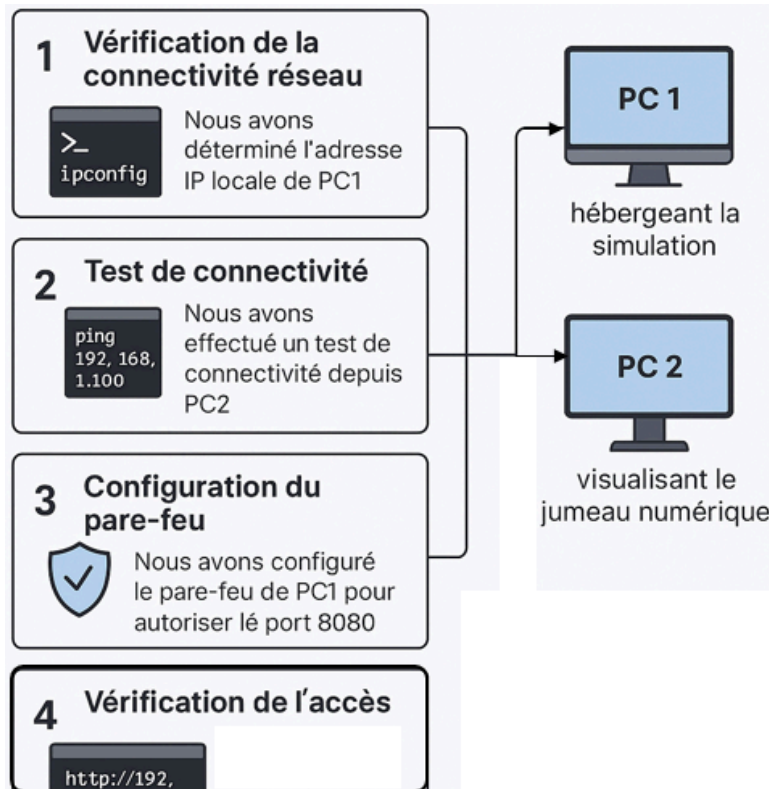


Figure III.16 : Étapes de connexion entre deux postes pour un suivi en temps réel.

III.5.2 Configuration du serveur web de FlexSim

Le serveur web de FlexSim permet d'héberger le modèle de simulation et son tableau de bord, rendant ainsi le jumeau numérique accessible via une interface web. Les étapes de configuration sont les suivantes :

1. Téléchargement et installation du serveur web :

Nous avons téléchargé le serveur web de FlexSim depuis notre compte utilisateur FlexSim (<https://account.flexsim.com>). Nous l'avons ensuite installé sur le PC1, dans le répertoire par défaut ou dans un dossier personnalisé compatible avec FlexSim (par exemple : C:/Program Files/FlexSim 2025).

2. Lancement du serveur :

Nous avons démarré le serveur web via l'interface **FlexSim** ou en utilisant le raccourci créé sur le bureau de **PC1**. Cela a permis d'activer l'hébergement des modèles stockés dans le répertoire **/Documents/FlexSim 2025 Projects**.

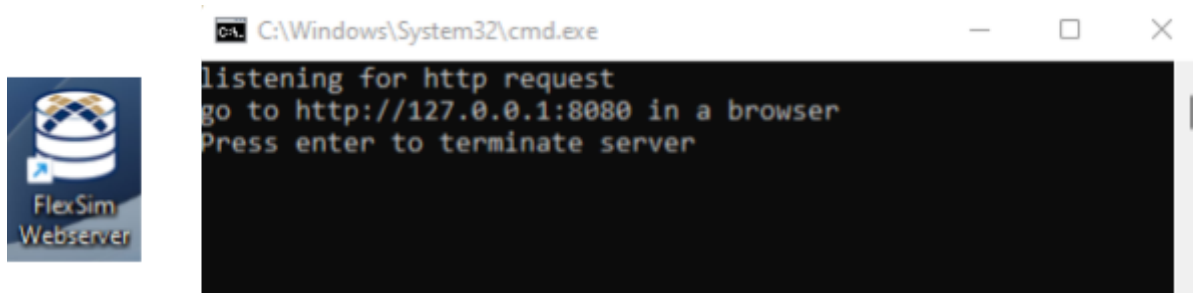


Figure III.17 : Lancement du serveur web de Flexsim.

3. Configuration de l'accès réseau :

Par défaut, le serveur web écoute sur l'adresse de **loopback (127.0.0.1)**. Nous avons donc modifié la configuration afin qu'il écoute sur toutes les interfaces réseau **(0.0.0.0:8080)**, en ajustant les paramètres du serveur web dans FlexSim. Cela a permis l'accès au serveur depuis d'autres machines, notamment **PC2**.

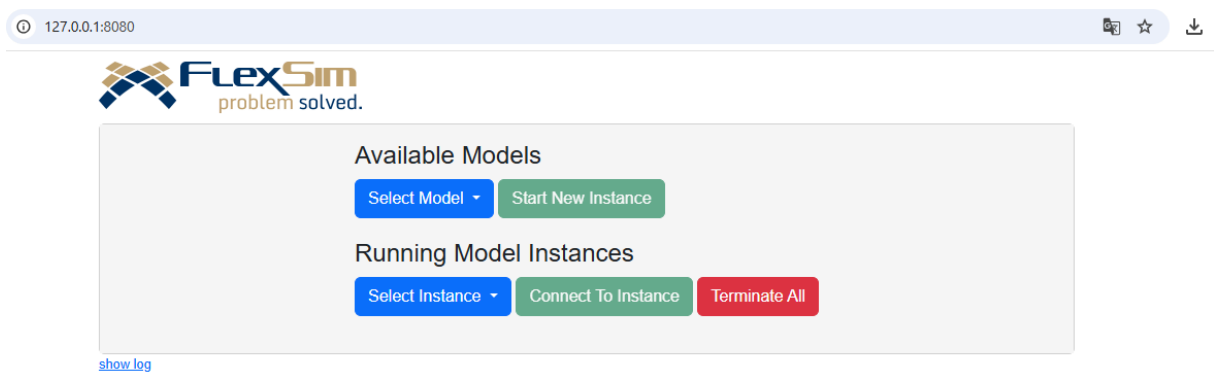


Figure III.18 : Configuration de l'accès réseau.

4. Test local :

Sur **PC1**, l'accès au modèle a été testé en ouvrant un navigateur web et en entrant l'URL **http://192.168.1.100:8080/ modelname**, où **modelname** correspond au nom du fichier modèle. Cela nous a permis de vérifier que le modèle et son tableau de bord sont correctement hébergés.

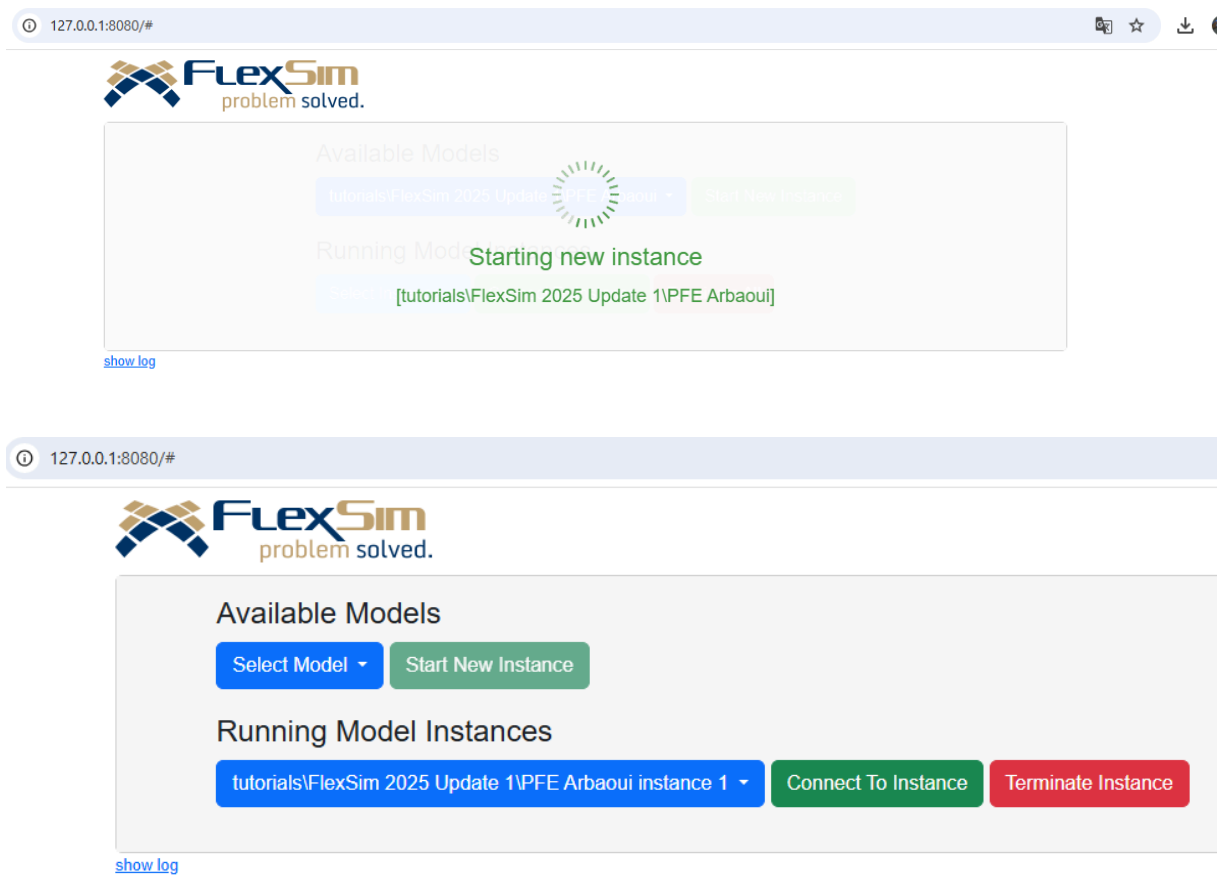


Figure III.19 : Test local du jumeau numérique.

5. Accès depuis PC2 :

Nous avons utilisé le même URL sur **PC2** dans un navigateur web (comme Chrome ou Edge) afin d'accéder au modèle en temps réel. Cela nous a permis de visualiser les animations 3D, de suivre les indicateurs clés de performance (KPI) et de valider le bon fonctionnement du système à distance.

III.5.3 Installation et configuration du serveur Apache

Pour renforcer la robustesse et la stabilité de l'hébergement web, nous avons installé le serveur Apache sur PC1. Ce serveur joue un double rôle : il peut servir de proxy inverse, redirigeant les requêtes entrantes vers le serveur web de FlexSim, ou fonctionner comme hébergeur principal du jumeau numérique. Cette configuration permet non seulement d'améliorer la gestion des connexions entrantes, mais aussi d'ajouter des couches de sécurité supplémentaires (comme le filtrage des requêtes ou le chiffrement SSL). Apache offre également une meilleure évolutivité, permettant de gérer plusieurs modèles ou interfaces de visualisation en parallèle, tout en assurant des performances optimales. Les étapes d'installation et de configuration sont les suivantes :

1. Téléchargement d'Apache :

Le serveur Apache a été téléchargé depuis le site officiel d'Apache Lounge (<https://www.apachelounge.com/download/>) ou via un package comme XAMPP (<https://www.apachefriends.org>). Pour ce projet, Apache Lounge a été utilisé pour une installation personnalisée.

2. Installation :

Le fichier ZIP d'Apache a été décompressé dans C:/Apache24. Le chemin d'installation a été vérifié pour s'assurer qu'il ne contient pas d'espaces ou de caractères spéciaux, ce qui peut causer des erreurs.

3. Configuration initiale :

Le fichier de configuration httpd.conf, situé dans C:/Apache24/conf, a été modifié pour inclure les directives suivantes :

- Listen 0.0.0.0:8080 pour permettre l'écoute sur toutes les interfaces réseau.
- Configuration du répertoire racine :
<Directory "C:/path/to/flexsim/web/root">
Options Indexes FollowSymLinks
AllowOverride All
Require all granted
</Directory>
- Proxy pour le serveur FlexSim (si utilisé comme proxy) :
ProxyPass / http://localhost:8090/
ProxyPassReverse / http://localhost:8090/

4. Démarrage d'Apache :

Nous avons démarré le serveur en exécutant le fichier **httpd.exe** depuis le répertoire C:/Apache24/bin ou en utilisant l'interface XAMPP. En cas de modification de la configuration, nous avons redémarré le serveur à l'aide de la commande `httpd -k restart`.

5. Test d'accès :

L'accès au serveur a été testé localement sur PC1 avec `http://192.168.1.100:8080`, puis depuis PC2 avec la même URL pour confirmer que le jumeau numérique est accessible à distance. La méthodologie décrite ci-dessus a permis de créer un jumeau numérique fonctionnel de la chaîne logistique, avec une simulation exécutée sur PC1 et une visualisation en temps réel sur PC2 via un navigateur web. La combinaison du serveur web de FlexSim et d'Apache offre une solution robuste pour partager les données du jumeau numérique, tout en garantissant une synchronisation en temps réel des KPI et

des animations 3D. Cette approche peut être étendue à des scénarios plus complexes en utilisant des protocoles comme OPC-UA pour une simulation distribuée, bien que cela nécessiterait des configurations supplémentaires.

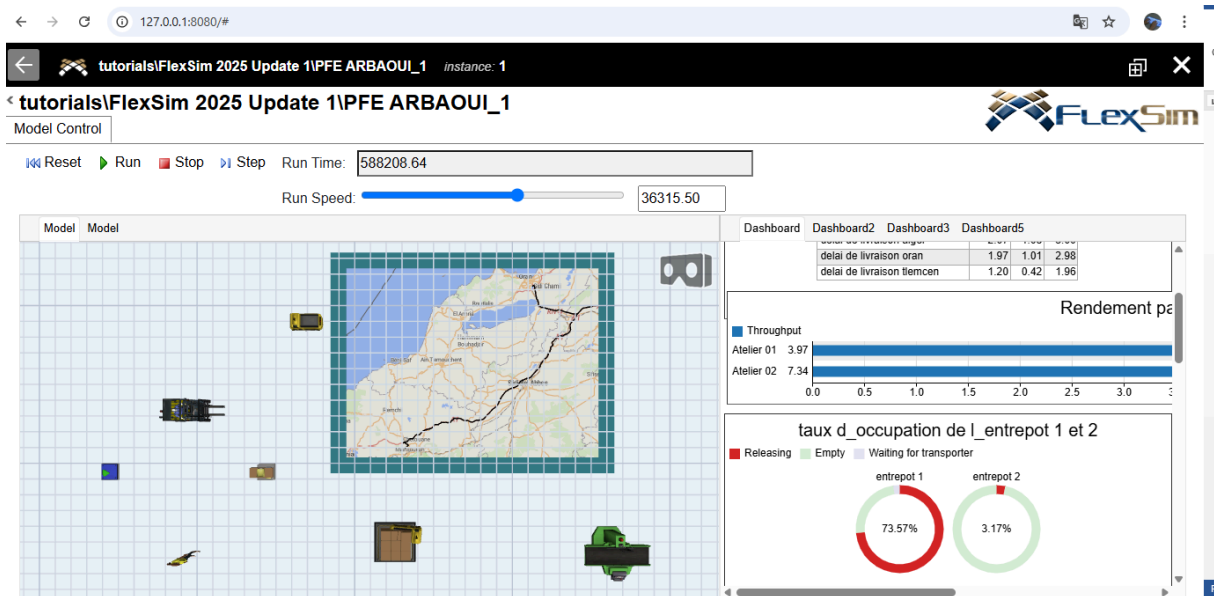


Figure III.20 : Test d'accès à distance du jumeau numérique.

III.6. conclusion

En conclusion, ce chapitre a permis de détailler l'ensemble du processus de modélisation et de simulation de la chaîne logistique d'un atelier textile à l'aide du logiciel FlexSim. À travers une approche structurée, nous avons représenté les flux physiques, les opérations internes des ateliers, les délais logistiques et la distribution finale, en intégrant les différentes entités du système : fournisseurs, entrepôts, unités de production, et clients finaux.

L'utilisation de FlexSim s'est révélée particulièrement pertinente pour simuler le comportement réel du système, identifier les goulets d'étranglement, analyser les indicateurs clés de performance et tester des configurations représentatives de la réalité industrielle. Cette simulation de base a posé les fondations d'un **jumeau numérique**, dont l'architecture a été complétée par une solution de visualisation en temps réel à l'aide d'un second poste de travail. Grâce à la synchronisation entre FlexSim et une base de données connectée à un tableau de bord interactif, cette méthode assure un suivi dynamique des performances logistiques et constitue un outil d'aide à la décision efficace.

En somme, ce chapitre a démontré l'intérêt stratégique de la simulation numérique dans la compréhension, l'optimisation et le pilotage d'un système logistique textile, tout en s'inscrivant pleinement dans la dynamique de l'Industrie 4.0.

En conclusion, la modélisation via FlexSim combinée à une visualisation en temps réel offre une base solide pour le développement d'un jumeau numérique opérationnel, capable de soutenir des prises de décision agiles, de réduire les risques et d'améliorer durablement les performances logistiques.

CHAPITRE IV: ANALYSE DES RÉSULTATS

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons une analyse comparative des résultats issus de la simulation de deux scénarios logistiques, modélisés dans l’environnement FlexSim après la création du jumeau numérique de notre chaîne logistique. Cette analyse vise à évaluer l’impact de la localisation des unités de production sur la performance globale du système, notamment en termes de délais de livraison, de rendement des ateliers et d’occupation des entrepôts.

La simulation nous a permis d’observer le comportement logistique sous différentes configurations, en reproduisant les flux physiques et informationnels. Les données collectées ont été analysées à l’aide d’indicateurs clés, afin d’identifier les goulots d’étranglement, les points de performance et les opportunités d’optimisation. Ce chapitre fournit ainsi une base solide pour orienter les décisions stratégiques futures, en s’appuyant sur des résultats concrets issus du jumeau numérique.

IV.2. Analyse des tableaux de bord

IV.2.1. Temps d’attente des matières premières

Ce tableau nous aide à identifier les délais d’attente associés à chaque matière première, ce qui permet de détecter les éventuels points de blocage en amont et d’optimiser la gestion des approvisionnements dans la chaîne logistique.

lieu	moyen	Min	Max
temps d’arrivé de fibre	45.22	26.09	71.85
temps d’arrivé de tissu type A	27.94	24.08	31.70
temps d’arrivé de tissu type B	28.27	24.00	31.94
delai_d’expédition 1	18.66	12.25	23.84
delai_d’expédition 2	17.23	12.14	23.92
delai_d’expédition 3	1.44	1.01	1.99
delai de livraison alger	2.11	1.05	2.99
delai de livraison oran	2.17	1.09	2.91
delai de livraison tlemcen	1.14	0.37	2.00

Tableau IV.1 : Temps d’attente des matières premières.

Poste	Moyenne de temps (h)	Remarque
Arrivée fibre	34h	Très long délai, problème critique d'approvisionnement
Tissu type A / B	27 / 28h	Délais également élevés
Délai d'expédition 1 / 2	18h / 17h	Temps de traitement modéré, à surveiller
Délai d'expédition 3	2h	Très fluide
Livraison final aux clients Alger / Oran / Tlemcen	~2h	Excellente performance logistique en aval

Tableau IV.2 : analyse des temps d'attente.

Le tableau IV.1 montre que le principal point de blocage du système réside dans l'approvisionnement en matières premières, notamment les fibres et tissus. Ce délai important (jusqu'à 2 jours) s'explique par le temps de livraison élevé du fournisseur, ce qui ralentit le démarrage du processus de production.

Les délais d'expédition 1 et 2 restent élevés, car les destinations Oran et Alger sont éloignées des ateliers, ce qui allonge considérablement les temps d'expédition. En revanche, l'expédition 3 est très efficace, grâce à la proximité géographique de Tlemcen avec l'atelier, ce qui permet un acheminement rapide et fluide.

IV.2.2. Rendement par heure

Le suivi du rendement par heure permet de détecter rapidement toute variation anormale dans le fonctionnement des ateliers, en servant de repère pour évaluer la stabilité du système.

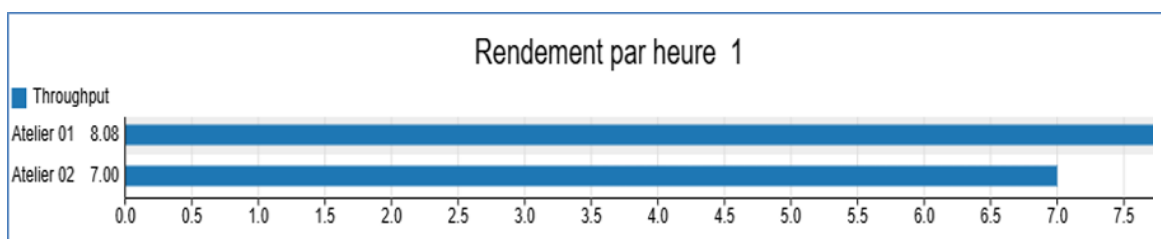


Figure IV.1 : Rendement des deux ateliers par heure.

D'après la Figure IV.1 le rendement des deux ateliers reste stable (8 unités/h pour Atelier 01, 7.00 unités/h pour Atelier 02), ce qui démontre une bonne régularité du système en conditions normales.

Si une chute de rendement est observée dans une prochaine simulation, cela pourrait indiquer un dysfonctionnement, comme une panne, un manque de matière première, ou une saturation en aval.

IV.2.3. Taux d'occupation des entrepôts



Figure IV.2 : Taux d'occupation des entrepôts.

D'après cette figure on remarque que le taux d'occupation des deux entrepôts reste faible (5.34 % pour Entrepôt 1 et 3.89 % pour Entrepôt 2). Cette faible occupation s'explique principalement par le fait qu'au début de la simulation, les entrepôts sont encore en cours de chargement, et que le délai d'arrivée des matières premières est important.

IV.2.4 . Taux d'occupation des ateliers

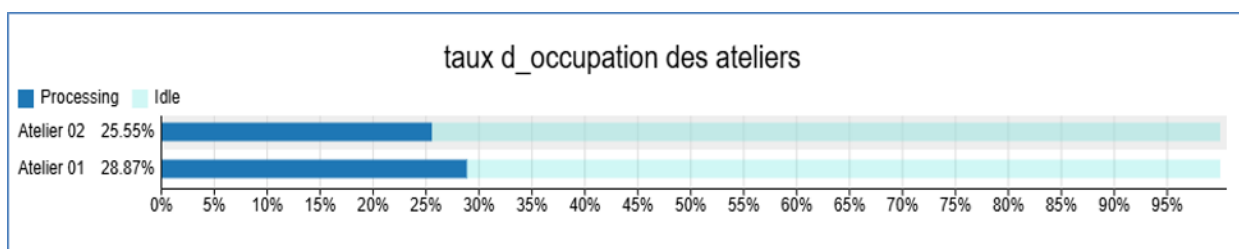


Figure IV.3: Taux d'occupation des deux ateliers

Les taux d'occupation affichés (Atelier 01 : 28.87 %, Atelier 02 : 25.55 %) doivent être interprétés avec prudence car ils reflètent uniquement l'état au début de la simulation, pour un scénario limité à 100 produits livrés.

À ce stade, les deux ateliers sont utilisés à un niveau modéré, ce qui s'explique par :

- Le délai d'arrivée élevé des matières premières provoque une attente en amont.
- Une phase initiale de montée en charge du système, où la cadence n'est pas encore stabilisée.

Au cours de cette simulation, le comportement du système logistique a révélé plusieurs phases caractéristiques de fonctionnement. Une phase initiale de montée en charge du système, durant laquelle la cadence n'est pas encore stabilisée, a été observée. Cette période correspond aux premiers instants de la simulation, où les ressources commencent à se synchroniser et les flux à s'équilibrer progressivement. Elle est souvent marquée par des délais d'attente, des files temporaires ou une sous-utilisation des équipements. Cette étape est essentielle à analyser, car elle permet de mieux comprendre la capacité du système à atteindre un régime stable et à absorber les premières fluctuations de la demande.

Par ailleurs, le délai d'arrivée élevé des matières premières provoque une attente en amont, ce qui perturbe le démarrage fluide de la production. Cette contrainte logistique a un impact direct sur le rendement global de la chaîne, car elle retarde l'alimentation des postes de travail et peut engendrer une sous-utilisation des ressources humaines et matérielles dans les premières étapes du processus.

L'atelier 01 est légèrement plus sollicité, ce qui est en cohérence avec son rendement horaire plus élevé observé précédemment.

Le reste du temps est principalement passé en "Idle" (inactivité), très probablement en attente :

- Soit de l'arrivée de matières premières,
- Soit d'une libération de file d'attente dans les expéditions.

Ce taux devra être réévalué sur une simulation à plus grande échelle pour tirer des conclusions fiables sur la capacité réelle des ateliers à long terme.

IV.2.5 . Taux d'occupation des entrepôts

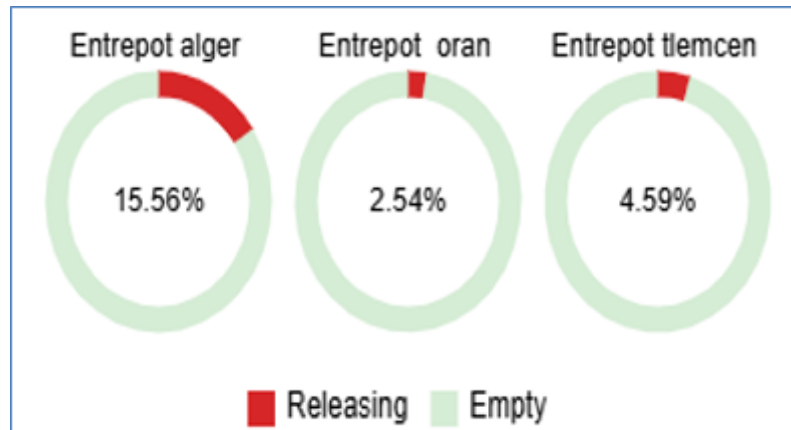


Figure IV.4 : Taux d'occupation des entrepôts.

On remarque que L'entrepôt d'Alger affiche le taux d'occupation le plus élevé, très nettement supérieur à Oran et Tlemcen. Cela reflète une forte demande ou un volume important de produits à livrer vers Alger, combinée à un délai de livraison plus long. Cette situation engendre une accumulation temporaire des produits finis en attente d'expédition, augmentant mécaniquement le taux d'occupation.

En comparaison, les entrepôts d'Oran et Tlemcen sont peu sollicités, ce qui est lié à une demande plus faible de ces wilaya par rapport à Alger.

Cette accumulation est le résultat logique d'un déséquilibre entre la cadence de production et la capacité d'évacuation vers Alger, ce qui n'est pas observé dans les autres régions.

IV.2.6 . Nombre de produits livrés

Cette mesure constitue un outil essentiel pour le pilotage opérationnel, en offrant une visibilité immédiate sur :

- La performance logistique du système.
- Le suivi des objectifs de production et de livraison.
- L'identification d'éventuels écarts ou retards dans la chaîne d'approvisionnement.

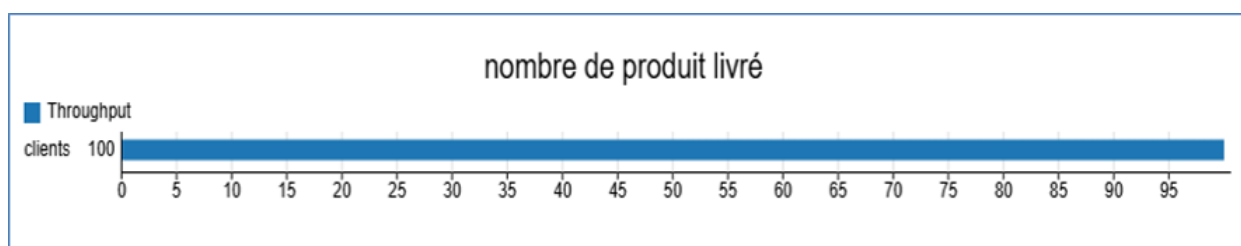


Figure IV.5 : Nombre de produits livrés.

L'indicateur relatif au nombre de produits livrés permet de mesurer en temps réel les quantités effectivement expédiées aux clients. Dans le cas présent, le système affiche un total de 100 unités livrées, ce qui reflète l'état d'avancement de la production et de la distribution à un instant donné.

IV.2.7 . Délai de livraison pour les trois entrepôts

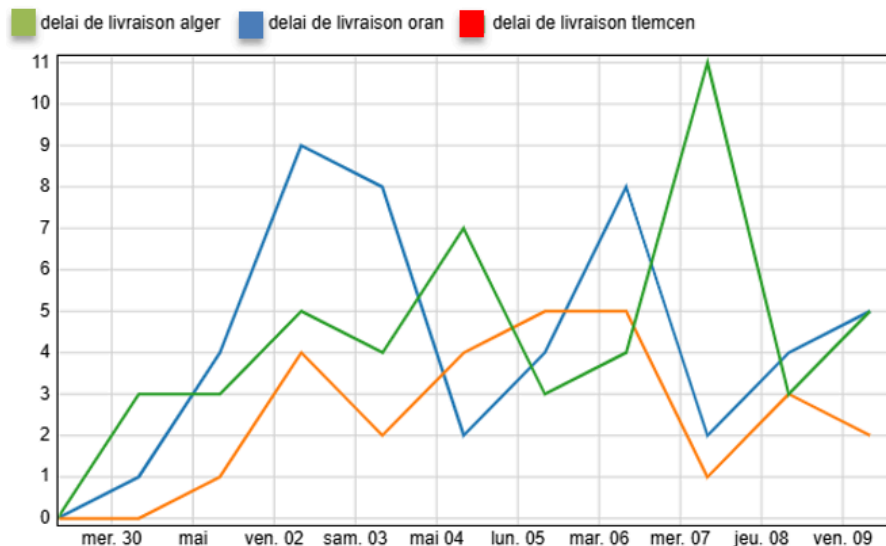


Figure IV.6 : Délai de livraison.

Ce graphique illustre l'évolution des délais de livraison vers trois destinations : Alger, Oran et Tlemcen. On observe que la ville d'Alger présente les délais les plus instables et les plus élevés, ce qui peut refléter des problèmes logistiques importants tels que l'éloignement géographique, des contraintes de transport ou une mauvaise planification. En comparaison, **Tlemcen** affiche des délais de livraison plus courts et plus réguliers, indiquant une meilleure maîtrise des flux logistiques. **Oran** présente une situation intermédiaire, avec des fluctuations notables et des pics importants, suggérant des perturbations ponctuelles ou des variations de la demande. Cette analyse met en évidence l'impact de la localisation géographique sur la performance logistique, en particulier en matière de rapidité et de fiabilité des livraisons.

IV.3. Proposition d'amélioration (ajout d'un troisième atelier à Alger)

Dans le but d'améliorer les performances logistiques du système initial et de réduire les délais de livraison vers la région d'Alger, un deuxième scénario a été conçu. Ce scénario repose sur l'ajout d'un troisième atelier de production localisé à Alger, en complément des deux ateliers déjà existants (Atelier 1 et Atelier 2).

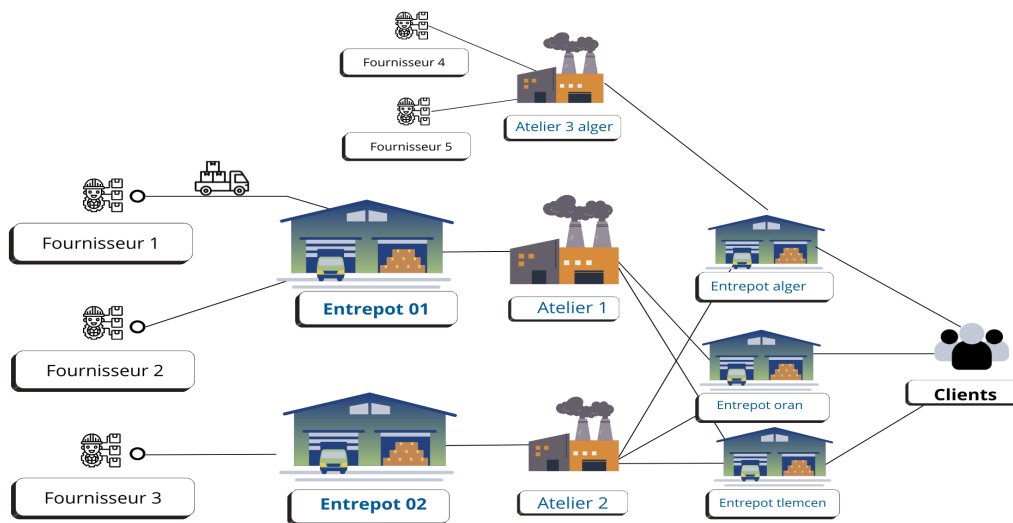


Figure IV.7: Scénario d’intégration d’un troisième atelier à Alger.

L’objectif principal de cette évolution est d’optimiser la couverture géographique de la production en rapprochant l’unité de fabrication de la zone de consommation finale. Le nouvel Atelier 3 à Alger est directement alimenté par deux nouveaux fournisseurs (Fournisseur 4 et Fournisseur 5), et fonctionne de manière autonome par rapport aux entrepôts internes MP1 et MP2. Ce choix stratégique permet une réduction significative des temps de transit, notamment pour les commandes destinées à la capitale. Le système étudié est représenté dans la figure ci-dessous :

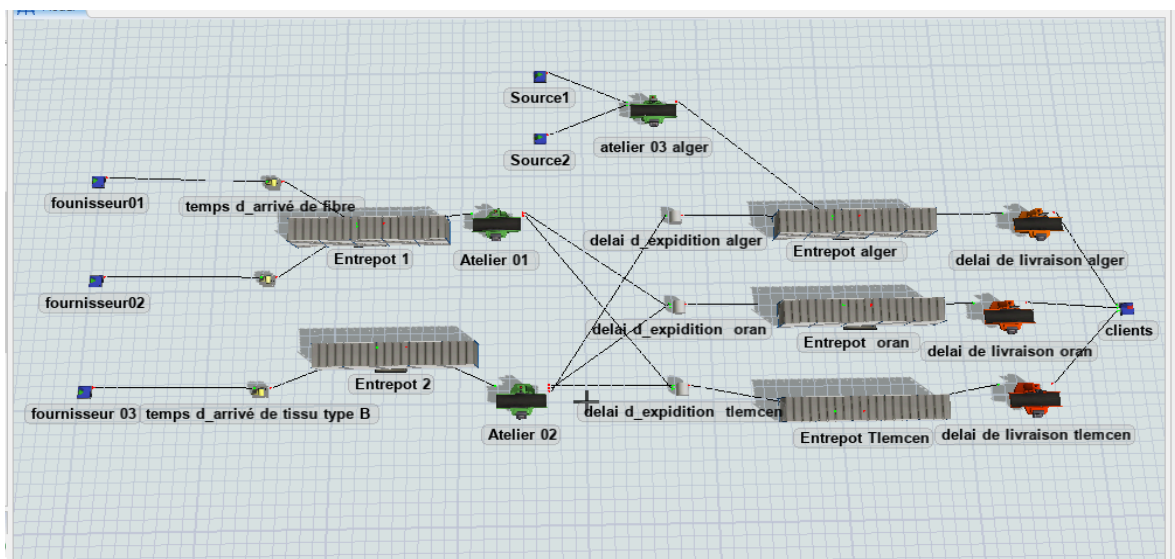


Figure IV.8 : Capture d’écran de la simulation du deuxième scénario .

Les produits finis issus de l'Atelier 3 sont acheminés directement vers l'entrepôt régional d'Alger, sans transiter par les autres plateformes de production. Cette organisation vise à :

- Réduire la saturation des Ateliers 1
- Désengorger les flux de distribution vers Alger
- Améliorer la réactivité du système logistique en cas de forte demande locale.

IV.4. Comparaison entre les 2 scénarios

☒ contexte

Dans ce travail, deux scénarios logistiques ont été modélisés et simulés sous FlexSim pour analyser l'impact de la localisation des ateliers de production sur la performance globale de la chaîne d'approvisionnement.

Chaque scénario simule la livraison de 100 produits finis mais à des dates différentes, ce qui permet d'observer l'évolution des performances dans le temps.

IV.4.1. Scénario 1 : Deux ateliers situés à Tlemcen

☒ Description :

Date de simulation analysée : 05/05/2025 à 18h17

-Atelier 01 et Atelier 02 sont tous deux implantés à Tlemcen.

-Les fournisseurs approvisionnent les entrepôts 1 et 2, puis les produits sont transformés dans les ateliers.

-Les produits finis sont ensuite expédiés vers les trois wilayas : Alger, Oran et Tlemcen.

☒ Observations :

-Le transport vers Alger et Oran implique des délais importants, car les deux destinations sont éloignées de Tlemcen.

-Ce scénario centralise la production sur une seule zone, ce qui limite la flexibilité logistique.

-L'efficacité de livraison vers Alger est pénalisée, ce qui peut générer des accumulations dans l'entrepôt d'Alger ou des retards.

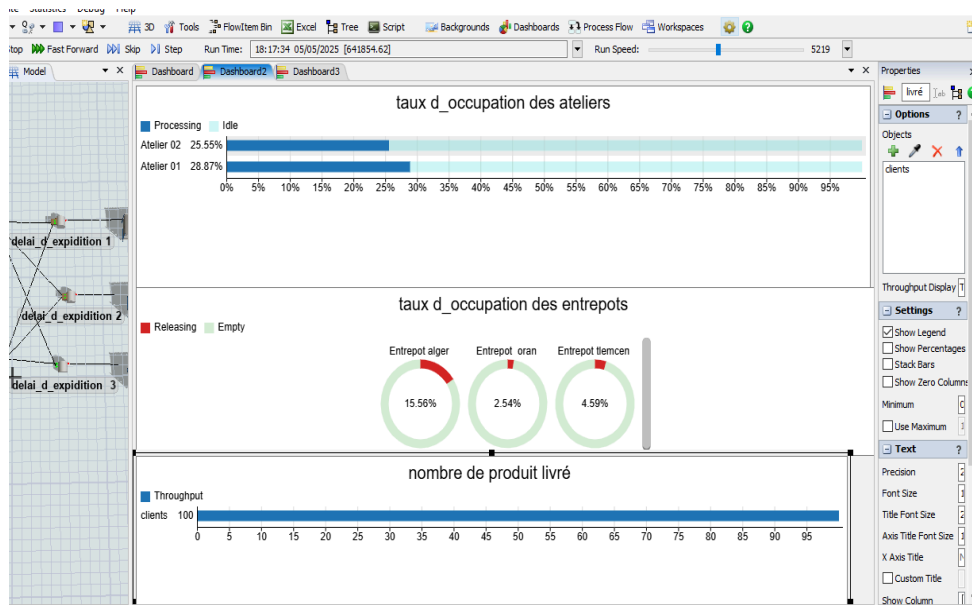


Figure IV.9 : Taux d'occupation des entrepôts et des ateliers - Scénario 1

📌 Résultats clés :

Indicateur	Valeur
Rendement horaire total	Atelier 01 : 8.08 u/h – Atelier 02 : 7.00 u/h
Délai moyen livraison Alger	~6 à 10 h (graphique)
Occupation Entrepôt Alger	15.56 %
Taux d'occupation des ateliers	~28 % (activité modérée en raison de l'attente)
Livraison totale	100 produits

Tableau IV.3 : Résultats clés - Scénario 1.

IV.4.2. Scénario 2 : Trois ateliers – Deux à Tlemcen, un à Alger

🔍 Description :

Date de simulation analysée : 04/05/2025 à 17h45

-Le système est enrichi par un troisième atelier situé à Alger.

-Les deux ateliers à Tlemcen continuent de desservir Tlemcen et Oran, tandis que le nouvel atelier à Alger cible les livraisons vers Alger et ses régions voisines.

-Deux sources d’approvisionnement distinctes sont visibles, alimentant l’ensemble du réseau de production.

🔍 Observations :

- Ce scénario introduit une décentralisation intelligente de la production.

-La présence d’un atelier à Alger permet de réduire significativement les délais de livraison vers cette wilaya.

-Cela améliore la capacité de réponse aux pics de demande dans le nord du pays et rééquilibre la charge entre les sites.

-Moins de dépendance logistique sur les expéditions longues depuis Tlemcen ce qui implique un gain en réactivité et réduction des coûts de transport.

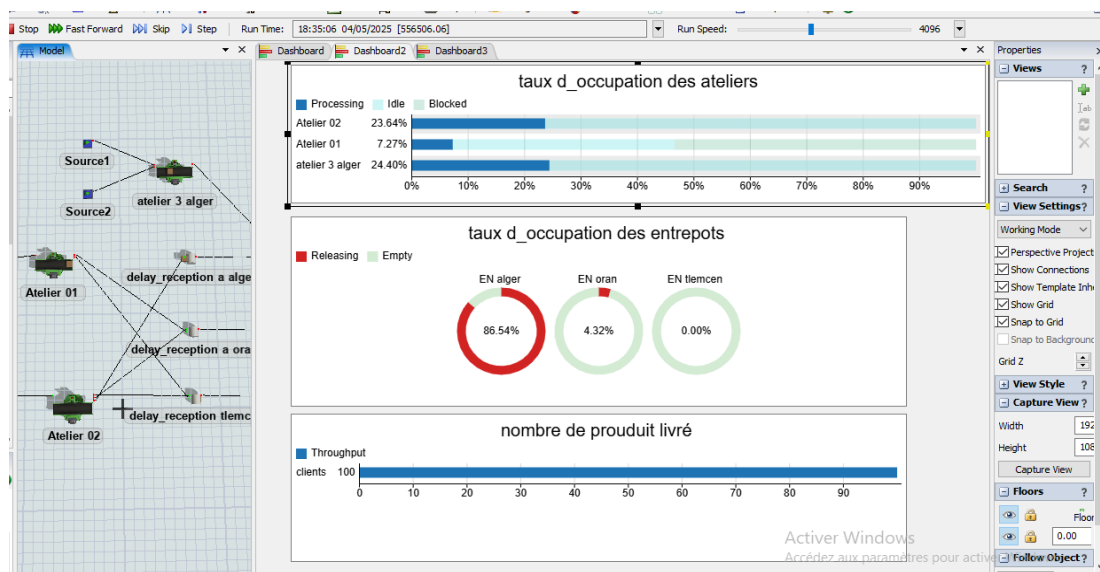


Figure IV.10 : Taux d’occupation des entrepôts et des ateliers - Scénario 2.

☐ **Résultats clés :**

Indicateur	Valeur
Rendement horaire total	Atelier 01 : 7 u/h – Atelier 02 :6 u/h – Atelier 03 Alger : 9 u/h
Délai moyen livraison Alger	~2 h (forte réduction)
Occupation Entrepôt Alger	86.47 % (ce chiffre traduit une saturation possible en raison d'une forte pression de la demande)
Taux d'occupation ateliers	Atelier Alger actif à 23 % , les autres peu sollicités
Livraison totale	100 produits

Tableau IV.4 : Résultats clés - Scénario 2.

IV.5. Implantation de l'atelier supplémentaire

S'inscrit dans une logique d'adaptation régionale, où la proximité entre les unités de fabrication et les centres de consommation devient un levier essentiel pour accroître la performance globale de la chaîne logistique textile.

Cette nouvelle configuration a été modélisée dans FlexSim afin de permettre une comparaison dynamique des deux scénarios, en s'appuyant sur des indicateurs clés tels que :

- Le délai moyen de livraison
- Le taux d'utilisation des ateliers
- L'équilibre des charges entre les différentes unités de production.

Dans le cadre de ce travail, nous avons utilisé la simulation comme un outil d'analyse décisionnelle afin d'évaluer l'impact potentiel de l'ajout d'un troisième atelier à Alger sur l'efficacité globale de notre chaîne logistique textile. Cette approche nous a permis de tester virtuellement une solution opérationnelle sans engager immédiatement de ressources physiques ou financières.

Le scénario modélisé représente une hypothèse réaliste d'évolution du système, répondant à des besoins identifiés, notamment la réduction des délais de livraison vers Alger et le désengorgement des ateliers existants. Grâce à FlexSim, nous avons pu observer de manière dynamique les effets de cette modification sur plusieurs indicateurs clés tels que le temps moyen de transit, le taux d'occupation des ateliers, ou encore la répartition des flux de production.

Ce type de simulation offre l'avantage de visualiser, comparer et valider des choix stratégiques avant leur mise en œuvre concrète. Ainsi, en simulant l'implantation d'un nouvel atelier, nous avons pu mesurer les bénéfices potentiels d'une telle décision, et disposer d'éléments tangibles pour orienter une future phase d'investissement ou de réorganisation.

Le scénario 2 présente une amélioration significative en termes de flexibilité, rapidité de livraison et optimisation des flux logistiques, notamment pour la wilaya d'Alger et les régions voisines. Il constitue une stratégie pertinente d'extension du réseau de production pour répondre efficacement à une demande croissante dans le nord du pays.

IV.6. Conclusion

Les résultats obtenus montrent clairement que le deuxième scénario, intégrant un atelier de production situé à Alger, améliore significativement la performance logistique de l'entreprise, notamment pour la livraison vers le Nord. L'atelier d'Alger permet non seulement de réduire considérablement les délais de livraison, mais également d'absorber plus efficacement la demande élevée de cette région.

Cependant, la saturation de l'entrepôt d'Alger (86.47%) dans ce scénario signale une nécessité d'optimiser les flux de sortie, peut-être en augmentant la fréquence d'expédition ou en ajustant la capacité de stockage.

En conclusion, la décentralisation partielle de la production améliore la réactivité, le rendement local, et réduit les coûts logistiques liés au transport longue distance. Ce modèle représente donc une solution viable et performante, à valider dans une phase réelle.

Conclusion générale

Dans un environnement industriel en constante évolution, où la compétitivité repose sur la rapidité, la précision et l'adaptabilité, la logistique se révèle être un levier stratégique majeur. Ce mémoire a mis en évidence l'importance croissante de la transformation numérique dans la gestion des chaînes logistiques, en s'appuyant sur des technologies émergentes telles que les jumeaux numériques et les outils de simulation dynamique.

L'approche adoptée dans ce travail, combinant modélisation, simulation et visualisation en temps réel, a permis de démontrer concrètement les apports de ces technologies pour analyser, anticiper et optimiser les performances logistiques. La mise en œuvre d'un jumeau numérique fonctionnel a offert une vision globale et interactive du système étudié, facilitant la prise de décision et la détection proactive des inefficacités.

Les résultats obtenus à travers la comparaison de scénarios logistiques ont confirmé que la configuration du réseau de production influence directement la performance globale : une meilleure répartition des ressources contribue à réduire les délais de livraison, à accroître la réactivité face aux demandes locales et à optimiser les coûts opérationnels.

En définitive, cette étude souligne que le recours aux jumeaux numériques ne constitue plus une simple tendance technologique, mais bien une solution stratégique pour relever les défis de l'industrie 4.0. En intégrant ces outils dans leur démarche d'amélioration continue, les entreprises peuvent aspirer à une gestion logistique plus agile, plus efficace et plus durable.

Ce travail ouvre la voie à plusieurs pistes de recherche et d'évolution. À l'avenir, l'intégration de données en temps réel issues de capteurs IoT pourrait enrichir davantage le jumeau numérique et améliorer sa réactivité. De plus, l'ajout de modules d'intelligence artificielle permettrait d'automatiser certaines prises de décision et de proposer des scénarios prédictifs encore plus pertinents. L'élargissement de la modélisation à l'ensemble de la chaîne logistique étendue - y compris les fournisseurs et les clients - offrirait une vision systémique plus complète. Enfin, des expérimentations en environnement réel pourraient venir valider les apports du jumeau numérique dans des contextes industriels variés, consolidant ainsi son rôle comme outil d'aide à la décision incontournable dans la logistique de demain.

Bibliographie

- [1] Tixier, D., Mathe, H., & Colin, J. (2000). *La logistique d'entreprise – Vers un management plus compétitif*. Paris : Dunod.
- [2] Le Coin des Entrepreneurs. (2025, 7 mai). *La logistique en entreprise : définition et enjeux*. Le Coin des Entrepreneurs.
- [3] Ministère de l'Économie, des Finances et de la Souveraineté industrielle et numérique. (n.d.). *La fonction Logistique*. Récupéré le 7 mai 2025, de
- [4] Facon, P. (2012). *La logistique en entreprise : rôle, importance et gestion*. Le Coin des Entrepreneurs.
- [5] Mecalux. (2025, 7 mai). *Supply chain : définition et éléments clés*. Mecalux.
- [6] Dornier, P-P., & Fender, M. (2007). *La logistique globale et le Supply Chain Management – Enjeux, principes, exemples (2e éd.)*. Paris : Éditions d'Organisation.
- [7] Manutan. (2023, 17 octobre). *Quels sont les avantages et les enjeux de la digitalisation de la supply chain ?*. Le Blog des experts achats. Récupéré le 7 mai 2025.
- [8] Blanchet, M. (2017). *Industrie 4.0 : nouvelle donne industrielle, nouveau modèle économique*. *Géoéconomie*, (82), 37–53
- [9] Proaction International. (2021, 25 mars). *Industrie 4.0 : 9 technologies pour propulser votre virage numérique*.
- [10] Nathalie Julien and Éric Martin. *Le jumeau numérique: de l'intelligence artificielle à l'industrie agile*. Dunod, 2020
- [11] IBM. (2024, 5 août). *Qu'est-ce qu'un jumeau numérique ?*.
- [12] Grieves, M., & Vickers, J. (2017). Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. In F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt, & A. Alves (Eds.), *Transdisciplinary perspectives on complex systems: New findings and approaches* (pp. 85–113). Springer.
- [13] Grieves, M. (2014). *Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication*
- [14] **Digital twin**. *Wikipedia*. Dernière modification le 1er mai 2025.

BIBLIOGRAPHIE

- [15] Léandre Guitard. Méthode de conception intégrée d'un jumeau numérique d'équipement de production 4.0. Génie logiciel [cs.SE]. Université Grenoble Alpes [2020-..], 2023. Français. ffNNT : 2023GRALI065ff. fftel-04329617f
- [16] Dimitri Renard^{1,2}, Ramla Saddem² , David Annebicque² , Bernard Riera² 1 PROSYST, Valenciennes, France 2CReSTIC, Université Reims Champagne-Ardenne, Reims, France
- [17] TAO, Fei, XIAO, Bin, QI, Qinglin, CHENG, Jiangfeng et JI, Ping, 2022i. Digital twin modeling. Journal of Manufacturing Systems. juillet 2022. Vol. 64, pp. 372-389. DOI 10.1016/j.jmsy.2022.06.015.
- [18] JONES, David, SNIDER, Chris, NASSEHI, Aydin, YON, Jason et HICKS, Ben, 2020e. Characterising the Digital Twin: A systematic literature review. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 1 mai 2020. Vol. 29, pp. 36-52. DOI 10.1016/j.cirpj.2020.02.002
- [19] STARK, Rainer et DAMERAU, Thomas, 2019h. Digital Twin. In: CHATTI, Sami et TOLIO, Tullio (éd.), CIRP Encyclopedia of Production Engineering. [en ligne]. Berlin, Heidelberg: Springer. pp. 1-8. [Consulté le 26 janvier 2023]. ISBN 978-3-642-35950-7.
- [20] NEGRI, Elisa, FUMAGALLI, Luca et MACCHI, Marco, 2017g. A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems. Procedia Manufacturing. 2017. Vol. 11, pp. 939-948. DOI 10.1016/j.promfg.2017.07.198.
- [21] KRITZINGER, Werner, KARNER, Matthias, TRAAR, Georg, HENJES, Jan et SIHN, Wilfried, 2018f. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. IFAC-PapersOnLine. 2018. Vol. 51, no. 11, pp. 1016-1022. DOI 10.1016/j.ifacol.2018.08.474..
- [22] GRIEVES, Michael, 2023c. Digital Model, Digital Shadow, and Digital Twin. [en ligne]. 12 mars 2025 .
- [23] ENJOY. (s.d.). *Jumeau numérique – Une nouvelle conception du bâtiment*.
- [24] Younes ELGHAZI Abdelkrim Ramzi YELLES CHAOUICHE. Implémentation d'un digital twin des stations commandées par automates de la mps500, 2018.
- [25] KNAPP. (2023, 2 novembre). *Jumeau numérique en logistique : définition, avantages et domaines d'application*.
- [26] Léandre Guitard. Méthode de conception intégrée d'un jumeau numérique d'équipement de production 4.0. Génie logiciel [cs.SE]. Université Grenoble Alpes [2020-..], 2023. Français. ffNNT : 2023GRALI065ff. fftel-04329617

BIBLIOGRAPHIE

- [27] Dumoutier, A.-L., Lions, J., & Burlat, P. (2022). *Les apports du Jumeau Numérique pour le pilotage en flux tiré Conwip*. *Revue Française de Gestion Industrielle*, 36(1), 112–123. DOI: [10.53102/2022.36.01.929](https://doi.org/10.53102/2022.36.01.929)
- [28] Gürdür Broo, D., & Schooling, J. (2023). Digital twins in infrastructure: definitions, current practices, challenges and strategies. *International Journal of Construction Management*, 23(7), 1254–1263. DOI: [10.1080/15623599.2021.1966980](https://doi.org/10.1080/15623599.2021.1966980)
- [29] HAL. (s.d.). *Le jumeau numérique pour le pilotage de la performance*.
- [30] Dassault Systèmes & FDA. (2023). *Le jumeau numérique en santé : état des lieux et perspectives d'application à l'hôpital*. ResearchGate.
- [31] Alcimed. (2022). *Jumeaux numériques et médecine personnalisée : une technologie prometteuse*. Consulté sur <https://www.alcimed.com/fr/actualites/jumeaux-numeriques-et-medecine-personnalisee>
- [32] KnowHow. (2023). *Le jumeau numérique dans le secteur de la santé*.
- [33] Tchana De Tchana, Y. (2021). *Contribution à la gestion de l'exploitation des infrastructures linéaires par les jumeaux numériques* [Thèse de doctorat, Université de Technologie de Troyes]. HAL.
- [34] Innowise. (2023). *Le jumeau numérique dans le secteur de la construction*.
- [35] Josse, F. (2024). *Le jumeau numérique dans la planification urbaine*. SHS Web of Conferences.
- [36] AllVectorLogo. (2019, 4 avril). *FlexSim Software Products, Inc. Logo* [Fichier image].
- [37] Pirola, F. (s.d.). *Introduction to simulation and FlexSim*. DIGIFO.
- [38] Habaieb, M. (s.d.). *Formation FlexSim 21.0*. Scribd.
- [39] FlexSim Software Products, Inc. (2022). *Material Handling Brochure*.
- [40] Mahraz, M.-I., Benabbou, L., & Berrado, A. (2021). *La transformation digitale de la chaîne d'approvisionnement*. ResearchGate.
- [41] Chaib, I., El Omari Alaoui, Z., & Cherkaoui, M. (2024). La transformation digitale : Une composante essentielle de la performance de la chaîne logistique. Dans *Logistics & supply chain à l'ère de la digitalisation et de l'intelligence artificielle* (pp. 54–77). Agence Francophone.
- [42] Dorkenoo, C., & Crespín, A. (2016). *Réussir sa transformation digitale : RH, marketing, data, logistique*. Eyrolles.

BIBLIOGRAPHIE

- [43] Futura Sciences. (2024, juin 17). *Le jumeau numérique au service de la santé*.
- [44] ACCA Software. (n.d.). *Logiciel de jumeau numérique gratuit | usBIM*.
- [45] Chaib, I., El Omari Alaoui, Z., & Cherkaoui, M. (2024). *La transformation digitale : Une composante essentielle de la performance de la chaîne logistique*. Agence Francophone.
- [46] Soosay, C. A., Hyland, P. W., & Ferrer, M. (2008). Supply chain collaboration: capabilities for continuous innovation. *Supply Chain Management: An International Journal*, 13(2), 160–169.
- [47] Flynn, B. B., Huo, B., & Zhao, X. (2010). The impact of supply chain integration on performance: A contingency and configuration approach. *Journal of Operations Management*, 28(1), 58–71.
- [48] Tao, F., Sui, F., Liu, A., Qi, Q., & Nee, A. Y. C. (2019). Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105, 3563–3576.
- [49] Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W. (2018). Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 1016–1022.
- [50] Ivanov, D., & Dolgui, A. (2020). A digital supply chain twin for managing the disruption risks and resilience in the era of Industry 4.0. *Production Planning & Control*, 32(9), 775–788.
- [51] Batty, M., Lin, D., & Wang, J. (2023). Applications of digital twins in logistics: An overview and future directions. *Journal of Digital Supply Chain Systems*, 5(2), 45–62.