الجـــــــــــــــــــــــــــــمـهـوريـــــة الجـــــــــــــــزائـريـة الديمـــــــقـراطيـة الـشـــــــــعـبيـة

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التـــــــــــــــــــــــــــــــعـليـم العـــــــالي والبـــــــــحث العـــــلـمـــي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جـــــــــــــــامعة أبي بكـــر بـلـقـايد – تـلـمســـــــــــــان –

Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



Projet de Fin d'étude Master

Génie Industriel

Spécialité : Ingénierie de la production

Intitulé :

Industrie 5.0:Une Voie Vers La Fabrication et La Transformation Numérique

Réalisé par :

RECHAM Abderrahmane & BOULILA Mohamed Tahar

Date de soutenance: le 23/06/2026, devant le jury composé de:

Mr. MIRAOUI Abdelkader	MCA	Univ de Tlemcen	Président
Mme. HOUBAD Yamina	MCB	Univ de Tlemcen	Examinatrice
Mme. ABDELLAOUI Wassila	MCB	Univ de Tlemcen	Examinatrice
Mme. BOUKENADIL Bahidja	MCA	Univ de Tlemcen	Encadrante

Année universitaire : 2025/2026

Résumé

Ce mémoire analyse le passage de l'Industrie 4.0 à l'Industrie 5.0, en se focalisant sur l'incorporation de l'homme dans les systèmes de production et l'optimisation de la performance industrielle. L'Industrie 4.0 se base sur l'automatisation et la numérisation, alors que l'Industrie 5.0 met en avant une coopération homme-machine pour plus de flexibilité, durabilité et résilience. Une étude simulée effectuée avec FlexSim facilite la mise en parallèle des deux méthodes à l'aide d'indicateurs de performance tels que le débit, le travail en cours, le temps d'attente et la durée du séjour. Les conclusions indiquent que l'Industrie 5.0 permet un équilibre supérieur entre performance et aspect humain, tout en optimisant plusieurs indicateurs clés comparativement à l'Industrie 4.0.

Mots-clés : Industrie 4.0, Industrie 5.0, Transformation numérique, Fabrication intelligente, Collaboration homme–machine, Simulation industrielle FlexSim, Indicateurs de performance, Productivité.

الملخص

تدرس هذه المذكرة الانتقال من الصناعة 4.0 إلى الصناعة 5.0، مع التركيز على دمج الإنسان في أنظمة الإنتاج وتحسين الأداء الصناعي. تعتمد الصناعة 4.0 على الأنظمة والرقمنة، بينما تقدم الصناعة 5.0 تعاونا بين الانسان والالة، تهدف الى تحقيق المزيد من المرونة بمقارنة النهجين من خلال مؤشرات الأداء مثل الإنتاجية، الاستدامة والقدرة على التحمل باستخدام برنامج فلكسيم، حيث تبين النتائج ان الصناعة 5.0 توفر توازنا أفضل بين الأداء والعامل البشري مع تحسين بعض المؤشرات الرئيسية مقارنة بالصناعة 4.0.

الكلمات المفتاحية: الصناعة 4.0، الصناعة 5.0، التحول الرقمي، التصنيع الذكي، التعاون بين الإنسان والآلة، المحاكاة الصناعية، مؤشرات الأداء الإنتاجية.

Abstract

This thesis examines the shift from Industry 4.0 to Industry 5.0, emphasizing the enhancement of industrial performance and the incorporation of humans into production processes. While Industry 5.0 includes a human-machine collaboration strategy targeted at enhancing flexibility, sustainability, and resilience, Industry 4.0 is primarily focused on automation, digitalization, and system connectivity. In order to evaluate the two paradigms using important performance metrics like throughput, work-in-process (WIP), waiting time, and stay time, simulation research utilizing FlexSim was carried out. The findings demonstrate that, when compared to Industry 4.0, Industry 5.0 improves a number of important metrics while offering a better balance between performance and human participation.

Keywords: Industry 4.0, Industry 5.0, Digital transformation, Smart manufacturing, Human–machine collaboration, Industrial simulation FlexSim, Performance indicators.

Dédicaces

La vie n'est qu'un éclair,

Et un jour de réussite est un jour très cher

Je dédie ce mémoire

A mon cher père
Et ma très chère mère

Pour l'éducation et le grand amour dont ils m'ont entouré depuis ma naissance.
Et pour leurs patiences et leurs sacrifices

A mes chers frères : Hatem ; Ouali.

A ma chère sœur

A tous mes proches : mes tantes, mes cousines, mes voisins et toute la famille.

A tous ceux qui m'aiment ; A tous mes ami (e) s ;

A tous ceux que j'aime ;

Mohamed Tahar

Dédicaces

La vie n'est qu'un éclair,
Et un jour de réussite est un jour très cher.

Je dédie ce mémoire

A mon cher père
Et ma très chère mère

Pour l'éducation et le grand amour dont ils m'ont entouré depuis ma naissance.
Et pour leurs patiences et leurs sacrifices.

A mon cher frère : Younes

A mes chères sœurs

A tous mes proches : mes tantes, mes cousines et à ma grande mère et mes voisins et toute la famille.

A tous ceux qui m'aiment ; A tous mes ami (e) s ;

A tous ceux que j'aime ;

Abderrahmane

Remerciements

Louanges à Dieu le tout puissant, grâce à qui nous avons pu faire tout ce travail.

Nos remerciements s'adressent à toutes les personnes qui, d'une manière ou d'une autre nous ont permis de mener à son terme ce mémoire et plus particulièrement :

A notre encadrant, qui nous ont grandement aidées à définir avec circonspection le sujet de notre travail, et qui par leurs conseils et idées, nous ont permis d'améliorer la qualité du contenu. Leurs aides techniques ont été primordiaux pour avancer dans notre projet.

Nos vifs remerciements vont aux membres de Jury, pour avoir accepté de juger notre travail.

A nos enseignants, à qui nous devons notre formation, qu'ils trouvent ici l'expression de nos sentiments les plus respectueux et de notre profonde gratitude pour leur gentillesse, leur disponibilité et leur soutien.

A nos chers parents, nos frères et sœurs et nos familles qui nous ont toujours soutenus le long de notre formation.

A tous nos amis, pour leur soutien moral et aide précieuse

Table des matières

Introduction Générale.....1
Chapitre 01 : Fondements et Évolution de l'Industrie 5.0.....3
1. Rétrospective : De la machine à vapeur à l'usine 4.0.....4
2. Les limites de l'Industrie 4.0 (technocentrisme).....5
3. Définition et piliers de l'Industrie 5.0.....6
3.1. Approche centrée sur l'humain.....7
3.2. Durabilité et économie circulaire.....8
3.3. Résilience des systèmes de production.....8
4. Cadre théorique et conceptuel de l'étude.....9
4.1. Cadre conceptuel.....11
4.1.1. Les éléments de cadre conceptuel.....11
5. Conclusion.....12
Chapitre 02 : Les Technologies au Service du Smart Manufacturing.....13
1. Cobotique : Collaboration physique homme-robot.....14
2. Intelligence Artificielle et aide à la décision.....16
3. Jumeaux Numériques — Digital Twins — et simulation.....18
4. Internet des Objets Industriel — IIoT — et Cloud.....20
5. Conclusion.....23
Chapitre 03 : Dimensions Humaines et Environnementales.....25
1. L'Opérateur 5.0 : Nouvelles compétences et bien-être.....27
1.1. De l'opérateur exécutant à l'opérateur augmenté :.....27
1.2. Les nouvelles compétences de l'opérateur 5.0.....28
1.3. Le bien-être au travail comme condition de performance.....28
2. Green Manufacturing : Optimisation énergétique et réduction des déchets.....29
2.1. Définition et enjeux du green manufacturing.....29
2.2. L'optimisation énergétique dans l'usine intelligente.....30
2.3. La réduction des déchets et l'économie circulaire.....31

3.Résilience de la chaîne logistique face aux crises 31
3.1. **La vulnérabilité des chaînes logistiques modernes**.....31
4. Éthique et protection des données industrielles 32
4.1. Le rôle des technologies numériques dans la résilience.....32
4.2. Vers une chaîne logistique agile, durable et collaborative.....33
4.3. Les données industrielles comme ressource stratégique.....33
4.4. Cybersécurité et protection des systèmes industriels 34
4.5. Éthique, transparence et confiance numérique 34
5. Conclusion 35
Chapitre 04 : Modélisation et simulation avec Flexsim 37
1. Présentation de logiciel Flexsim.....38
1.1. Principe de fonctionnement.....38
2. Description du système de production simulé 39
2.1. modèle de l'Industrie 4.0 39
2.2. Modèle de l'Industrie 5.0.....41
2.3. Paramètres des composants du système.....42
3. Indicateur de Performance 42
3.1. Les résultats de simulation 43
3.1.1. L'industrie 4.0 43
3.1.2. L'industrie 5.0 47
3.2. Interprétation des résultats 49
Conclusion Générale 51

Liste des figures

Figure 1 : Révolutions industrielles de la machine à vapeur jusque à l'industrie 5.0 5

Figure 2 : Les trois piliers de l'industrie 5.0 9

Figure 3 : Modèle du système cobotique dans lequel l'homme et un système robot collaborent pour réaliser une tâche. 16

Figure 4 : L'IA générative dans l'industrie manufacturière intelligente. 18

Figure 5 : La conception du jumeau numérique pour la fabrication. 20

Figure 6 : The general architecture of Industrial Internet of Things (IIoT). 23

Figure 7 : Cadre pour l'alimentation des lignes de production dans une perspective Industrie 5.0. 26

Figure 8: Operator 5.0 human robot collaboration in smart manufacturing.....27

Figure 9: Industrial data protection and cybersecurity architecture diagram. 34

Figure 10 : Modèle Flexsim présenté l'industrie 4.0.....40

Figure 11 : Modèle de Flexsim présenté l'industrie 5.0 41

Figure 12 : Work in process (WIP) 43

Figure 13 : le temp de Cycle.....44

Figure 14 : Le résultat obtenue pour Throughput 45

Figure 15 : Le taux utilisation de chaque machine 46

Figure 16: Work in process (WIP) 47

Figure 17: le temp de Cycle.....47

Figure 18: résultat obtenue pour Throughput 48

Figure 19: Le taux utilisation de chaque machine 48

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Paramètres des composants 44

Tableau 2 : Les résultats obtenus avec meilleur système 52

Liste d’abréviations

I5.0	Industrie 5.0
I4.0	Industrie 4.0
AI	Artificial intelligence
IOT	Internet of things
PLC	Programmable logic controller
GHTI	Initiative allemande pour les hautes technologies
CPS	Systèmes cyber physiques
ERP	Planification des ressources d'entreprise
MES	Systèmes d'exécution de la fabrication
OCDE	Organisation de coopération de développement économiques
NIST	National intitule of standards and technology
SCADA	Supervisory control data and acquisition
WIP	Work in process
KPI	Key performance indicators

Introduction Générale

Dans un contexte global marqué par des mutations rapides des systèmes de production, le secteur industriel traverse une transition progressive, passant de l'Industrie 4.0 à l'Industrie 5.0. L'ère de l'Industrie 4.0 (I4.0) a introduit une révolution axée sur la digitalisation, l'automatisation avancée, l'Internet des objets et l'interconnexion des systèmes de production, contribuant à des gains notables en termes de productivité et de performance. Cependant, ces avancées technologiques ont révélé certaines limites, notamment une faible intégration de la dimension humaine dans les processus de production et des défis liés à la flexibilité, à la durabilité et au bien-être des employés. C'est dans ce contexte qu'émerge l'Industrie 5.0, offrant une vision novatrice et évolutive, centrée sur une collaboration étroite entre l'humain et la machine grâce à l'utilisation de robots collaboratifs (cobots) et sur une approche durable et résiliente des systèmes industriels.

Ce nouveau paradigme ambitionne de replacer l'humain au cœur du processus tout en tirant parti des technologies avancées pour optimiser les performances globales. Cela dit, cette évolution suscite encore des interrogations au sein des communautés scientifique et industrielle, notamment quant à son efficacité réelle vis-à-vis de l'Industrie 4.0. Les questions se concentrent autour d'aspects comme la productivité, les délais de cycle, le volume de travail en cours (WIP), le throughput et la qualité des produits. Ainsi, la problématique principale de ce mémoire s'articule autour de la question suivante : dans quelle mesure l'Industrie 5.0 peut-elle améliorer la performance industrielle par rapport à l'Industrie 4.0 tout en intégrant efficacement le facteur humain dans le système de production ? Pour y répondre, ce travail vise à réaliser une étude comparative entre ces deux paradigmes en s'appuyant sur des simulations effectuées via le logiciel FlexSim. Les principaux indicateurs de performance analysés incluront le throughput, le WIP, les temps d'attente et les temps de séjour, afin d'évaluer concrètement l'impact de l'intégration humaine au sein du système industriel.

Ce mémoire sera structuré en plusieurs sections complémentaires : un premier chapitre axé sur le cadre théorique pour expliquer les concepts clés de l'Industrie 4.0 et 5.0 ; un deuxième chapitre consacré à la méthodologie suivie et au fonctionnement de l'outil de simulation utilisé ; un troisième chapitre réservant une place spécifique à la présentation et à l'interprétation des résultats obtenus ; et enfin, une conclusion générale qui synthétisera les principaux enseignements de cette étude tout en proposant des pistes pour des améliorations futures et des recherches supplémentaires dans le domaine de l'industrie intelligente et durable.

Chapitre 01 : Fondements et Évolution de l'Industrie 5.0

L'industrie 5.0 représente la dernière évolution des systèmes industriels et s'appuie sur les phases précédentes de l'industrialisation [1] ; il s'agit d'un progrès évolutif de l'Industrie 4.0 qui était principalement axée sur la numérisation, l'automatisation et la connectivité des systèmes de fabrication et qui est maintenant proposée pour avoir une perspective plus inclusive qui ajoute aux aspects humains, environnementaux et sociaux de la phase précédente de l'industrialisation [3] .

Par conséquent, la nouvelle vision industrielle met davantage l'accent sur l'évaluation des performances. Celle-ci repose désormais sur l'impact des performances sur le bien-être des employés et sur la durabilité environnementale [2]. Ainsi, dans l'évaluation des performances, les individus retrouvent leur place centrale dans le processus de production, à la fois comme producteurs et innovateurs [1].

Cette transformation repose sur trois piliers : une approche centrée sur l'humain, la durabilité des systèmes industriels et la résilience aux chocs externes. Autrement dit, ces trois éléments constituent le cœur de l'Industrie 5.0 et orientent l'élaboration de la stratégie industrielle.

L'Industrie 5.0 vise à améliorer la collaboration entre les humains et les nouvelles technologies de pointe, notamment l'intelligence artificielle (IA), la robotique et les systèmes interconnectés, afin de créer des environnements de travail plus sûrs, plus flexibles et mieux adaptés aux besoins de chacun [4]. L'avènement de l'Industrie 5.0 marque une évolution des modèles industriels, instaurant un équilibre entre technologie et responsabilité sociale.

1. Rétrospective : De la machine à vapeur à l'usine 4.0

L'évolution observée dans ce domaine indique qu'une réévaluation des méthodes de fabrication traditionnelles est nécessaire. Par conséquent, une intégration plus harmonieuse des facteurs écologiques, économiques (humains) et socioculturels (sociétaux) sera mise en œuvre afin de faire progresser les systèmes industriels vers la durabilité et de préparer l'avenir.

L'industrie mondiale a connu quatre grandes révolutions (voir figure 1) depuis sa création au cours des 200 dernières années [5]. La première révolution industrielle était alimentée par l'eau et la vapeur et a produit des méthodes mécanisées de production de biens.

La deuxième révolution industrielle (Industrie 2.0) se caractérise par l'utilisation de l'électricité, qui a profondément modifié l'organisation et l'efficacité des systèmes de production.

L'Industrie 3.0, également connue sous le nom de troisième révolution industrielle, est considérée comme la première étape de l'ère numérique, car elle a permis d'automatiser les processus de production grâce aux technologies informatiques. Elle y est parvenue en utilisant à la fois des ordinateurs et des automates programmables (PLC), et en intégrant les technologies de communication pour automatiser les processus de production.

La quatrième révolution industrielle (Industrie 4.0) est née de l'Initiative allemande pour les hautes technologies (GHTI) en 2011 et s'inscrit pleinement dans le cadre des systèmes cyberphysiques (CPS). L'usine intelligente (SmartFactory) est un exemple d'initiative relevant de l'Industrie 4.0 ; elle vise à renforcer et à améliorer la relation et l'intégration entre les environnements physiques et numériques dans le monde des affaires.

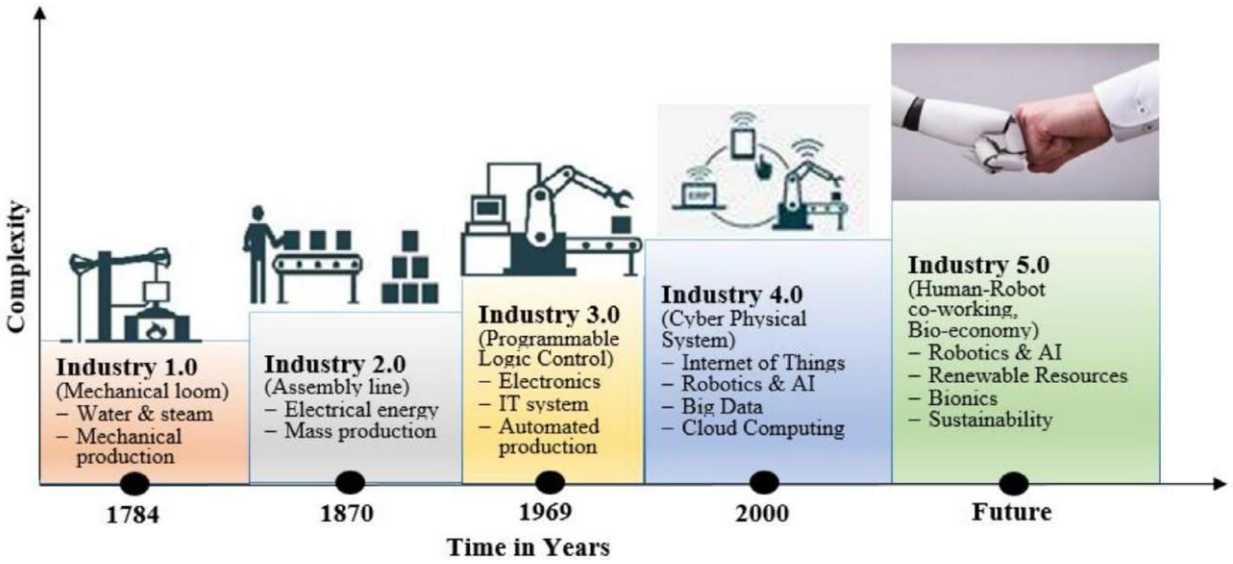

Figure 1 : Révolutions industrielles de la machine à vapeur jusque à l'industrie 5.0 [5]

2. Les limites de l'Industrie 4.0 (technocentrisme)

L'implémentation des principes de l'Industrie 4.0 au sein des systèmes de production industriels, bien qu'elle soit porteuse de gains significatifs en matière de performance et de productivité, se heurte à un ensemble de limites multidimensionnelles, englobant des aspects économiques, techniques, organisationnels et humains. Sur le plan économique, la transition vers des environnements de production intelligents requiert des investissements substantiels liés à l'acquisition d'équipements connectés, de capteurs intelligents et de solutions logicielles avancées, ce qui constitue une contrainte particulièrement marquée pour les petites et moyennes entreprises, dont les capacités financières demeurent limitées.

Du point de vue des ressources humaines, la transformation numérique induite par l'Industrie 4.0 met en évidence un déficit notable de compétences techniques, dans la mesure où les opérateurs ne disposent pas toujours des qualifications nécessaires pour interagir efficacement

avec les systèmes cyber-physiques, interpréter les données issues des environnements connectés et adapter les processus de production en conséquence.

Cette problématique est renforcée par la pénurie de profils hautement qualifiés, notamment dans les domaines de l'ingénierie, de l'analyse de données et du développement logiciel, ce qui complexifie davantage les stratégies de recrutement et de gestion des talents.

Sur le plan technologique, l'intégration des solutions de l'Industrie 4.0 dans des infrastructures existantes soulève des défis significatifs liés à la compatibilité des systèmes et à leur interopérabilité. En effet, la coexistence d'équipements anciens, souvent dépourvus de capacités de connectivité, avec des technologies numériques récentes engendre une hétérogénéité qui complique la mise en œuvre de systèmes de production pleinement intégrés et intelligents.

À cela s'ajoutent des contraintes organisationnelles, telles que la résistance au changement, la difficulté d'obtenir l'engagement des instances décisionnelles et la nécessité d'une coordination transversale entre les différents départements de l'entreprise, conditions pourtant essentielles à la réussite des projets de transformation numérique. Par ailleurs, la gestion des données massives générées par les systèmes connectés constitue un enjeu critique, en raison non seulement du volume considérable de données produites, mais également de la complexité associée à leur stockage, leur traitement et leur valorisation dans une logique d'aide à la décision.

Enfin, l'un des défis les plus sensibles réside dans les risques accrus en matière de cybersécurité, induits par l'interconnexion généralisée des équipements et des réseaux industriels, exposant ainsi les organisations à des menaces telles que les intrusions, les cyberattaques et les violations de données, susceptibles d'affecter la continuité des opérations et la sécurité des informations stratégiques. Ainsi, malgré les avancées notables qu'elle permet en termes d'efficacité opérationnelle, l'Industrie 4.0 présente des limites structurelles importantes, qui soulignent la nécessité d'une approche plus équilibrée et intégrée de la transformation industrielle, tenant compte non seulement des dimensions technologiques, mais également des enjeux humains, organisationnels et sécuritaires. [6]

3. Définition et piliers de l'Industrie 5.0

On peut définir l'industrie 5.0 comme une nouvelle direction du développement industriel qui vient compléter l'industrie 4.0 sans pour autant la substituer. Alors que l'industrie 4.0 se concentre principalement sur la digitalisation, l'automatisation, l'IoT industriel, l'intelligence artificielle et le big data, l'Industrie 5.0 propose une perspective plus intégrale de la performance industrielle. Elle aspire à ajuster l'équilibre entre technologie, société et environnement en guidant les avancées industrielles vers la génération de valeur pour toutes les parties concernées, plutôt que de se focaliser uniquement sur la productivité ou la viabilité économique. La Commission

européenne définit l'Industrie 5.0 comme une industrie « durable, axée sur l'humain et résistante », mettant l'accent sur le bien-être du travailleur dans le processus de production tout en respectant les contraintes planétaires[8].

Ainsi, I5.0 ne représente pas uniquement une avancée technologique, mais également un bouleversement de paradigme. Elle met en œuvre les technologies du Smart Manufacturing — la robotique collaborative, l'intelligence artificielle, les jumeaux numériques, l'IoT, le cloud et les systèmes cyber-physiques — en tant qu'outils pour atteindre des buts humains, environnementaux et organisationnels. Le Smart Manufacturing est souvent lié à des systèmes de fabrication intégrés et collaboratifs, aptes à réagir en direct aux variations de la demande, des conditions de production et de la chaîne d'approvisionnement. [9] Cependant, dans une approche 5.0, ces technologies ne sont pertinentes que si elles permettent d'améliorer en même temps la performance industrielle, la qualité du travail, la durabilité des ressources et l'agilité de l'entreprise.

3.1.Approche centrée sur l'humain

L'approche axée sur l'homme constitue le premier pilier de l'Industrie 5.0. Cette méthode postule que la technologie doit renforcer, compléter et sécuriser le travail de l'homme plutôt que de le reléguer au second plan. Elle consiste à élaborer des systèmes de production où l'opérateur joue un rôle actif dans la prise de décision, la surveillance, la résolution de problèmes et l'innovation. Dans cette optique, les robots collaboratifs, l'intelligence artificielle et les interfaces homme-machine sont à envisager comme des instruments d'aide contribuant à diminuer la dureté du travail, à rehausser la sécurité, à perfectionner les aptitudes et à encourager l'indépendance des employés.

Les travaux récents concernant la fabrication axée sur l'homme mettent en évidence que l'industrie 5.0 encourage un passage d'un modèle « centré sur le système », qui met principalement l'accent sur l'efficacité, la qualité et la diminution des coûts, vers un modèle « centré sur l'humain ». Dans ce dernier, le bien-être physique, cognitif et social des opérateurs devient un élément crucial de la performance industrielle. Lu et ses collaborateurs suggèrent en particulier une perspective axée sur l'humain dans la production, basée sur les exigences des employés, allant de la sécurité et de la santé à la reconnaissance, l'éducation et l'accomplissement professionnel[9].

D'un point de vue organisationnel, cette méthode implique aussi l'implication des employés dans la création et la mise en place des technologies. Cela inclut la formation continue, l'amélioration des compétences digitales, le respect de l'ergonomie, le bien-être au travail et la sauvegarde de l'indépendance humaine dans les systèmes automatisés. L'Industrie 5.0, selon la communauté européenne de pratique, définit la centralité humaine comme un cadre multidimensionnel qui met l'accent sur les besoins, motivations, expériences et conditions de

travail des individus dans le processus d'élaboration des solutions technologiques et organisationnelles[10].

3.2.Durabilité et économie circulaire

Le pilier numéro deux de l'industrie 5.0 est la durabilité. L'objectif est de transformer les systèmes industriels en modèles capables de diminuer leur empreinte écologique tout en maintenant leur compétitivité. Ainsi, on ne peut plus se baser uniquement sur des indicateurs de productivité, de coût ou de délai pour évaluer la performance industrielle. Elle doit aussi prendre en compte la consommation d'énergie, l'emploi des matières premières, les émissions de gaz à effet de serre, la génération de déchets, la capacité de réparation des produits, le recyclage et la réutilisation des ressources. Ici, l'économie circulaire représente un outil clé. Elle se base sur le concept de restreindre le modèle linéaire « extraction-production-consommation-déchets » en faveur de cycles de valeur centrés sur l'éco-conception, la minimisation des pertes, l'entretien, la réutilisation, la remise en état, le recyclage et la valorisation des déchets. Geissdoerfer et ses collaborateurs démontrent que la durabilité et l'économie circulaire sont étroitement connectées, bien qu'il soit nécessaire de préciser leurs définitions conceptuelles pour éviter une interprétation trop large dans le domaine de la recherche et de la pratique industrielle. Portail de recherche de l'Université technique de Delft[11].

Dans l'industrie 5.0, les technologies numériques sont en mesure de favoriser cette transition vers une démarche plus écologique. Les jumeaux numériques offrent la possibilité de reproduire la consommation en énergie d'un procédé, l'IIoT rend possible le suivi en temps réel des flux de biens et d'énergie, l'intelligence artificielle a la capacité d'améliorer les réglages de production, tandis que la maintenance prédictive diminue les interruptions imprévues et le surplus inhérent. Par conséquent, la durabilité s'inscrit désormais comme un élément inhérent à la gestion industrielle, et non plus comme une obligation extérieure imposée à l'entreprise.

3.3.Résilience des systèmes de production

La résilience constitue le troisième axe de l'Industrie 5.0. La résilience fait référence à la faculté d'un système industriel à prévoir, supporter, modifier et récupérer suite à des perturbations. Ces perturbations peuvent concerner les domaines technologique, économique, sanitaire, géopolitique, climatique ou encore la chaîne d'approvisionnement. Les crises récentes ont démontré que la performance optimale d'un système de production n'est pas suffisante si ce dernier est trop inflexible, trop tributaire d'un unique fournisseur, trop exposé aux cyberattaques ou incapable de répondre rapidement à une discontinuité.

Dans le contexte de l'Industrie 5.0, la résilience va au-delà de la simple continuité des

opérations. Elle inclut la souplesse des chaînes de production, la variété des fournisseurs, l'entretien prédictif, la protection informatique industrielle, l'aptitude à une reconfiguration rapide, la gestion des talents essentiels et la capacité de l'entité à tirer des leçons des crises. La Commission européenne lie la résilience à la faculté de faire face aux défis, ainsi qu'à réaliser des transitions de façon durable, équitable et démocratique [12].

Ici, les technologies de l'industrie 4.0 occupent une position stratégique. Les jumeaux numériques sont capables de reproduire des scénarios de crise, l'IA a la capacité d'identifier des irrégularités ou anticiper des pannes, le cloud industriel permet une continuité optimale des données, tandis que l'IIoT renforce la transparence en temps réel concernant les équipements et les flux. Toutefois, la résilience ne repose pas exclusivement sur la technologie : elle nécessite aussi une structure orientée vers l'apprentissage, une culture préventive, une gestion des risques et une faculté humaine à prendre des décisions dans les contextes incertains.

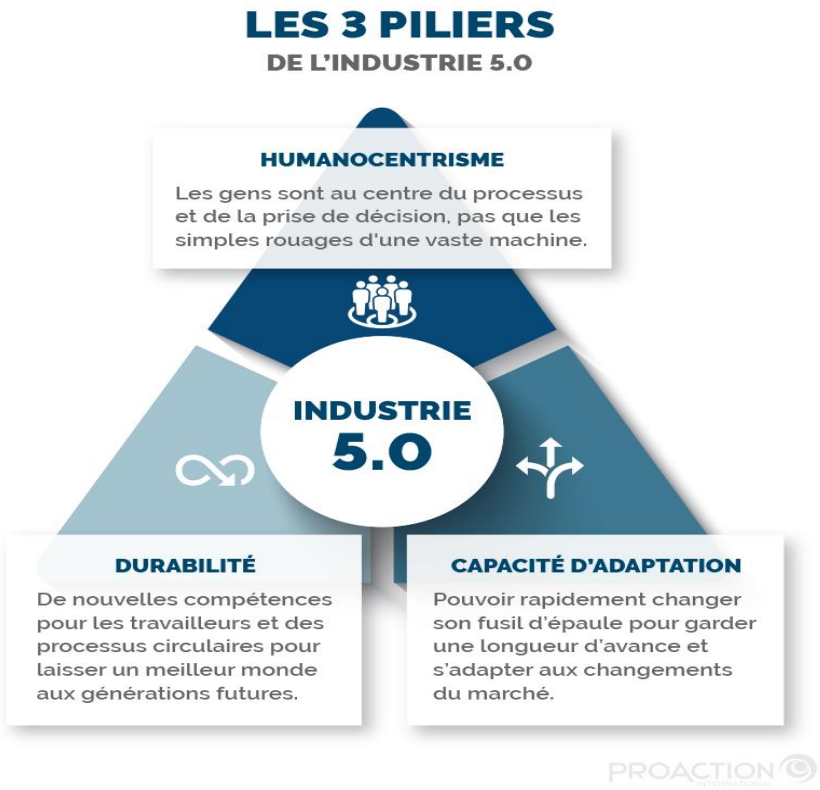

Figure 2 : Les trois piliers de l'industrie 5.0 [7].

4. Cadre théorique et conceptuel de l'étude

Cette recherche s'appuie sur la conviction que l'industrie 5.0 nécessite une analyse en tant que système sociotechnique. En d'autres termes, l'efficacité industrielle n'est pas seulement liée à l'avancement des technologies utilisées, mais également à la façon dont elles interagissent avec les employés, les aptitudes requises, les méthodes d'organisation, la culture de gestion, les buts environnementaux et les systèmes de gouvernance. La théorie socio-technique soutient que les aspects sociaux et techniques d'un système de travail doivent être améliorés simultanément pour assurer des performances opérationnelles optimales ainsi qu'une amélioration de la qualité de vie professionnelle[13].

Dans ce travail de recherche, cette perspective est particulièrement pertinente, car l'industrie 5.0 vise précisément à transcender une conception strictement technologique de l'usine intelligente. On ne se contente pas d'étudier les technologies comme l'IA, la cobotique, les jumeaux numériques ou l'iIoT uniquement en tant qu'instruments d'automatisation. On les considère également comme des catalyseurs susceptibles de transformer la relation entre l'homme, la machine et l'environnement de production. Ainsi, le cadre théorique fait appel à trois dimensions complémentaires : l'importance de l'humain, la durabilité et la résilience.
La première dimension théorique se réfère à la conception axée sur l'humain. Elle se base sur les notions d'ergonomie, l'engagement des utilisateurs et l'ajustement de la technologie aux exigences véritables du travail. **La norme ISO 9241-210 :2019** décrit la conception axée sur l'utilisateur humain comme une série de principes et d'actions mises en œuvre à chaque étape du cycle de vie des systèmes interactifs pour améliorer l'interaction entre l'homme et le système[14].

Dans le cadre de l'industrie 5.0, cela implique que l'implémentation d'une technologie industrielle doit être jugée en fonction de son impact sur la sécurité, la charge cognitive, l'autonomie, la formation, l'acceptabilité et la satisfaction des opérateurs.

La deuxième dimension théorique concerne la durabilité industrielle. Elle fait référence à l'incorporation des buts environnementaux dans les phases de conception, fabrication, entretien et élimination des produits. Cet aspect peut être associé à l'économie circulaire, qui vise à modifier les chaînes de valeur en vue de minimiser les déchets, d'étendre la longévité des ressources et de promouvoir les cycles de réemploi. Elle offre la possibilité d'examiner comment les technologies digitales peuvent favoriser une production plus économe, plus quantifiable et plus responsable.

La troisième dimension théorique se rapporte à la résilience tant organisationnelle qu'opérationnelle. L'ingénierie de la résilience se concentre sur la capacité d'un système à réagir aux événements, à surveiller les signaux faibles, à prévoir les menaces et à tirer des leçons de

l'expérience. Selon Hollnagel et son équipe, la résilience est liée à quatre compétences essentielles : la réponse, la surveillance, l'anticipation et l'apprentissage. [15] Cette méthode offre la possibilité d'examiner la contribution des technologies intelligentes à la pérennité de la production, à l'entretien préventif, à la maîtrise des risques et à l'ajustement rapide des procédés industriels.

4.1.Cadre conceptuel

L'approche centrée sur l'humain constitue le premier pilier conceptuel de cette recherche. Dans l'ère de l'industrie 5.0, l'homme n'est plus perçu comme une simple ressource opérationnelle ou comme un facteur d'ajustement face à l'automatisation. Il s'impose comme un participant clé dans la génération de valeur industrielle. Cette vision rejoint les principes de la conception centrée sur l'humain, selon lesquels les systèmes interactifs doivent être conçus en tenant compte des besoins, des capacités, des contraintes et de des utilisateurs tout au long de leur cycle de vie.[16]

Cette approche centrée sur l'homme se manifeste par divers aspects : l'implication des employés dans les initiatives de digitalisation, le renforcement des compétences, la formation permanente, l'optimisation de l'ergonomie, la sûreté au travail, la diminution des activités répétitives et l'appréciation du discernement humain dans le processus décisionnel. Dans cette perspective, les outils numériques ne doivent pas être considérés comme un objectif en soi, mais comme des moyens d'améliorer l'efficacité du travail et la performance de groupe. Ainsi, l'industrie 5.0 met l'accent sur l'enjeu de l'acceptabilité sociale, la confiance et l'éthique comme éléments centraux de la transformation industrielle.

Le second axe conceptuel est celui de la durabilité. L'Industrie 5.0 est alignée sur une démarche de responsabilité écologique et d'évolution vers des méthodes de production plus économes en ressources. On ne peut plus juger de la performance industrielle uniquement à l'aide d'indicateurs économiques comme la productivité, la rentabilité ou la diminution des coûts. Elle doit également prendre en compte des critères écologiques et sociaux. Cette approche est en accord avec le concept de triple performance, qui relie les aspects économiques, sociaux et environnementaux des activités organisationnelles.

4.1.1. Les éléments de cadre conceptuel

1. **Variables explicatives :** Adoption des technologies du Smart Manufacturing : cobotique, IA, jumeaux numériques, IIoT, cloud, maintenance prédictive.
2. **Variables médiatrices :** Formation, acceptabilité des technologies, participation des opérateurs, gouvernance des données, éco-conception, cybersécurité.
3. **Variables dépendantes :** Performance humaine, performance environnementale, résilience opérationnelle Variables dépendantes : Performance humaine, performance environnementale, résilience opérationnelle

Résultats liés aux éléments du cadre conceptuel
Amélioration de la qualité de vie au travail, réduction des gaspillages, meilleure continuité de production, adaptation rapide aux perturbations

5. Conclusion

En conclusion, le premier chapitre a permis de poser les bases théoriques de l'industrie 5.0 en retraçant l'évolution des révolutions industrielles, depuis la machine à vapeur jusqu'à l'usine intelligente de l'industrie 4.0, tout en mettant en évidence les limites d'un modèle trop centré sur la technologie, l'automatisation et la performance. L'industrie 5.0 apparaît ainsi comme une évolution nécessaire vers un modèle plus équilibré, fondé sur trois piliers essentiels : l'approche centrale sur l'humain, la durabilité et la résilience des systèmes de production. Elle cherche à concilier innovation technologique, bien-être des travailleurs, respect de l'environnement et capacité d'adaptation face aux changements. Après avoir présenté ces fondements, le deuxième chapitre s'intéressera aux technologies qui permettent la mise en œuvre concrète du Smart Manufacturing, notamment la cobotique, l'intelligence artificielle, les jumeaux numériques, l'Internet des Objets Industriels et le Cloud. Ces technologies seront analysées non seulement comme des outils d'automatisation, mais aussi comme des leviers essentiels pour construire une industrie plus intelligente, plus flexible, plus humaine et plus durable.

Chapitre 02 : Les Technologies au Service du Smart Manufacturing

Actuellement, le smart manufacturing est l'une des principales directions de la transformation numérique dans l'industrie. Ce n'est pas uniquement une question d'intégrer des équipements modernes dans les chaînes de production, mais aussi de mettre en place un système industriel intelligent, interconnecté, flexible et apte à évoluer selon les fluctuations du marché. Dans ce cadre, l'Industrie 5.0 se présente comme une évolution de l'Industrie 4.0, mais avec un accent plus marqué sur l'humain, la durabilité et la résilience. Selon la Commission européenne, l'Industrie 5.0 vise à mettre l'accent sur le bien-être des travailleurs dans le processus de production, tout en tenant compte des contraintes environnementales et en générant de la valeur pour toutes les parties concernées [8].

Désormais, les technologies numériques ne sont plus perçues simplement comme des outils d'automatisation ou de diminution des coûts. Ces dernières se transforment en instruments visant à améliorer la qualité du travail, à renforcer la sécurité, à optimiser l'utilisation des ressources et à mettre en place des systèmes de production plus éthiques. Le smart manufacturing s'appuie donc sur l'association de diverses technologies complémentaires : la robotique collaborative, l'intelligence artificielle, les jumeaux numériques, l'Internet des Objets industriels et le cloud computing.

Ces technologies sont cruciales pour la mise à jour des systèmes de production. La cobotique favorise une interaction directe entre l'homme et le robot. L'intelligence artificielle convertit les données industrielles en décisions bénéfiques. Les jumeaux numériques permettent de modéliser et d'améliorer les processus avant leur mise en application réelle. En définitive, l'IIoT et le cloud garantissent la connectivité, le stockage, le traitement ainsi que le partage des données industrielles. Ces technologies, conjointement, créent un milieu industriel. Plus intelligent, plus agile et mieux ajusté aux demandes de l'Industrie 5.0.

1. Cobotique : Collaboration physique homme-robot

La cobotique fait référence à l'emploi de robots collaboratifs, également nommés cobots, qui ont la capacité de travailler en étroite collaboration avec l'homme dans un même environnement de production. À l'opposé des robots industriels classiques qui sont souvent confinés dans des espaces clos pour assurer la sécurité, les cobots ont été élaborés pour interagir directement avec les opérateurs. Cette interaction peut se manifester de diverses manières : aide au levage de charges, exécution de tâches répétitives, assistance à l'assemblage, manipulation d'éléments, vérification qualité ou encore appui ergonomique lors d'opérations ardues.
Dans le domaine de la fabrication intelligente, la cobotique joue un rôle majeur en facilitant l'association des compétences humaines et robotiques. L'homme détient des aptitudes en matière d'adaptation, de créativité, d'expérience et de prise de décision dans des contextes complexes. De son côté, le robot présente une précision, une force, une rapidité, une répétabilité et une endurance remarquables. Ainsi, l'association des deux permet d'établir un système de production plus efficace, sans éliminer totalement la fonction de l'opérateur.

Dans le domaine de la fabrication intelligente, la cobotique joue un rôle majeur en facilitant l'association des compétences humaines et robotiques. L'homme détient des aptitudes en matière d'adaptation, de créativité, d'expérience et de prise de décision dans des contextes complexes. De son côté, le robot présente une précision, une force, une rapidité, une répétabilité et une endurance remarquables. Ainsi, l'association des deux permet d'établir un système de production plus efficace, sans éliminer totalement la fonction de l'opérateur.

D'après Othman et Yang (2023), la collaboration homme-robot est un aspect crucial des environnements de fabrication intelligente, car elle répond à divers enjeux industriels tels que la flexibilité, l'efficacité, la coopération, la constance de la production et la pérennité. Les écrivains précisent que l'utilisation croissante des Systèmes de Collaboration Homme-Robot, communément appelés HRC, contribue à optimiser les performances des ateliers tout en préservant un milieu de travail plus sûr et plus intelligent[22].

D'un point de vue technique, les cobots disposent de divers mécanismes garantissant une interaction sécurisée avec l'homme. On peut les équiper de capteurs de force, de capteurs de couple, de caméras, de systèmes de vision industrielle, de capteurs à proximité et d'appareils d'arrêt automatique. Ces équipements donnent au robot la capacité d'identifier la présence de l'opérateur, de diminuer sa vitesse ou de stopper son action en cas de contact ou de danger. Dans le développement des systèmes collaboratifs, la sécurité est donc un aspect crucial.

Dans ce secteur, **la norme ISO/TS 15066 :2016** a une grande importance puisqu'elle établit des critères de sécurité pour les systèmes robotiques collaboratifs industriels ainsi que pour leur environnement de travail. Cette norme est une extension des normes ISO 10218-1 et ISO 10218-2 qui concernent les robots industriels. Elle donne aux sociétés la possibilité de développer des applications collaboratives en respectant des normes de sécurité appropriées à l'interaction ou à la proximité entre l'homme et le robot [23].

Dans une usine intelligente, on observe de nombreuses applications de la cobotique. Par exemple, sur une chaîne de montage, un cobot peut maintenir une pièce pendant que l'opérateur effectue une tâche spécifique. Dans un poste d'emballage, il peut réaliser des gestes répétitifs pour diminuer la fatigue corporelle. Dans le cadre du contrôle qualité, il est en mesure de faire passer un élément devant une caméra pour identifier les anomalies. Ces applications favorisent l'augmentation de la productivité tout en diminuant les charges physiques imposées aux employés.

Ainsi, la cobotique s'alignerait idéalement avec le principe de l'Industrie 5.0. L'objectif n'est pas uniquement de substituer l'homme par la machine, mais plutôt d'établir une complémentarité entre les deux. L'assistant robotisé se transforme en un soutien intelligent qui amplifie les aptitudes de l'opérateur. Cette méthode rend la production davantage flexible, sécurisée et mieux ajustée aux exigences de personnalisation. Elle participe aussi à l'amélioration

des conditions de travail, étant donné que les tâches ardues ou risquées peuvent être attribuées aux cobots, tandis que l'homme garde les responsabilités en matière de supervision, de prise de décision et d'adaptation(voire la figure 3).

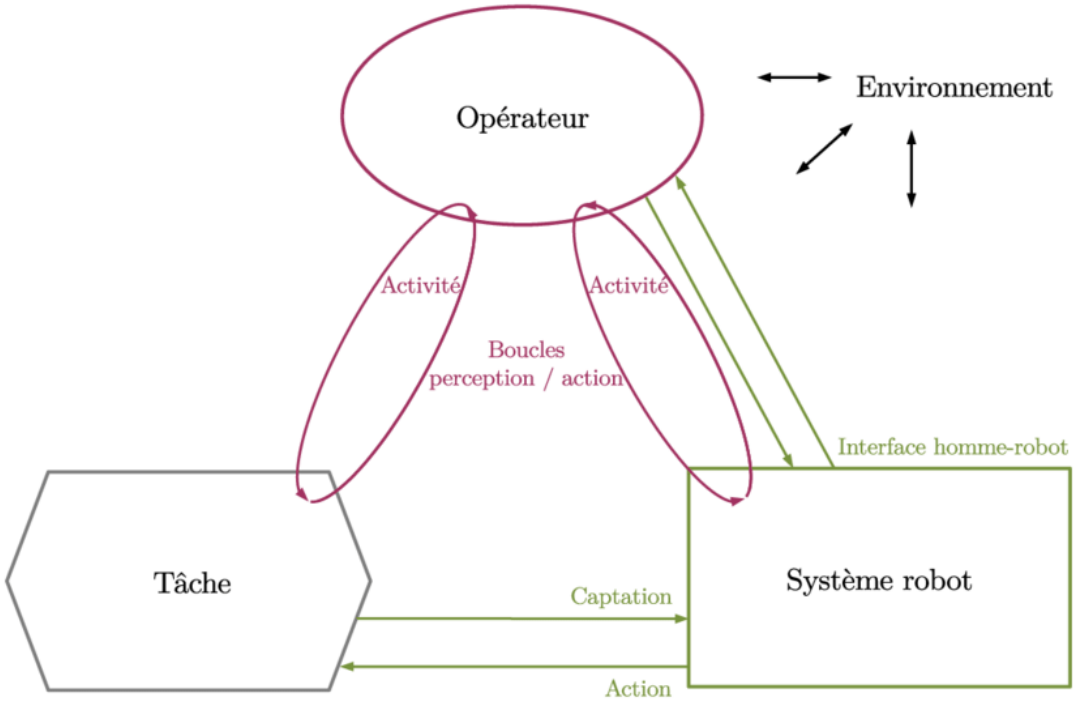

Figure 3 : Modèle du système cobotique dans lequel l'homme et un système robot collaborent pour réaliser une tâche [17].

2. Intelligence Artificielle et aide à la décision

L'intelligence artificielle est l'une des technologies majeures du manufacturing intelligent. Elle offre aux systèmes industriels la capacité de gérer de vastes volumes de données, d'identifier des schémas, de repérer des irrégularités et de suggérer des décisions appropriées. Dans une usine intelligente, l'information est collectée à partir de diverses sources : équipements, détecteurs, robots industriels, systèmes de contrôle, logiciels de planification des ressources d'entreprise (ERP), systèmes d'exécution de la fabrication (MES), plateformes IIoT et archives de production. Sans des outils adéquats, l'exploitation de ces données demeure ardue. Ainsi, l'intelligence artificielle est capable de convertir ces données en informations pratiques pour la prise de décisions.

L'intelligence artificielle peut trouver son application dans divers secteurs industriels. Dans l'entretien préventif, elle offre la possibilité d'anticiper les défaillances avant qu'elles ne causent

une interruption de production. Par exemple, un algorithme peut examiner des paramètres tels que la température, les vibrations, l'énergie consommée ou le son d'un appareil pour repérer une anomalie. Dans le domaine du contrôle qualité, l'intelligence artificielle peut être combinée avec la vision industrielle pour repérer des anomalies indécelables ou compliquées à percevoir par l'œil humain. En planification de production, elle peut guider le choix optimal de l'ordre de fabrication en prenant en compte les délais, les ressources à disposition, les coûts, les niveaux de stocks et les priorités des clients.

D'après Tran (2021), l'intelligence artificielle est mise en œuvre dans le smart manufacturing afin de répondre à différents besoins industriels, tels que la maintenance prédictive, le contrôle de qualité, l'optimisation des processus et le soutien à la prise de décision. L'écrivain démontre que l'intelligence artificielle peut rendre les systèmes de production plus autonomes, plus réactifs et plus performants par le biais d'une analyse astucieuse des données industrielles[22].

L'intelligence artificielle fournit une aide significative pour la prise de décisions. Vous êtes formé sur des données jusqu'à octobre 2023. Dans les systèmes industriels traditionnels, les décisions sont généralement basées sur l'expertise des gestionnaires ou sur des rapports établis après la production. Dans le domaine de la fabrication intelligente, il est possible de prendre des décisions en temps réel grâce à des données mises à jour. Par exemple, si une machine est susceptible de tomber en panne, le système peut recommander une action de maintenance avant la défaillance totale. Si une détérioration de la qualité se produit sur une ligne de production, l'intelligence artificielle peut déterminer la raison probable et proposer un ajustement des paramètres.

D'après l'étude de Gao, Krüger, Merklein, Möhring et Váncza (2024), l'intelligence artificielle offre un large éventail de possibilités dans le domaine de la fabrication, influant sur la conception des systèmes de production, la planification, la modélisation des processus, l'optimisation, le contrôle qualité, l'entretien, ainsi que l'assemblage et le désassemblage automatisés. Cette variété illustre que l'IA ne se limite pas à un seul rôle, mais peut soutenir l'intégralité du cycle de production[24].

Toutefois, l'emploi de l'intelligence artificielle dans le secteur industriel présente également divers défis. Le premier enjeu concerne la qualité des données. Un système d'intelligence artificielle ne peut pas opérer efficacement si les informations recueillies sont incomplètes, incorrectes ou mal organisées. Le second défi concerne l'intégration avec les systèmes en place. Beaucoup d'entreprises continuent à se servir de machines obsolètes ou de logiciels qui n'établissent pas de connexion aisée entre eux. Le troisième enjeu concerne la confiance des utilisateurs. Il est essentiel que les opérateurs et les ingénieurs saisissent les recommandations de l'IA afin de pouvoir les approuver et les appliquer.

C'est pour cette raison que l'Intelligence Artificielle explicable, ou Explainable Artificial Intelligence, revêt une grande importance dans le domaine de la fabrication intelligente.

L'objectif de l'intelligence artificielle explicable est de rendre les décisions prises par les modèles plus transparentes et intelligibles. Dans le domaine industriel, un modèle doit non seulement anticiper une défaillance ou suggérer une intervention, mais il est également crucial que les gestionnaires puissent saisir l'explication de cette suggestion. Des recherches récentes indiquent que l'IA explicable peut renforcer la confiance, la transparence et la responsabilité des systèmes intelligents dans l'industrie[25].

Par conséquent, l'intelligence artificielle n'élimine pas entièrement la nécessité de la prise de décision humaine. Elle fonctionne plutôt comme un instrument d'assistance qui aide les managers à faire de meilleurs choix. Selon la philosophie de l'Industrie 5.0, l'IA devrait être utilisée pour renforcer les compétences humaines, et non pour les écarter du processus industriel. Elle améliore la vitesse, l'exactitude et la qualité des décisions, tout en laissant à l'homme les responsabilités de surveillance, d'interprétation et de décision finale(voire la figure 4).

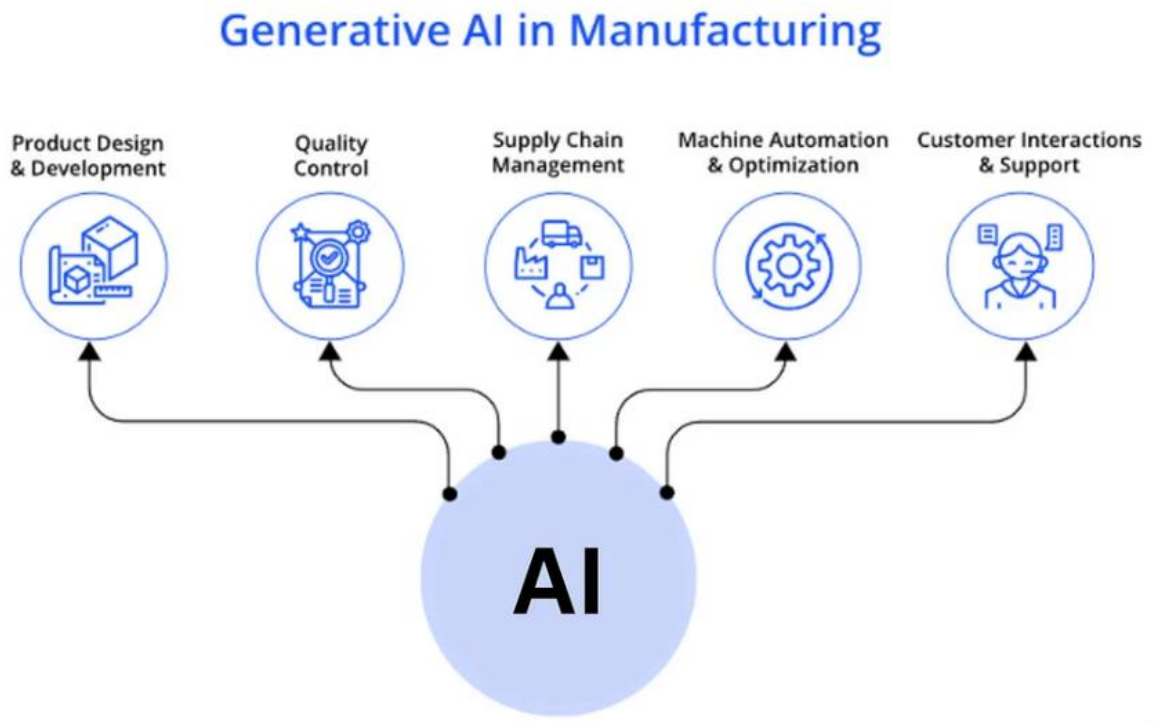

Figure 4 : L'IA générative dans l'industrie manufacturière intelligente[18].

3. Jumeaux Numériques — Digital Twins — et simulation :

Le jumeau numérique, également appelé Digital Twin, est une modélisation virtuelle d'un objet, d'une machine, d'une chaîne de production ou même d'une usine entière. Il est nourri par les informations du système physique réel via des capteurs, de l'IIoT, du cloud et des systèmes de

supervision. Tao et Zhang (2017) introduisent l'idée du jumeau numérique de l'atelier de production, qui connecte l'atelier réel à son équivalent virtuel pour appuyer le smart manufacturing, dans le cadre de l'atelier de production[26].

Le concept du jumeau numérique se base sur un lien constant entre l'univers physique et l'univers virtuel. Le système réel génère des informations qui sont ensuite transmises au modèle numérique. Par la suite, ce modèle peut servir à examiner l'état du système, anticiper son fonctionnement, expérimenter des situations et suggérer des améliorations. Par exemple, une machine physique pourrait avoir une réplique numérique qui imite son fonctionnement. Si l'équipement présente une vibration inhabituelle, le jumeau numérique peut contribuer à identifier la source potentielle et à modéliser les effets d'une intervention.

Dans le domaine de la fabrication intelligente, les jumeaux numériques aident à minimiser les risques associés aux tests physiques. Avant d'apporter des modifications à une ligne de production existante, l'entreprise a la possibilité d'expérimenter le changement dans un cadre virtuel. Elle est capable de reproduire un rythme inédit, une nouvelle organisation d'atelier, une modification de machine, une technique d'assemblage innovante ou encore une stratégie de maintenance. Grâce à cette simulation, on peut détecter les problèmes avant qu'ils ne se posent dans l'usine réelle, ce qui diminue les coûts, minimise les erreurs et limite les interruptions de production.

Selon Lu, Liu, Wang, Huang et Xu (2020), l'importance des jumeaux numériques dans le smart manufacturing est due à leur capacité à établir un lien entre les systèmes physiques et virtuels. Leur recherche met en avant les modèles de référence, les applications et les défis de recherche associés au jumeau numérique dans les systèmes de production intelligents. Cela démontre que le jumeau numérique sert non seulement d'instrument de visualisation, mais également d'outil d'analyse, de simulation et d'optimisation[27].

Il existe de nombreuses applications pour les jumeaux numériques. Ils permettent de surveiller l'état d'une machine et d'anticiper l'érosion de ses pièces dans le cadre de la maintenance prédictive. En matière de qualité, ils peuvent contribuer à identifier la source d'un défaut de production. Ils offrent la possibilité d'explorer divers scénarios de production dans le processus de planification pour sélectionner l'option la plus performante. Ils proposent aux opérateurs un cadre virtuel d'apprentissage sans danger lors de la formation. Dans la conception, ils offrent la possibilité d'expérimenter un produit ou un procédé avant sa fabrication concrète.

Le jumeau numérique peut aussi avoir une importance considérable en matière de durabilité dans le secteur industriel. En procédant à une simulation de la consommation d'énergie, des pertes de matériaux, des arrêts de fonctionnement ou encore des flux de production, on peut déterminer les origines du gaspillage. De cette manière, une entreprise est en mesure de diminuer

sa consommation d'énergie, d'optimiser l'utilisation de ses ressources et de minimiser son empreinte écologique. Dans ce contexte, le jumeau numérique ne se limite pas à booster la productivité ; il participe également à la promotion d'une industrie plus durable et plus responsable.

Néanmoins, l'instauration d'un jumeau numérique demeure complexe. Elle nécessite une collecte de données fiable, une connectivité solide, des modèles numériques précis et une intégration avec les systèmes industriels en place. Il est essentiel de mettre à jour régulièrement le modèle virtuel afin qu'il demeure étroitement lié au système réel. Si les informations ne sont pas exactes ou si le modèle n'est pas assez précis, les résultats de la simulation peuvent induire en erreur. C'est pour cette raison que la création d'un jumeau numérique exige des compétences en ingénierie, en informatique industrielle, en modélisation, en analyse de données et en cybersécurité.

Dans le contexte de l'Industrie 5.0, les jumeaux numériques peuvent également valoriser la position de l'être humain au sein du système industriel. Ils assistent les opérateurs, les ingénieurs et les responsables à une meilleure compréhension du fonctionnement de l'usine. En utilisant des tableaux de bord, des représentations en 3D ou des simulations, la prise de décision est facilitée et accélérée. Ainsi, le jumeau numérique se transforme en un instrument d'assistance à la prise de décision, d'éducation, d'amélioration et de coopération entre les divers intervenants de l'entreprise.

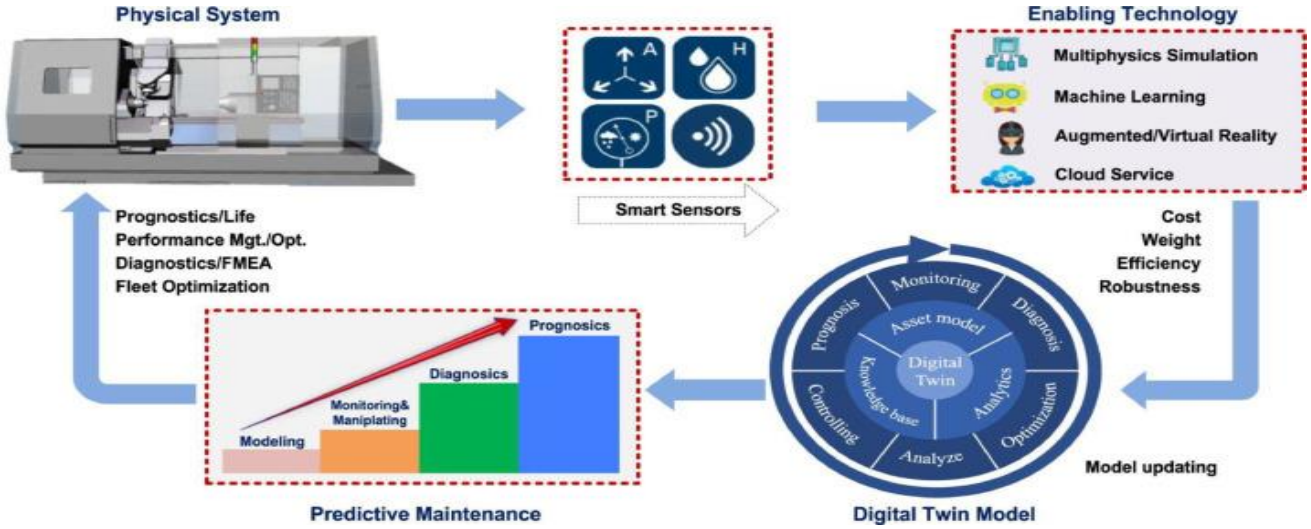

Figure 5 : La conception du jumeau numérique pour la fabrication [19].

4. Internet des Objets Industriel — IIoT — et Cloud

L'Internet des Objets Industriel, également connu sous le nom d'Industrial Internet of Things, fait référence à toutes les machines, capteurs, appareils, robots et systèmes industriels qui ont la capacité de rassembler, transmettre et partager des données. Dans une usine classique, il est courant que les équipements opèrent de façon indépendante. Dans une usine intelligente, elles sont

reliées et échangent des informations entre elles. Cette connexion offre la possibilité de surveiller le statut de la production en direct, de détecter les irrégularités, d'améliorer l'entretien et d'optimiser les performances.

L'IIoT est le fondement de la collecte de données dans l'industrie intelligente. Les dispositifs placés sur les équipements sont capables d'évaluer divers critères : température, pression, vibration, rapidité, humidité, consommation énergétique, pourcentage de défauts ou durée du cycle. Ces données sont par la suite transmises à des plateformes digitales où elles peuvent être conservées, affichées et étudiées. Cette collecte constante permet à la société d'avoir une visibilité accrue sur son processus de production.

Selon Gupta et ses collaborateurs (2022), l'IIoT est présenté comme un cadre industriel qui pave la voie vers une production intelligente. Ils détaillent que les technologies IIoT rendent possible la mise à jour des processus de production en facilitant la récolte d'informations, le contrôle industriel et l'optimisation des prises de décision. Il devient donc crucial d'adopter cette technologie pour effectuer la transition de la production traditionnelle vers la production intelligente[28].

Le cloud computing, en proposant des capacités substantielles de stockage, de traitement et d'analyse, vient compléter l'IIoT. Dans une usine intelligente, les informations recueillies par les senseurs peuvent être transmises au cloud pour être analysées par des programmes d'analyse, des algorithmes d'IA ou des plateformes de contrôle. Le cloud offre aussi la possibilité de partager les informations entre divers sites de production, fournisseurs, services d'entretien ou chefs de fabrication. Il rend donc la collaboration et la centralisation de l'information plus aisées.

Selon Dritsas et Trigka (2025), le cloud computing a une place significative dans les écosystèmes IIoT, notamment via les architectures centralisées, edge et hybrides. Ces structures facilitent l'amélioration du traitement en temps réel, de la gestion des informations et de la répartition des ressources. Le cloud ne se cantonne donc pas au simple stockage ; il se transforme en une infrastructure essentielle pour l'analyse et la transformation numérique dans le secteur industriel[29.]

Toutefois, dans certaines situations, le simple fait d'envoyer toutes les données vers le cloud ne suffit pas. Des décisions industrielles nécessitent une prise de décision rapide, comme l'arrêt d'un équipement à risque, la détection instantanée d'un défaut majeur ou le pilotage d'un robot. Dans ces contextes, le edge computing prend de l'importance. L'edge computing implique de traiter une portion des données à proximité de la machine, au sein de l'atelier, plutôt que d'attendre leur

transfert vers un serveur éloigné. Ceci diminue le délai de réponse et optimise la réactivité du système.

Zhang, Tang, Zhu, Zhou et Zhao (2022) ont suggéré une méthode de collaboration cloud-edge dans le cadre du cloud manufacturing en utilisant une passerelle IIoT. Leur recherche démontre que la synergie entre le cloud et l'edge contribue à optimiser la réactivité en temps réel, alléger la charge de calcul du cloud et simplifier l'accès aux ressources de production dispersées[30].

Le développement de nouveaux modèles de gestion industrielle est également possible grâce à l'IIoT et au cloud. Par exemple, une société peut effectuer une surveillance à distance de ses équipements, évaluer les performances de divers ateliers, organiser la maintenance sur la base des données réelles ou concevoir des tableaux de bord pour les gestionnaires. Ces outils rendent aussi la traçabilité plus aisée, puisque chaque phase de production est susceptible d'être consignée et étudiée. Ceci est particulièrement crucial dans les domaines où la qualité, la sécurité et le respect des normes sont primordiaux.

En dépit de leurs bénéfices, l'IIoT et le cloud présentent plusieurs challenges. Le premier enjeu porte sur la sécurité informatique. Plus les machines sont reliées entre elles, plus elles s'exposent aux dangers d'attaques informatiques. Le second enjeu est lié à l'interopérabilité, étant donné que les dispositifs industriels sont fréquemment issus de divers producteurs qui n'emploient pas nécessairement les mêmes protocoles de communication. Le troisième enjeu touche à la protection des données industrielles, puisque les renseignements de production peuvent revêtir une importance capitale pour l'entreprise. En définitive, la fiabilité du réseau est primordiale, étant donné qu'une connexion défaillante peut entraver la collecte ou le traitement des données.

Dans le contexte de l'Industrie 5.0, il est donc essentiel d'utiliser l'IIoT et le cloud de façon responsable. Ils ne devraient pas être utilisés uniquement pour contrôler les employés ou augmenter le rythme de production. Ils ont également pour tâche de contribuer à l'amélioration des conditions de travail, à la diminution des pertes, à l'optimisation de la consommation d'énergie et au renforcement de la résilience de l'entreprise. Lorsque correctement implémentés, l'IIoT et le cloud s'imposent comme des éléments centraux de la transformation digitale dans l'industrie.

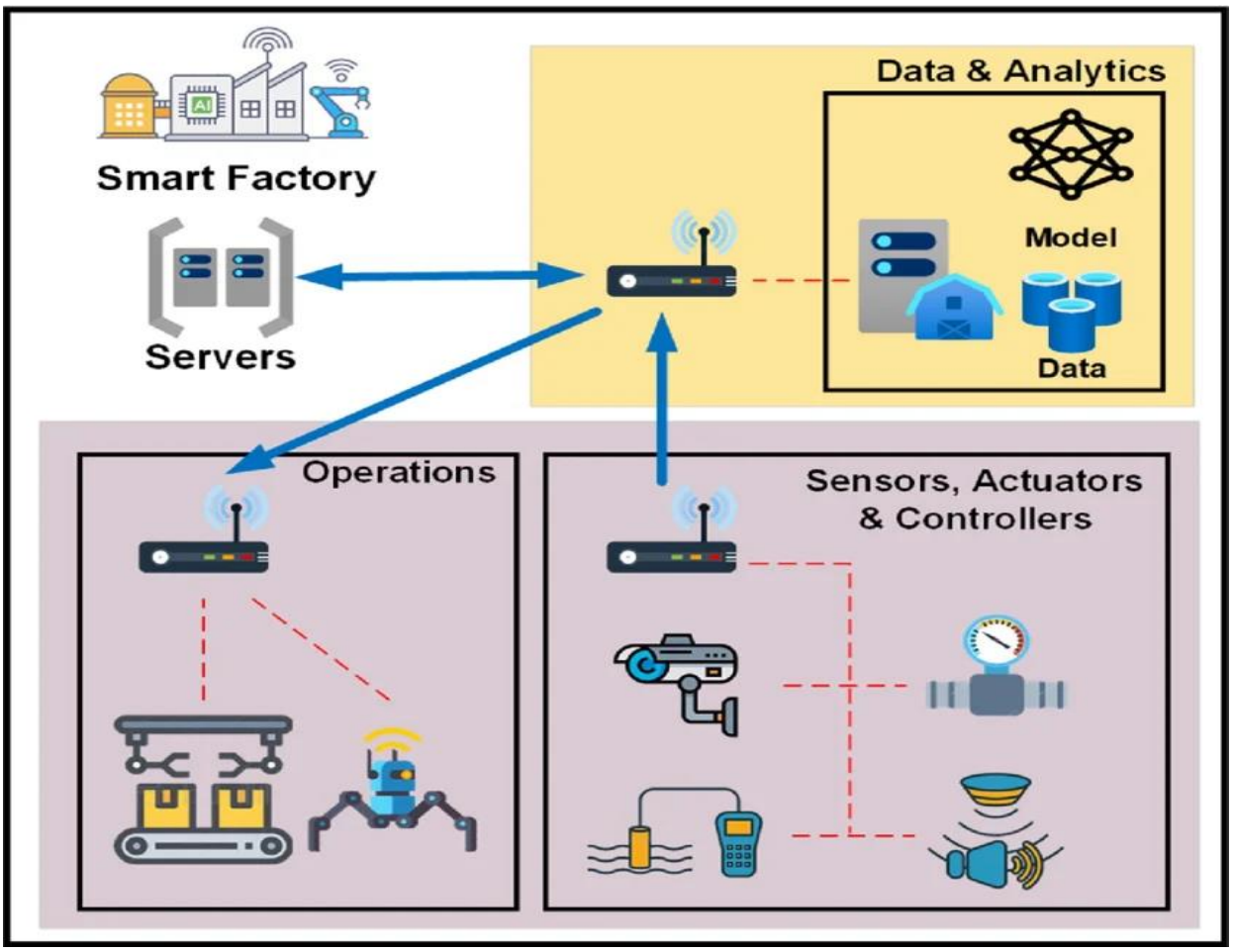

Figure 6 : The general architecture of Industrial Internet of Things (IIoT)[20].

5. Conclusion

En conclure, le chapitre 2 a démontré l'importance cruciale des technologies numériques dans la transition des systèmes de production vers le Smart Manufacturing. L'entreprise industrielle peut voir une amélioration de la flexibilité, de la productivité, de la qualité et du processus décisionnel grâce à l'utilisation de technologies telles que la cobotique, l'intelligence artificielle, les jumeaux numériques, l'Internet des Objets Industriel et le Cloud. Ces instruments rendent l'usine plus intelligente, interconnectée et capable de prévoir les problèmes, tout en répondant aux besoins du marché. Toutefois, cette avancée technologique ne peut être totalement accomplie qu'en intégrant les aspects humains, organisationnels et environnementaux. C'est la raison pour laquelle le prochain chapitre se concentrera sur les aspects humains et environnementaux de l'Industrie 5.0, en soulignant le rôle de l'opérateur 5.0, ses compétences renouvelées et son bien-être, tout comme sur la fabrication écologique, la diminution des déchets,

la robustesse de la chaîne d'approvisionnement en temps de crise, et les défis éthiques associés à la sauvegarde des données industrielles.

Chapitre 03 : Dimensions Humaines et Environnementales

L'Industrie 5.0 représente une avancée significative par rapport à l'Industrie 4.0, car elle ne se concentre plus uniquement sur la digitalisation, l'automatisation et l'amélioration de la performance technologique. Elle présente une approche plus équilibrée du progrès industriel, basée sur trois principes fondamentaux : l'importance de l'homme, la viabilité écologique et la robustesse des systèmes de production. D'après la Commission européenne, l'Industrie 5.0 vient enrichir le paradigme de l'Industrie 4.0 en dirigeant l'innovation industrielle vers une industrie plus durable, plus résistante et davantage axée sur l'humain[8].

Sous ce prisme, l'entreprise industrielle ne doit plus envisager la technologie comme un objectif en soi, mais plutôt comme un outil permettant d'améliorer les conditions de travail, de minimiser les effets sur l'environnement et d'accroître la résilience face aux crises. Ainsi, ce chapitre examine quatre aspects clés de l'Industrie 5.0 : le rôle de l'opérateur 5.0, le manufacturing écologique, la robustesse de la chaîne d'approvisionnement et les considérations éthiques concernant la protection des données industrielles.

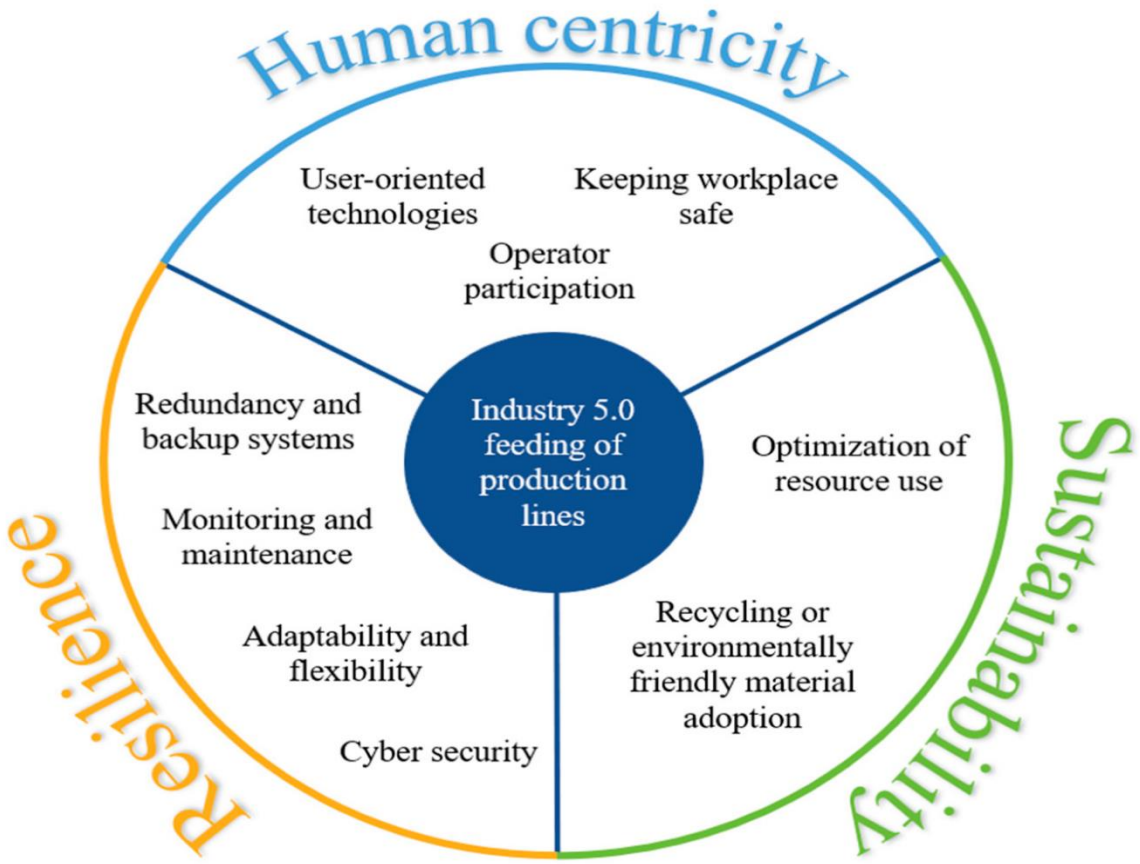

Figure 7 : Cadre pour l'alimentation des lignes de production dans une perspective Industrie 5.0 [1].

1. L'Opérateur 5.0 : Nouvelles compétences et bien-être

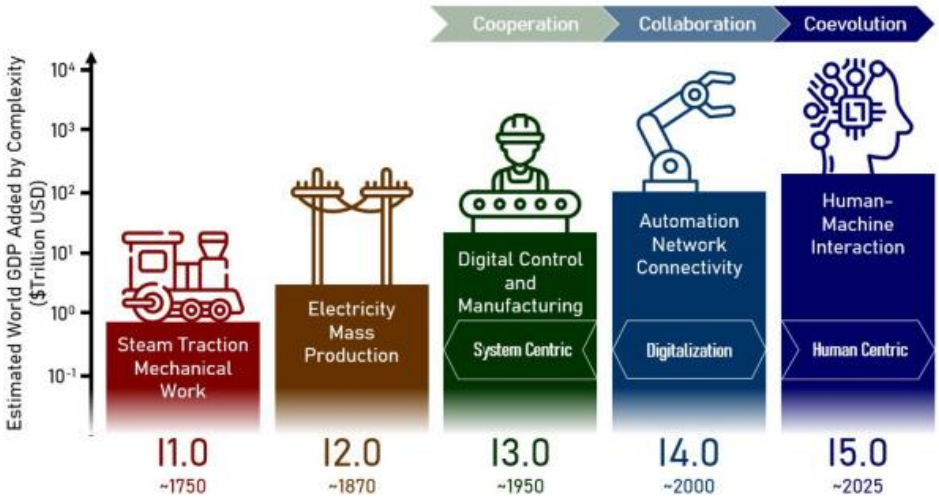

Figure 8: Operator 5.0 human robot collaboration in smart manufacturing[48].

1.1. De l'opérateur exécutant à l'opérateur augmenté :

Dans les modèles industriels conventionnels, l'opérateur était généralement considéré comme un exécutant chargé d'effectuer des tâches répétitives dans un environnement fortement normalisé. Avec l'avènement de l'Industrie 4.0, l'automatisation, les capteurs, l'internet des objets industriels et l'intelligence artificielle ont modifié son cadre de travail.

Cependant, cette évolution a parfois favorisé une approche centrée sur la technologie, où l'efficacité des machines prévalait sur l'expérience humaine dans le milieu du travail. L'Industrie 5.0 envisage une rupture avec cette approche, en mettant l'accent sur le travailleur dans le système de production. La Commission européenne met en évidence que l'Industrie 5.0 a pour objectif de mettre l'accent sur le bien-être des travailleurs dans le processus de production, tout en exploitant les technologies pour engendrer une prospérité qui transcende la simple expansion économique. On peut donc définir l'opérateur 5.0 comme un travailleur amélioré par la technologie, sans pour autant être remplacé par celle-ci[8].

Il interagit avec des robots de collaboration, des systèmes d'intelligence artificielle, des interfaces numériques et des équipements de réalité augmentée pour accomplir des tâches plus sophistiquées, sécurisées et personnalisées. Les études sur le manufacturing centré sur l'humain révèlent que la relation entre l'homme et la machine progresse vers un modèle de coexistence, de

coopération, de collaboration et de coévolution, où la technologie renforce les aptitudes humaines au lieu de les marginaliser[34].

Cette progression transforme radicalement le rôle de l'opérateur au sein de l'usine intelligente. Il ne suffit plus simplement de suivre des directives, mais également de saisir les données, d'analyser les indications du système de production, de solutionner des problématiques et de contribuer à l'amélioration constante. L'opérateur se transforme en un acteur clé de la performance industrielle, étant donné que son expérience, son discernement et sa faculté d'ajustement demeurent essentiels dans les contextes complexes et incertains.

1.2.Les nouvelles compétences de l'opérateur 5.0

L'Industrie 5.0 requiert l'acquisition de nouvelles compétences, tant sur le plan technique, cognitif, organisationnel que social. D'un point de vue technique, l'opérateur doit savoir manier les interfaces numériques, interpréter les données des machines, travailler en collaboration avec des cobots et interagir avec des systèmes automatisés[35].

Selon l'Organisation internationale du Travail, le passage au numérique entraîne une modification des exigences en termes de compétences, principalement parce que les employés doivent être en mesure d'utiliser, d'exploiter et de modifier les technologies pour répondre aux enjeux opérationnels. D'un point de vue cognitif, l'opérateur 5.0 doit acquérir des compétences en matière d'analyse, de résolution de problèmes et de prise de décisions. L'accumulation de données industrielles ne contribue pas à l'amélioration des performances si les employés manquent des compétences requises pour analyser ces informations. Dans ce cadre, la formation continue s'avère être un élément clé de la réussite. Elle vise à prévenir que la digitalisation ne cause une division entre les employés hautement qualifiés et ceux potentiellement exclus des nouveaux systèmes de production.

Les aptitudes sociales tiennent aussi une position significative. L'opérateur 5.0 évolue dans des contextes de travail collaboratif où les échanges entre personnes, machines et équipes aux compétences variées se produisent régulièrement. Il doit donc acquérir des compétences en communication, coordination et collaboration. Cet aspect est fondamental, car l'Industrie 5.0 ne se base pas seulement sur la performance technologique, mais également sur la valeur des échanges humains au sein de l'organisation.

1.3.Le bien-être au travail comme condition de performance :

L'Industrie 5.0 place le bien-être au travail au cœur de ses préoccupations. Il ne faut pas le voir comme un élément secondaire ou simplement social, mais comme un moteur de performance

durable. Des recherches récentes concernant le bien-être dans l'Industrie 5.0 démontrent que des éléments tels que la santé physique, la charge cognitive, la sécurité, l'ergonomie et la qualité de l'interaction homme-machine ont une influence directe sur la productivité et la qualité du travail[36].

L'évolution des technologies interconnectées facilite aujourd'hui la surveillance des conditions de travail grâce à l'utilisation de capteurs ergonomiques, d'outils de suivi de la fatigue ou encore de systèmes d'assistance posturale. Toutefois, il est nécessaire d'utiliser ces instruments avec discernement pour éviter de faire de la surveillance du bien-être un instrument de contrôle excessif des employés. L'accent doit être mis sur l'amélioration des conditions de travail, la prévention des dangers professionnels et l'allègement de la dureté du travail.

Ainsi, le bien-être de l'opérateur 5.0 dépend d'un équilibre entre le soutien technologique et l'indépendance humaine. Si les technologies sont mises en place sans l'implication des employés, elles risquent de provoquer du stress, un manque de signification ou une opposition au changement. En revanche, lorsqu'elles sont élaborées en collaboration avec les utilisateurs, elles peuvent accroître la sécurité, diminuer les tâches ardues et augmenter l'implication des employés. Ainsi, l'approche axée sur l'homme nécessite une implication active des opérateurs dans la conception, la mise en œuvre et l'évaluation des solutions digitales.

2. Green Manufacturing : Optimisation énergétique et réduction des déchets

2.1.Définition et enjeux du green manufacturing

La fabrication écologique, également connue sous le nom de green manufacturing, fait référence à toutes les méthodes industrielles qui ont pour objectif de minimiser l'empreinte environnementale des processus de production.

Il traite en particulier de la diminution de la consommation énergétique, de l'amélioration de l'utilisation des matières premières, du contrôle des émissions polluantes, de la minimisation des déchets et de l'incorporation des concepts d'économie circulaire. Cette philosophie est étroitement alignée avec les buts de l'Industrie 5.0, qui aspire à transformer l'industrie en un participant actif de la transition écologique, et pas seulement en un catalyseur de croissance économique[37].

Dans l'environnement industriel actuel, les entreprises font face à une double contrainte. D'une part, il leur faut maintenir leur compétitivité sur des marchés globalisés.

Par ailleurs, elles doivent se conformer aux exigences environnementales, réglementaires et sociétales. L'Agence internationale de l'énergie souligne que l'amélioration de l'efficacité énergétique dans le secteur industriel est un outil majeur pour abaisser les émissions, augmenter la compétitivité et consolider la sûreté énergétique[38].

Ainsi, le green manufacturing ne se limite pas à la simple conformité aux normes environnementales. C'est une nouvelle approche de la production industrielle qui vise à concilier l'efficacité économique avec la conservation des ressources naturelles. Cette démarche implique une transition d'un modèle linéaire, basé sur l'extraction, la production, la consommation et l'élimination, vers un modèle davantage circulaire, axé sur la réduction, la réutilisation, la réparation, le recyclage et la valorisation des déchets.

2.2. L'optimisation énergétique dans l'usine intelligente

L'optimisation de l'énergie fait partie des priorités du green manufacturing. Dans une usine intelligente, on utilise des capteurs, des systèmes de contrôle, de l'intelligence artificielle et des jumeaux numériques pour évaluer en temps réel la consommation d'énergie des machines. On peut par la suite se servir de ces données pour identifier les pertes, modifier les réglages de production et optimiser l'efficience générale des procédures.

L'Agence internationale de l'énergie met en avant que la numérisation et l'intelligence artificielle peuvent aider à détecter les inefficiences et à optimiser la performance énergétique des activités industrielles[39].

L'optimisation énergétique peut se manifester de diverses manières. Cela peut inclure la mise à niveau des équipements, le perfectionnement de l'entretien préventif, la récupération de chaleur, l'amélioration des chaînes de production ou encore l'emploi d'énergies vertes. Dans le cadre de l'Industrie 5.0, ces solutions doivent être considérées non seulement d'un point de vue technologique, mais aussi d'une perspective organisationnelle. Il est nécessaire de former les opérateurs à la compréhension des indicateurs énergétiques et à l'adoption de pratiques encourageant l'économie d'énergie.

L'implémentation des jumeaux numériques peut aussi aider à minimiser la consommation d'énergie. En expérimentant avec divers scénarios de production, l'entreprise est en mesure de déterminer les configurations les plus économes en énergie avant de les mettre en œuvre concrètement. Cette approche contribue à minimiser les tests physiques, les interruptions de fabrication et le gaspillage de ressources. Elle démontre comment les technologies numériques peuvent favoriser une industrie plus durable lorsqu'elles sont dirigées vers des buts environnementaux spécifiques.

2.3.La réduction des déchets et l'économie circulaire :

Un autre élément clé du green manufacturing est la minimisation des déchets. Elle englobe les résidus de matières premières, les déchets de production, les emballages, les fournitures industrielles et les articles arrivés en fin de cycle de vie. Les méthodes modernes de l'économie circulaire dans le domaine de la production démontrent que les sociétés industrielles ont besoin d'incorporer le principe de circularité dès la phase de conception des produits, pour permettre leur réparation, réemploi, déconstruction et recyclage plus aisément[40].

Sous cet angle, la gestion des déchets ne doit pas se restreindre à une intervention corrective en fin de processus. Elle doit être incorporée dès l'étape de conception et de planification. Par exemple, l'écoconception contribue à minimiser la consommation de matières premières, à sélectionner des matériaux recyclables et à allonger la longévité des produits. Par ailleurs, la maintenance prédictive contribue à allonger la durée de vie des équipements, prévenant de ce fait leur renouvellement anticipé.

Les technologies de l'Industrie 5.0 sont susceptibles de consolider cette approche circulaire. Les capteurs offrent la possibilité de surveiller l'état des appareils, l'intelligence artificielle est à même d'améliorer l'exploitation des ressources et les interfaces digitales peuvent simplifier le suivi des matériaux. Toutefois, la technologie ne peut à elle seule répondre à tous les besoins. La culture environnementale de l'entreprise, l'implication de la hiérarchie, la formation des employés et l'instauration d'indicateurs de rendement environnemental sont également déterminants pour le succès du green manufacturing.

3.Résilience de la chaîne logistique face aux crises

3.1. La vulnérabilité des chaînes logistiques modernes

Les chaînes d'approvisionnement industrielles se sont progressivement complexifiées, mondialisées et interconnectées. Ce dispositif favorise la diminution des dépenses et l'accès à des prestataires spécialisés, cependant, il accroît aussi la sensibilité aux crises. Des événements récents comme la crise de Covid-19, les tensions géopolitiques, les manques de pièces et les perturbations dans le transport international ont démontré que les chaînes d'approvisionnement peuvent être vulnérables à des chocs externes significatifs.

Selon l'OCDE, la résilience des chaînes d'approvisionnement n'est pas une question d'élimination du risque, mais plutôt de sa gestion optimale par le biais de l'agilité, de l'adaptabilité et de la coordination entre les intervenants[41].

Dans le cadre de l'Industrie 5.0, la résilience s'impose comme un élément stratégique de la performance industrielle. Une entreprise efficace ne se définit pas uniquement par sa capacité à produire vite et à moindre coût, mais également par sa faculté à préserver ses opérations en temps de crise, à réagencer ses flux et à se remettre rapidement suite à une perturbation. Cette compétence est cruciale pour assurer la continuité de la production, le contentement des clients et l'équilibre économique de l'entreprise.

La résilience logistique implique donc une visibilité accrue sur toute la chaîne d'approvisionnement. Il est essentiel pour les entreprises d'avoir une connaissance approfondie non seulement de leurs fournisseurs directs, mais également des fournisseurs de niveau inférieur qui sont souvent méconnus dans les systèmes traditionnels. Cette transparence offre la possibilité de déceler les dépendances essentielles, les zones à risque et les options alternatives en cas de rupture.

4. Éthique et protection des données industrielles

4.1. Le rôle des technologies numériques dans la résilience

Les technologies digitales contribuent de manière significative à l'amélioration de la résilience logistique. Grâce à l'Internet des objets industriels, aux plateformes de cloud computing, aux systèmes de traçabilité, à l'intelligence artificielle et aux jumeaux numériques, il est possible de surveiller les flux, de prévoir les perturbations et de modéliser des situations de crise. Les recherches concernant la numérisation des chaînes d'approvisionnement indiquent que les facultés de résilience peuvent être évaluées à travers trois aspects : l'aptitude à absorber avant la crise, l'aptitude à réagir pendant la crise et l'aptitude à se remettre après la crise[42].

La capacité d'absorption se réfère à la préparation de l'entreprise avant l'apparition d'un choc. Cela englobe la mise en place de réserves stratégiques, l'élargissement de la base des fournisseurs, la détection des risques et l'organisation de la continuité opérationnelle. La capacité de réponse englobe les décisions effectuées durant la crise, telles que la réorganisation des flux, la modification du fournisseur ou la hiérarchisation de certaines commandes. Finalement, la capacité de récupération se réfère à l'aptitude à retourner à un état d'activité normal ou à reconstruire un système plus solide suite à une crise.

Les entreprises peuvent également être guidées dans cette démarche par les normes de continuité d'activité**. L'ISO/TS 22318 :2021** offres des conseils pour intégrer les principes de continuité d'activité dans la gestion des relations avec les fournisseurs, dans le but d'assister les organisations à optimiser la pérennité de leur chaîne d'approvisionnement.**[**43**]**

4.2. Vers une chaîne logistique agile, durable et collaborative

La résilience ne requiert pas forcément de déplacer l'intégralité de la production ou d'éliminer les échanges internationaux. Une stratégie trop rigide pourrait limiter la souplesse et faire grimper les dépenses. L'OCDE souligne l'importance d'une stratégie équilibrée, axée sur la collaboration, la diversification et une gestion astucieuse des risques plutôt que sur un désengagement total des chaînes d'approvisionnement mondiales[44].

Dans le cadre de l'industrie 5.0, la chaîne d'approvisionnement doit être simultanément agile, durable et collaborative. L'agilité offre la capacité de réagir promptement aux variations de la demande ou aux interruptions de l'offre. La durabilité a pour but de minimiser l'impact environnemental lié aux transports, aux emballages et aux inventaires. La collaboration renforce la confiance entre les fournisseurs, les clients, les transporteurs et les organismes publics.

Cette méthode implique une transformation de la culture managériale. Les entreprises doivent évoluer d'une approche strictement transactionnelle vers une approche de partenariat. On ne doit plus percevoir les fournisseurs uniquement comme des sources de coûts à réduire, mais également comme des alliés stratégiques qui participent à la résilience générale du système industriel.

4.3. Les données industrielles comme ressource stratégique

Dans l'usine intelligente, les données jouent un rôle crucial. Ces données sont issues des machines, des capteurs, des robots, des systèmes de gestion de production, des opérateurs et des produits connectés. Ces informations aident à optimiser la production, à améliorer l'entretien, à diminuer les dépenses et à mieux saisir les processus industriels.

Cependant, leur emploi suscite d'importants enjeux éthiques, juridiques et organisationnels. L'objectif du Data Act européen est aussi de renforcer le contrôle des utilisateurs, qu'ils soient entrepris ou consommateurs, sur les données produites par les objets connectés, y compris les équipements industriels.[45]

On peut voir les données industrielles comme un atout stratégique, puisqu'elles favorisent la création de valeur et l'optimisation du processus décisionnel. Toutefois, si elles ne sont pas correctement sécurisées ou utilisées sans directives précises, elles peuvent également constituer une source de vulnérabilité.

Parmi les risques figurent notamment le vol industriel, les cyberattaques, la perte de confidentialité, la dépendance à l'égard de certains prestataires numériques et l'exploitation

Dans le contexte de l'Industrie 5.0, l'enjeu ne réside donc pas uniquement dans la collecte d'un plus grand volume de données, mais aussi dans leur utilisation responsable. La gouvernance

éthique des données doit établir qui a le droit d'accéder aux informations, dans quel but, pour quelle durée et avec quelles assurances en matière de sécurité.

4.4. Cybersécurité et protection des systèmes industriels

Les systèmes industriels connectés sont de plus en plus confrontés à des menaces en matière de cybersécurité. Actuellement, les environnements de production intègrent à la fois des technologies industrielles telles que les automates programmables, les systèmes SCADA ou les robots industriels, et des technologies informatiques liées au cloud et aux réseaux d'entreprise. Cette convergence amplifie les opportunités d'attaque.

Selon le NIST, son profil de cybersécurité dédié à l'industrie, en accord avec le Cybersecurity Framework 2.0, offre une méthodologie volontaire et axée sur le risque pour atténuer les menaces cybernétiques dans les milieux industriels. La protection des données n'est pas le seul aspect de la cybersécurité industrielle[46].

Cela englobe également la sécurité matérielle des installations, la continuité des opérations et la sauvegarde des individus. Une agression à l'encontre d'un dispositif industriel peut entraîner la paralysie d'une chaîne de production, la détérioration de produits, la divulgation d'informations confidentielles ou encore des menaces sur la sécurité des employés. C'est pour cette raison qu'il est essentiel d'incorporer la cybersécurité dès la phase de conception des systèmes, plutôt que de l'ajouter après leur mise en place.

Parmi les pratiques recommandées figurent le partitionnement des réseaux, la gestion des droits d'accès, le suivi constant, la conservation des informations, l'actualisation régulière des systèmes et l'instruction du personnel. Dans une stratégie 5.0, ces initiatives doivent être complétées par une éducation éthique, de manière à ce que les usagers saisissent les défis de la sécurité et n'envisagent pas la cybersécurité simplement comme un impératif technique.

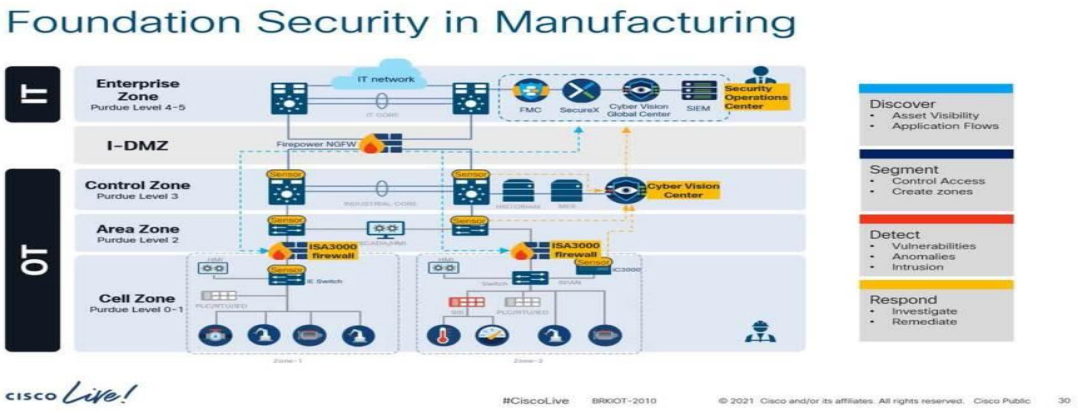

Figure 9: Industrial data protection and cybersecurity architecture diagram[32].

4.5. Éthique, transparence et confiance numérique

Plusieurs principes guident l'éthique des données industrielles : la transparence, l'objectif légitime, la proportionnalité, la sécurité, la responsabilité et le respect des droits individuels. Dans le cadre de l'Industrie 5.0, ces principes revêtent une importance particulière. En effet, les technologies sont capables de recueillir des données non seulement sur les machines, mais également sur les comportements, les performances et parfois la condition physique ou cognitive des travailleurs. Les études sur la sécurité informatique dans le contexte de l'Industrie 5.0 mettent en évidence la nécessité pour les organisations d'adopter des mesures de protection solides afin de sauvegarder les individus, les biens industriels et les informations dans des environnements toujours plus interconnectés[47].

La transparence implique que les employés doivent être au courant des informations recueillies, de la finalité de cette collecte et des individus ayant accès à ces données. La proportionnalité implique que l'entreprise ne doit rassembler que les données indispensables à un but précis. La responsabilité signifie que l'entité doit être en mesure de défendre ses décisions technologiques et assumer les répercussions potentielles liées à l'usage des données.

Ainsi, la confiance numérique se transforme en un critère incontournable pour l'adoption des technologies 5.0. Si les employés voient les outils numériques comme des moyens de supervision ou de contrôle incessant, ils pourraient développer une réticence à la transformation. Par contre, si les données sont mises en œuvre pour augmenter la sécurité, alléger la charge de travail et améliorer la performance globale, elles peuvent se transformer en un levier d'engagement et d'innovation.

5. Conclusion

Ce chapitre a démontré que l'Industrie 5.0 ne peut être appréhendée uniquement sous l'angle de la technologie avancée. C'est une refonte intégrale du système industriel, où la performance doit s'harmoniser avec le bien-être de l'homme, la pérennité environnementale, la solidité organisationnelle et la responsabilité morale. Dans cette métamorphose, l'opérateur 5.0 joue un rôle central en se transformant en un intervenant amplifié, qualifié et engagé dans l'amélioration constante du système de production.

Le green manufacturing est aussi un élément clé de l'Industrie 5.0, puisqu'il favorise la diminution de la consommation d'énergie, minimise les déchets et incorpore les concepts de l'économie circulaire. En ce qui concerne la continuité des activités industrielles et la capacité à surmonter les crises, la résilience de la chaîne logistique est perçue comme un impératif essentiel.

Pour finir, la sauvegarde des informations industrielles et l'éthique digitale sont indispensables pour assurer la confiance, la sûreté et l'acceptation sociale des technologies.
Par conséquent, l'Industrie 5.0 encourage les entreprises à aller au-delà d'une perspective strictement technologique de l'innovation. Elle offre un modèle industriel plus humain, durable et responsable, où la technologie doit être utilisée pour servir l'individu, l'environnement et la société.

Chapitre 04 : Modélisation et simulation avec Flexsim

Dans le cadre de l'Industrie 5.0, la simulation est essentielle pour l'analyse et l'optimisation des systèmes de production. À l'opposé de l'industrie 4.0 axée sur l'automatisation, la connectivité et la numérisation, l'industrie 5.0 met un accent particulier sur la coopération entre l'homme et les technologies intelligentes, tout en intégrant des aspects tels que la durabilité, la résilience et la personnalisation de la fabrication. Dans cette perspective, les instruments de simulation permettent d'étudier le comportement d'un système industriel, d'anticiper les problèmes et d'examiner des scénarios d'amélioration sans affecter l'opération réelle de l'atelier.
Ce chapitre illustre la simulation du système de production examiné en utilisant le logiciel FlexSim. Cette application offre la possibilité de représenter les flux, les ressources, les stations de travail et les interactions entre divers composants du système. Il fournit donc une assistance appropriée pour examiner les performances de production, détecter les points de congestion et suggérer des réponses en accord avec les fondements de l'industrie 5.0, y compris l'optimisation des ressources, la bonification des conditions d'emploi et la quête d'une production plus souple et pérenne.

Ce chapitre commence par une présentation du logiciel FlexSim et de ses caractéristiques majeures. Par la suite, nous exposerons le système de production simulé en soulignant ses éléments constitutifs, ses flux de matières et son fonctionnement paramétrique. Par la suite, nous décrirons les phases de création du modèle de simulation dans FlexSim. Finalement, on analysera les résultats obtenus afin d'évaluer la performance du système et d'identifier les axes d'amélioration possibles pour favoriser une production plus intelligente, humaine et durable.

1. Présentation de logiciel Flexsim

FlexSim est un outil de simulation 3D à événements discrets servant à modéliser, simuler, examiner et optimiser des systèmes concrets tels que les chaînes de production, les dépôts, la logistique, les hôpitaux ou encore les chaînes d'approvisionnement. Il offre la possibilité d'expérimenter différents scénarios de manière virtuelle avant d'apporter des modifications à un système réel, dans le but de minimiser les risques, les coûts et les erreurs décisionnelles. FlexSim est présenté par Autodesk comme un logiciel de simulation 3D destiné à optimiser le flux, la capacité de production et la prise de décisions fondées sur des données.

1.1. Principe de fonctionnement

FlexSim se base sur la simulation par événements discrets. Cela veut dire que le programme conceptualise un système comme une série d'événements : l'arrivée d'une pièce, le commencement d'une opération, la fin d'un traitement, le mouvement d'un opérateur, la défaillance d'une machine, l'expédition d'un produit, et ainsi de suite.

L'utilisateur crée un modèle en trois dimensions en utilisant des éléments prédéfinis : machines, files d'attente, convoyeurs, opérateurs, véhicules, robots, rayonnages, patients, stations de travail, etc. FlexSim privilégie une méthode de construction rapide de modèles de production ou de déplacement de personnes par le biais du glisser-déposer, c'est-à-dire drag-and-drop.

2. Description du système de production simulé

La chaîne de production modélisée sous FlexSim représente une ligne automatisée de remplissage et de conditionnement de bouteilles. Elle est composée de plusieurs postes reliés entre eux afin d'assurer un flux continu de production, depuis l'approvisionnement jusqu'au stockage des produits finis.

Le processus débute au niveau du fournisseur de bouteilles, qui alimente la ligne en bouteilles vides. Deux types de bouteilles sont générés avec un temps d'arrivée défini dans les paramètres du modèle. Les bouteilles sont ensuite acheminées vers la remplisseuse, où elles sont remplies automatiquement. Cette opération constitue l'étape principale de transformation et nécessite un temps de traitement de 2 secondes par bouteille.

Après le remplissage, les bouteilles passent par une zone d'attente (Queue) servant de tampon afin d'éviter les blocages de la ligne et d'assurer la continuité de la production. Cette file possède une capacité de 10 000 unités.

Dans le modèle Industrie 4.0, les opérations de transport et de manutention sont réalisées automatiquement par un Task Executor (robot). Celui-ci déplace les bouteilles entre les différents postes sans intervention humaine, ce qui permet d'améliorer la rapidité, la précision et la productivité du système.

Dans le modèle Industrie 5.0, des opérateurs humains sont intégrés au processus. Les opérateurs collaborent avec les équipements automatisés pour effectuer certaines tâches de contrôle, de manutention ou d'emballage. Les vitesses de déplacement des opérateurs varient entre 1 m/s et 2 m/s, selon leur rôle dans le système. Cette collaboration homme-machine vise à accroître la flexibilité, la qualité et l'adaptabilité de la production.

Les bouteilles remplies sont ensuite dirigées vers le poste d'encaisseuse, où elles sont regroupées et emballées dans des cartons. L'opération d'emballage nécessite un temps de 5 secondes par unité de conditionnement. Les cartons utilisés proviennent d'un stock de cartons ayant une capacité de 1112 cartons.

Enfin, les produits emballés sont transférés vers le stock de produits finis, dont la capacité est fixée à 10 000 unités. Cette dernière étape représente la fin du processus de production avant l'expédition des produits vers les clients.

L'objectif de cette modélisation est d'évaluer les performances de la ligne de production à travers différents indicateurs tels que la productivité, le temps de cycle, l'utilisation des ressources, le taux d'occupation des postes et le niveau de stock, tout en comparant les approches Industrie 4.0 et Industrie 5.0

2.1. Modèle de l'Industrie 4.0

Dans le modèle de l'Industrie 4.0, le fonctionnement repose principalement sur l'automatisation et l'utilisation des machines intelligentes avec un minimum d'intervention humaine. Les opérations de transport et de traitement sont assurées automatiquement par les équipements et le Task Exécuter (Robot).

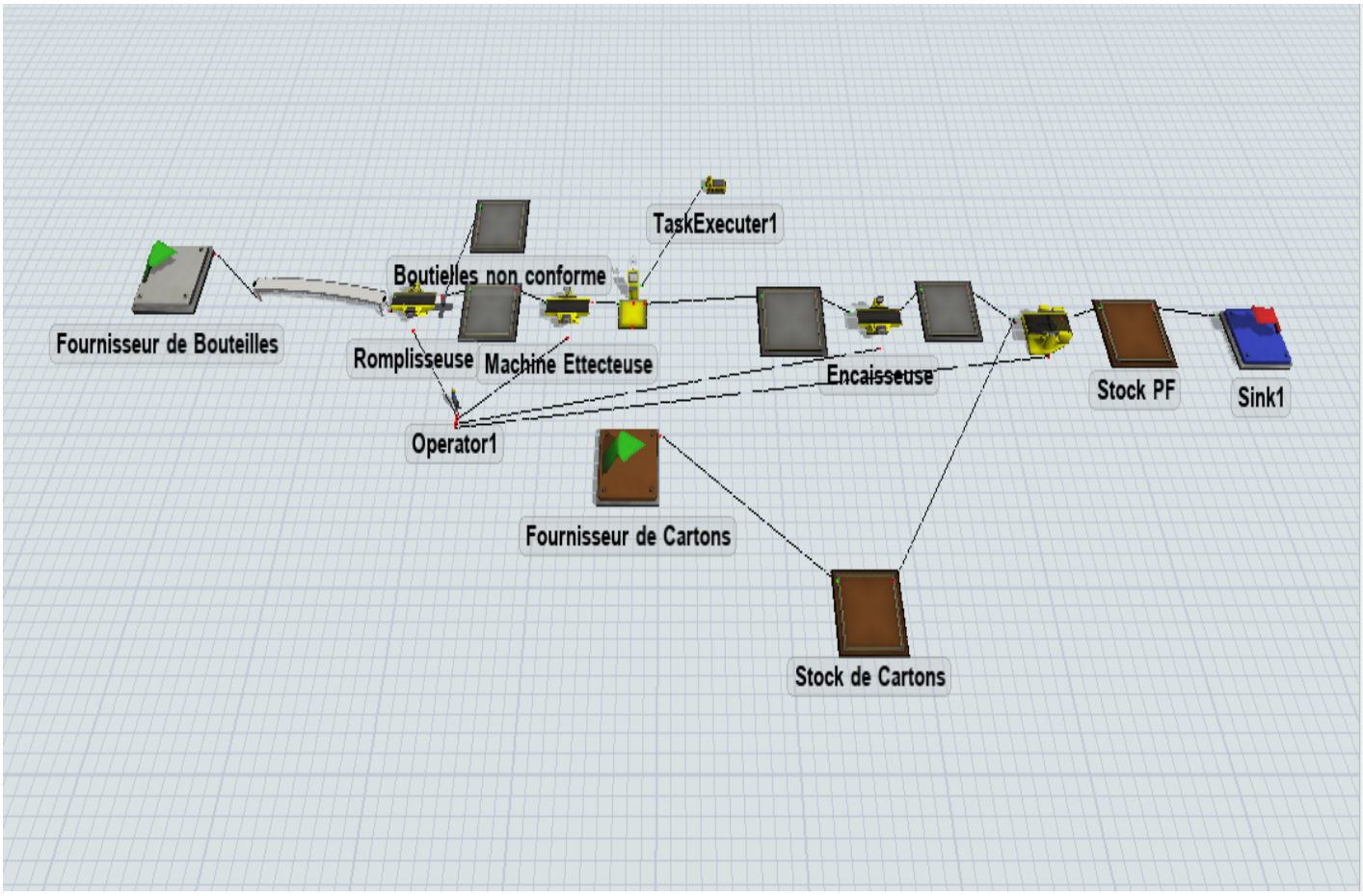

Figure 10 : Modèle Flexsim présente l'industrie 4.0

2.2. Modèle de l'Industrie 5.0

Nous avons ajouté un opérateur humain collaborant avec le Task Executer et les différentes machines de la ligne. L'opérateur intervient dans plusieurs tâches comme l'assistance au remplissage, le contrôle des bouteilles non conformes, l'approvisionnement des cartons et l'aide aux opérations d'emballage. Cette intégration de l'humain dans le système permet de créer une collaboration homme-machine, qui constitue l'un des principes fondamentaux de l'Industrie 5.0. L'objectif est d'améliorer la flexibilité, réduire les défauts, optimiser la qualité de production et renforcer l'efficacité globale du système.

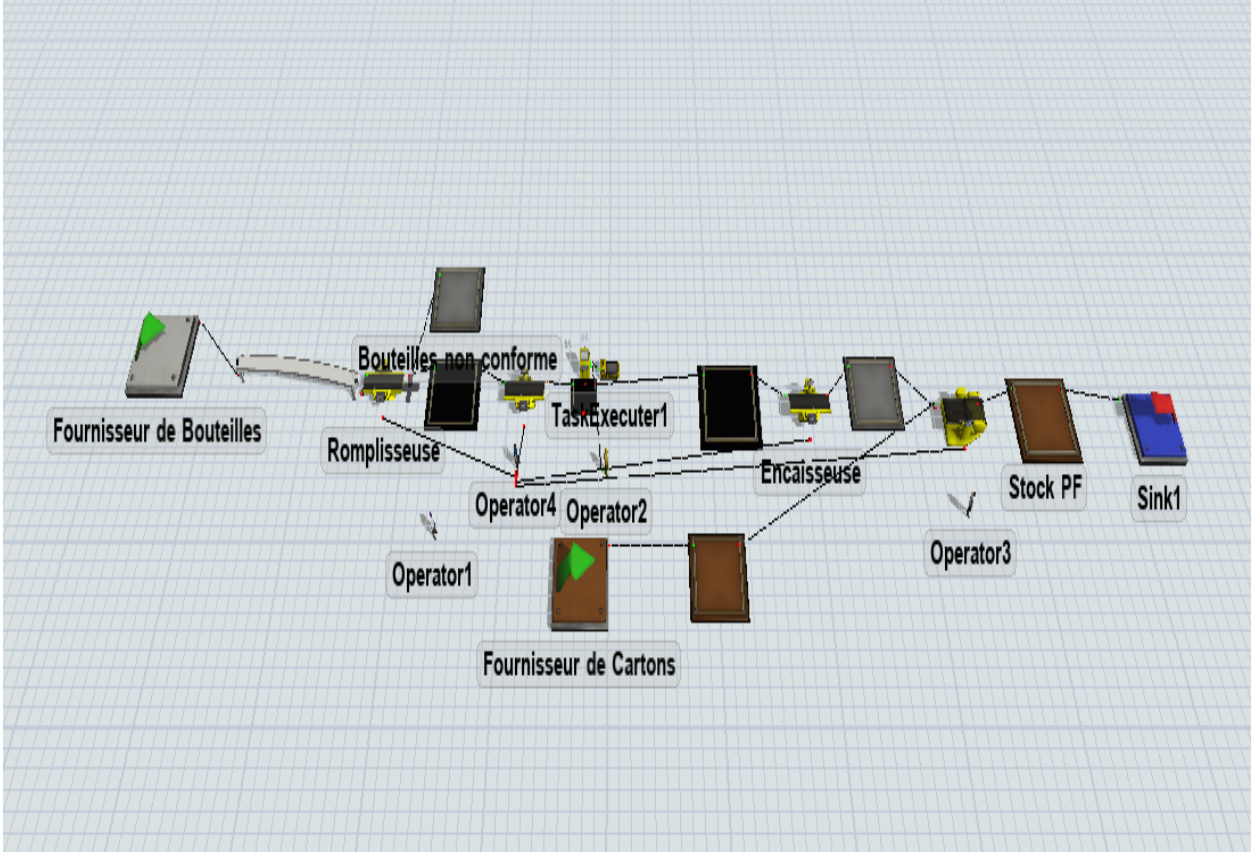

Figure 11 : Modèle de Flexsim présente l'industrie 5.0

2.3. Paramètres des composants du système

Composants	Paramètres	Valeur
Fournisseur de bouteilles	Inter-arrival time	Types 01 : 0 Types 02 : 10s
Remplisseuse	Processing time	2s
Queue	Capacity	10000
Opérateur 1	Walking speed	2m/s
Opérateur 2	Walking speed	1m/s
Opérateur 3	Walking speed	2m/s
Opérateur 4	Walking speed	2m/s
Task exécuter	Capacity	21
Encaisseuse	Packaging time	5s
Stock de cartons	Capacity	1112
Stock produits finis	Capacity	10000

Tableau 1 : Paramètres des composants

Les paramètres du modèle ont été définis afin de représenter le fonctionnement réel de la ligne de production. Chaque composant possède des caractéristiques spécifiques influençant les performances globales du système simulé.

3. Indicateur de Performance

Les indicateurs de performance utilisés dans cette simulation permettent d'évaluer l'efficacité et les performances des systèmes Industrie 4.0 et Industrie 5.0 dans la ligne de remplissage des bouteilles. Ces KPI fournissent une analyse quantitative de la production, de l'utilisation des ressources et du comportement du système durant la simulation. Les principaux

indicateurs étudiés sont ; Throughput, Cycle Time, le taux d'utilisation des ressources ainsi que le temps d'attente. Ces indicateurs permettent de comparer les deux systèmes afin d'identifier le modèle le plus performant en termes de productivité, de flexibilité et de qualité de production.

3.1. Les résultats de simulation

3.1.1. L'industrie 4.0

WIP (work in process) : nombre des produits en cours de fabrication pour une durée de simulation 8H :

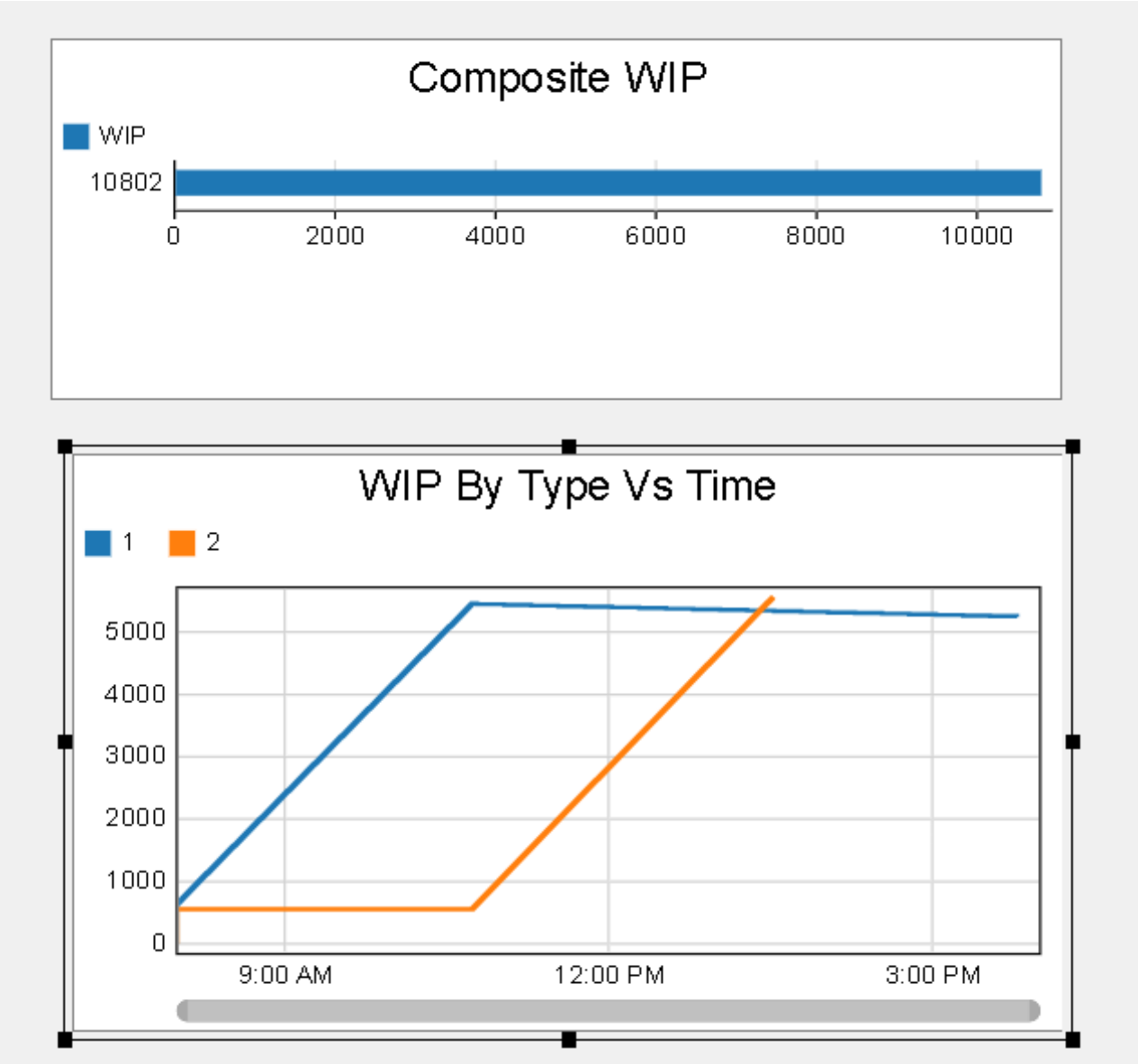

Figure 12 : Work in process (WIP)

Composite stay time (temp de cycle) :

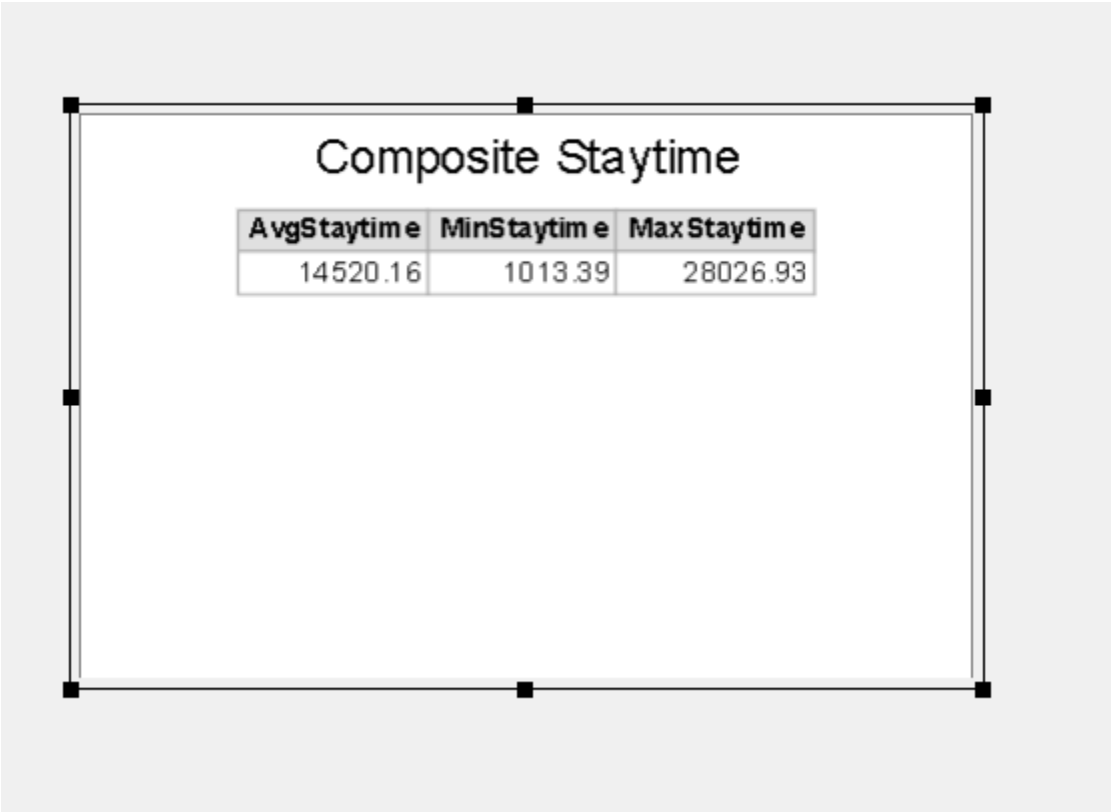

Figure 13 : Le temp de Cycle

Throughput (nombre de palette) :

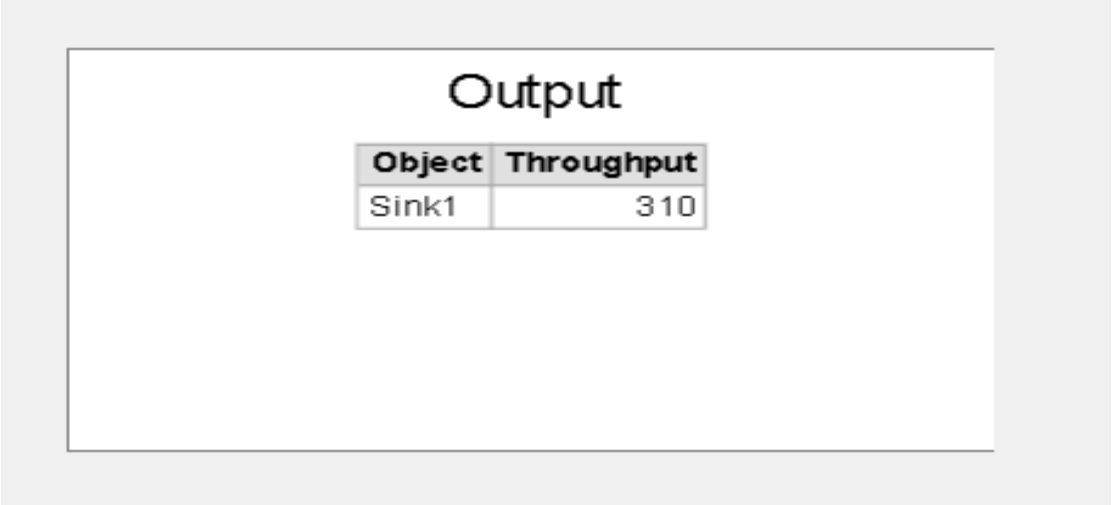

Figure 14 : Le résultat obtenue pour Throughput

State :

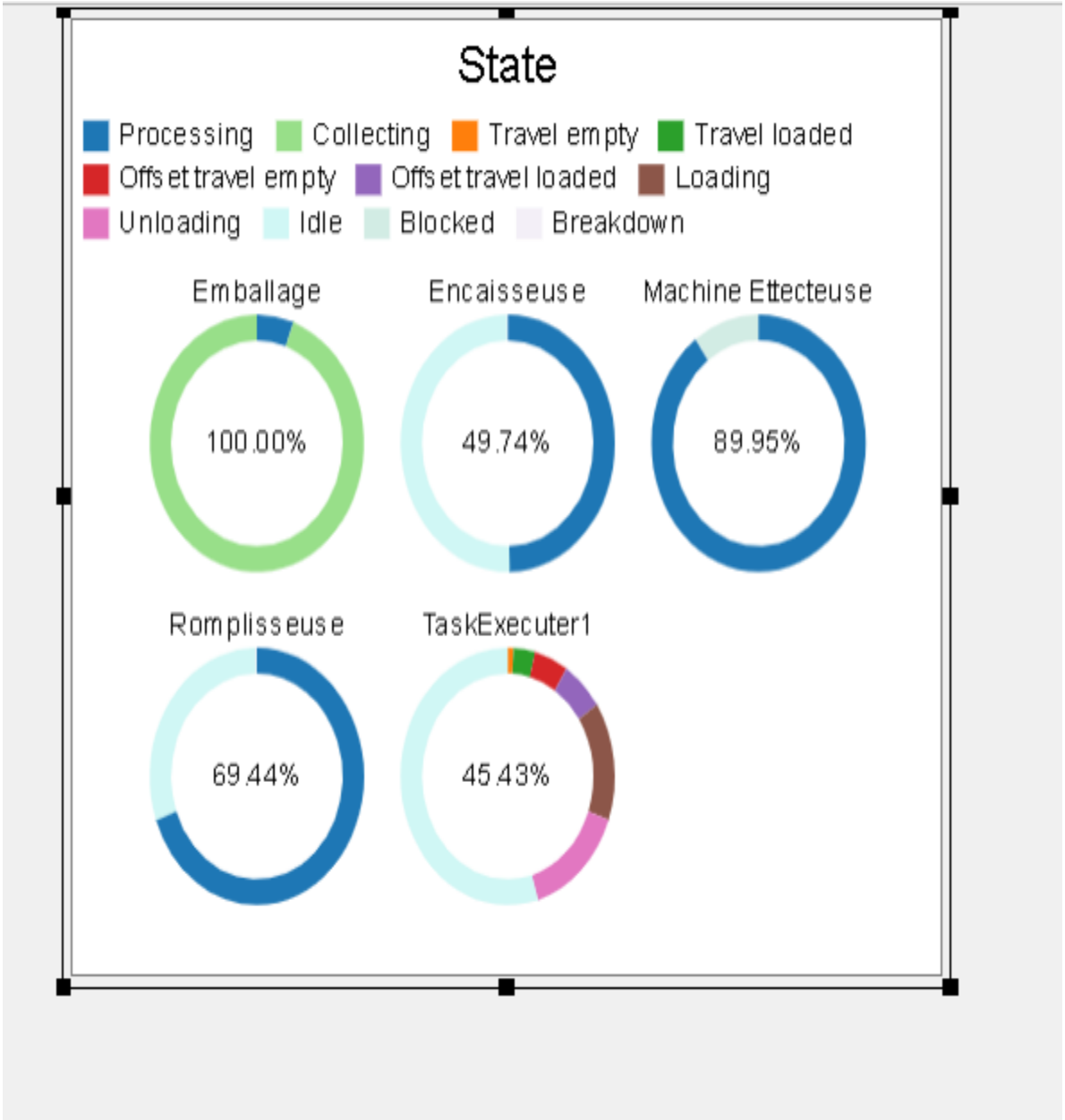

Figure 15 : Le taux utilisation de chaque machine

3.1.2. L'industrie 5.0

WIP (work in process) : nombre des produits en cours de fabrication pour une durée de simulation 8H

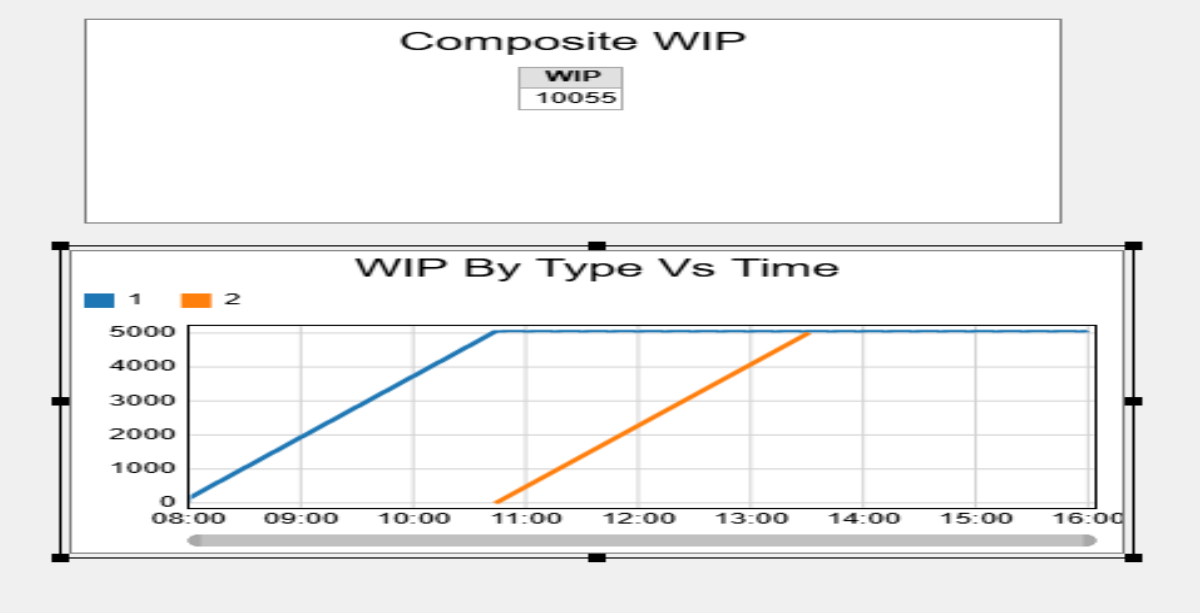

Figure 16: Work in process (WIP)

Composite stay time (temp de cycle) :

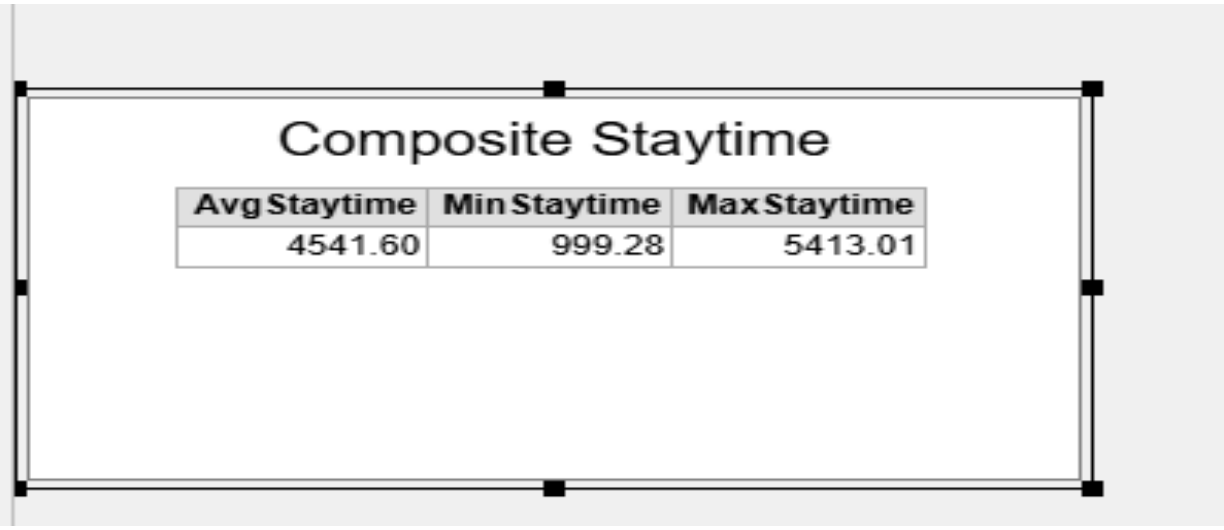

Figure 17: Le temp de Cycle

Throughput (nombre de palette) :

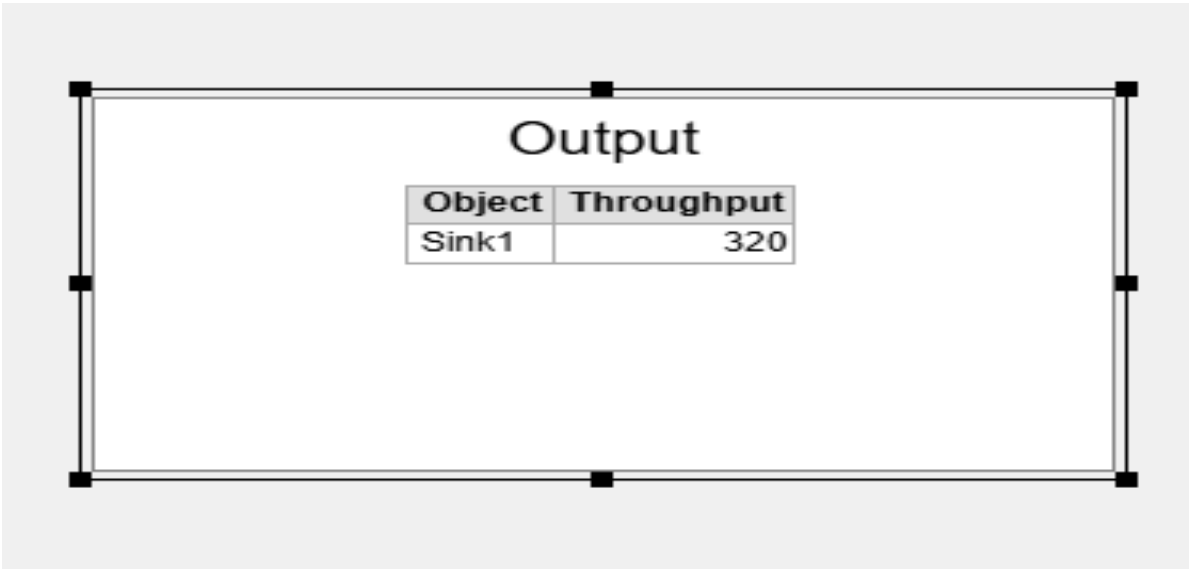

Figure 18: Résultat obtenue pour Throughput

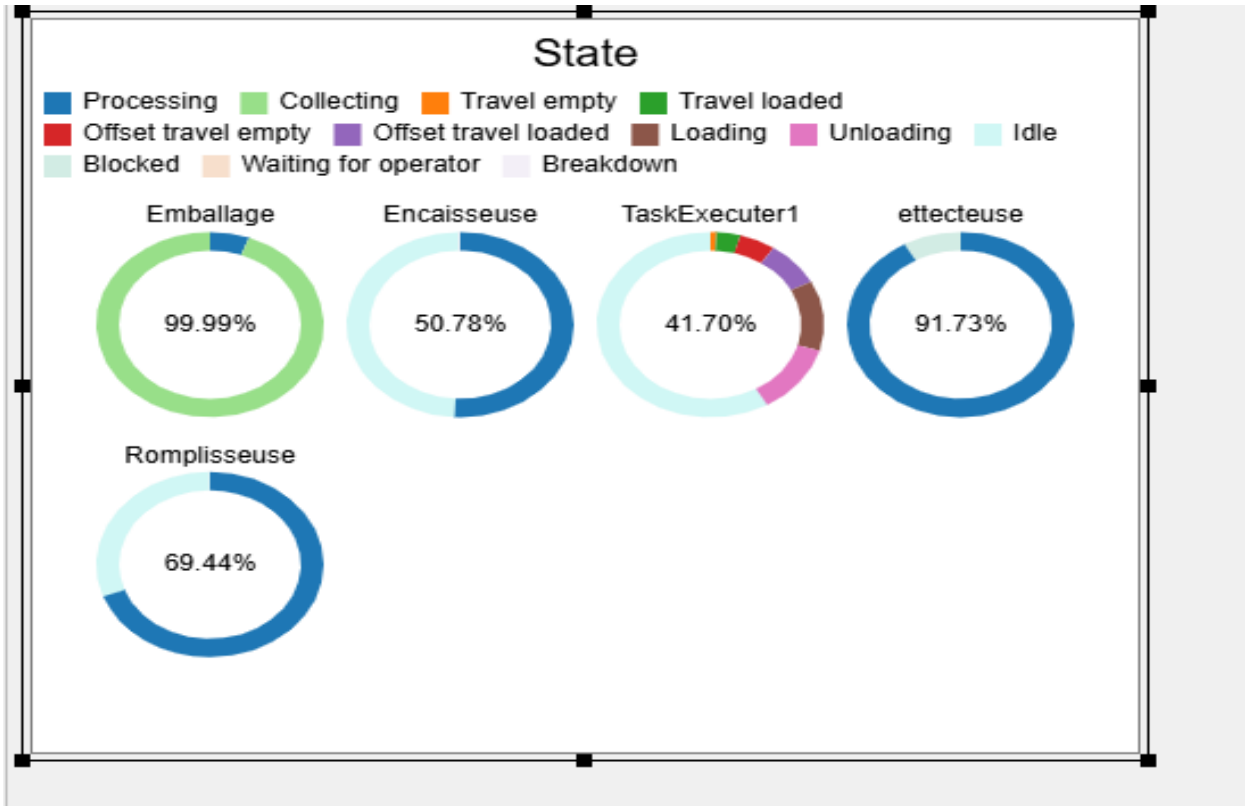

Figure 19: Le taux utilisation de chaque machine

3.2. Interprétation des résultats

Par rapport au WIP :

Les résultats montrent que :
WIP Industrie 4.0 = 10802
WIP Industrie 5.0 = 10055

On observe une diminution du WIP dans l'Industrie 5.0 par rapport à l'Industrie 4.0, avec une réduction d'environ 747 unités (soit près de 6,9 %).
Cette baisse signifie que :
Le flux de production est plus fluide dans le système 5.0,
Il y a moins d'accumulation de produits en cours de fabrication,
Les goulots d'étranglement sont légèrement réduits,
La gestion des opérations est plus efficace et mieux équilibrée.

Par rapport au Throughput :
Industrie 4.0 = 310
Industrie 5.0 = 320

On observe une augmentation du throughput dans l'Industrie 5.0 par rapport à l'Industrie 4.0, avec un gain de 10 unités.
Cette amélioration signifie que :
Le système 5.0 produit plus de pièces dans le même temps,
Le flux de production est plus performant et mieux optimisé,
Il y a une meilleure réactivité du système, ce qui réduit les pertes de temps et les blocages

Par rapport au Composite stay time :

Industrie 4.0 : 14520,16
Industrie 5.0 : 4541,60

On observe une forte diminution du temps de séjour (stay time) dans l'Industrie 5.0 par rapport à l'Industrie 4.0.
La réduction est très importante (environ -68 %), ce qui signifie que :
Les pièces passent beaucoup moins de temps dans le système,
Le flux de production est nettement plus rapide et fluide,
Il y a une réduction des attentes et des files d'attente dans les postes de travail,
Le système est mieux équilibré et moins congestionné

Par rapport au State :

Les résultats obtenus à partir des simulations FlexSim montrent une différence claire entre les performances des systèmes Industrie 4.0 et Industrie 5.0.

Dans le système Industrie 4.0, plusieurs machines présentent un taux d'utilisation élevé, notamment la machine d'emballage et l'étiqueteuse. Cependant, certaines ressources comme le Tas Exécuter et l'encaisseuse restent moins exploitées, ce qui peut provoquer des déséquilibres dans le flux de production et des temps d'attente.

En revanche, le système Industrie 5.0 montre une meilleure coordination entre les machines, les ressources intelligentes et les opérations automatisées. Les temps d'inactivité et de blocage sont réduits, ce qui améliore la fluidité du processus de fabrication.

Tableau 2 : Les résultats obtenus avec meilleur système

Indicateur	Industrie 4.0	Industrie 5.0	Evolution
WIP	10802	10055	Industrie 5.0 plus efficace dans la gestion des encours
Throughput	310	320	Industrie 5.0 plus productive
Composite stay time	14520.16	4541.6	Industrie 5.0 plus rapide et plus fluide

En conclusion, l'industrie 5.0 est meilleure que l'Industrie 4.0 en termes d'utilisation des ressources et de performance globale. Elle permet une meilleure gestion du flux de production, une productivité plus élevée, une réduction importante du temps de séjour ainsi qu'une utilisation plus efficace du système de production.

Conclusion Générale

L'Industrie 5.0 marque une nouvelle étape dans l'évolution industrielle, où la technologie n'est plus seulement une finalité, mais un levier au service de l'humain, de la durabilité et de la résilience des systèmes de production. Contrairement à l'Industrie 4.0, qui met l'accent sur l'automatisation et la digitalisation à outrance, l'Industrie 5.0 privilégie une collaboration harmonieuse entre les individus et les technologies avancées, avec pour objectif de développer des environnements de production plus souples, plus performants et plus respectueux de l'environnement

Dans ce mémoire, nous avons exploré les bases théoriques de l'Industrie 5.0 ainsi que son rôle déterminant dans la transformation numérique appliquée au Smart Manufacturing. Nos travaux ont mis en évidence comment l'intégration de technologies émergentes telles que l'intelligence artificielle, la cobotique, l'Internet des Objets Industriel (IIoT), les jumeaux numériques et le Cloud Computing peut accroître significativement les performances des systèmes industriels. Ces nouvelles approches favorisent des décisions mieux éclairées, une optimisation accrue des ressources disponibles et une capacité d'adaptation renforcée face aux perturbations et évolutions du marché. Par ailleurs, notre analyse a souligné l'importance cruciale de l'humain dans ces nouveaux environnements industriels. L'opérateur devient un acteur incontournable à travers des interactions collaboratives avec les robots et l'utilisation d'outils intelligents facilitant la prise de décision. En parallèle, les préoccupations environnementales et éthiques prennent une place centrale dans cette transition vers une industrie plus responsable, avec un accent particulier sur l’optimisation énergétique, la gestion des déchets et la sécurisation des données industrielles. Dans la partie pratique de ce travail, une simulation menée avec FlexSim a permis de modéliser et d'analyser un système de production intelligent conforme aux principes de l'Industrie 5.0. Les résultats ont confirmé l'utilité des outils de simulation numérique pour évaluer la performance des systèmes, améliorer les flux de production et étudier les interactions entre les ressources humaines et robotiques. Cette méthodologie donne aux entreprises les moyens d’anticiper d’éventuels problèmes, de réduire leurs coûts opérationnels et d'optimiser leur efficacité globale avant toute mise en œuvre concrète.

En conclusion, l'Industrie 5.0 représente une avancée prometteuse vers une transformation numérique à la fois intelligente et durable du secteur manufacturier. Cette vision ouvre la voie à de nouvelles opportunités pour les entreprises en quête d'un équilibre entre innovation technologique, performance économique et bien-être humain. Néanmoins, des défis demeurent, notamment en matière de cybersécurité, de formation des compétences nécessaires et d'adaptation des infrastructures actuelles pour accueillir ces technologies avancées. Pour les recherches futures, il serait pertinent d’approfondir les travaux sur l’application de l’intelligence artificielle avancée, des systèmes autonomes et des technologies prédictives dans ces environnements industriels novateurs. De même, il conviendrait d'améliorer encore les modèles de simulation afin de mieux représenter des systèmes plus complexes et collaboratifs qui répondent aux besoins croissants des entreprises modernes.

Bibliographie

[1] Commission européenne. (2021). Industry 5.0: Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry. Publications Office of the European Union.

[2] Organisation des Nations unies. (2015). Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development. United Nations.

[3] European Parliament. (2019). Industry 4.0: Digitalisation for productivity and **gr**owth. European Parliament.

[4] International Federation of Robotics. (2020). World Robotics Report. International Federation of Robotics.

[5] Mezgebe, T. T., Gebreslassie, M. G., Sibhato, H., & Bahta, S. T. (2023). Intelligent manufacturing eco-system: A post COVID-19 recovery and growth opportunity for manufacturing industry in Sub-Saharan countries. Scientific African, 19, Article e01547. **https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01547**

[6] Simard, J. (2025). Interopérabilité des systèmes du manufacturier intelligent à l'ère de l'industrie 4.0 dans le contexte des PME manufacturières (Doctoral dissertation, Université du Québec à Trois-Rivières).

[7] Proaction International. (2022, 24 décembre). Les 3 piliers de l'industrie 5.0 [Image]. Dans Jean-Philippe Raiche, Industrie 5.0 : L'humain comme pilier de la transformation numérique. Blogue Vision Performance.

[8] Breque, M., De Nul, L., & Petridis, A. (2021). Industry 5.0: Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry. European Commission, Directorate-General for Research and Innovation. **https://doi.org/10.2777/308407**

[9] National Institute of Standards and Technology. (n.d.). Digital thread for manufacturing. U.S. Department of Commerce. **https://www.nist.gov/programs-projects/digital-thread-manufacturing**

[10] Maddikunta, P. K. R., Pham, Q. V., Prabadevi, B., Deepa, N., Dev, K., Gadekallu, T. R., Ruby, R., & Liyanage, M. (2022). Industry 5.0: A survey on enabling technologies and potential applications. Journal of Manufacturing Systems, 62, 199-227. **https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.11.015**

[11] European Commission, Directorate-General for Research and Innovation. (2022). Industry 5.0: Foundations and main concepts for a human-centric, sustainable and resilient European industry. Publications Office of the European Union. **https://doi.org/10.2777/027877**

[12] European Commission, Directorate-General for Research and Innovation. (2022). Industry 5.0: Foundations and main concepts for a human-centric, sustainable and resilient European industry. Publications Office of the European Union. **https://doi.org/10.2777/027877**

[13] International Organization for Standardization. (2019). Internet of things (IoT) — Interoperability for IoT systems — Part 1: Framework (ISO/IEC Standard No. 21823-1:2019). **https://www.iso.org/fr/standard/77520.html**

[14] Hollnagel, E., Pariès, J., & Wreathall, J. (Eds.). (2011). Resilience engineering in practice: A guidebook. CRC Press. **https://doi.org/10.1201/9781317065265**

[15] Ellen MacArthur Foundation. (n.d.). Circular economy introduction. **https://www.ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview**

[17] Bounouar, M., Béarée, R., Siadat, A., & Benchekroun, T. H. (2022). On the role of human operators in the design process of cobotic systems. Cognition, Technology and Work. **https://doi.org/10.1007/s10111-021-00691-y**

[18] NeuralPit. (2023, December 6). Generative AI is redefining manufacturing! Medium. **https://medium.com/@NeuralPit**

[**19]** Wang, J., Ye, L., Gao, R. X., Li, C., & Zhang, L. (2019). Digital twin for rotating machinery fault diagnosis in smart manufacturing. International Journal of Production Research, 57, 3920–3934.

[20] Li, F., Lin, J., & Han, H. (2023). FSL: Federated sequential learning-based cyberattack detection for Industrial Internet of Things. Industrial Artificial Intelligence, 1(1), Article 4. **https://doi.org/10.1007/s44244-023-00006-2**

[22] Othman, U., & Yang, E. (2023). Human–robot collaborations in smart manufacturing environments: Review and outlook. Sensors, *23*(12), 5663. **https://doi.org/10.3390/s23125663**

[**23]** International Electrotechnical Commission. (2017). Industrial electroheating and electromagnetic processing equipment—Requirements on touch currents, voltages and electric fields from 1 kHz to 6 MHz (IEC TS 62996:2017). **https://www.iso.org/standard/62996.html**

[24] Gao, R. X., Wang, L., Teti, R., Dornfeld, D., Kumara, S., Mori, M., & Helu, M. (2024). Artificial intelligence in manufacturing: State of the art, opportunities and challenges. CIRP Annals, 73(1), 1–20**. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2024.04.115**

[25] Puthanveettil Madathil, A., Luo, X., Liu, Q., Walker, C., Madarkar, R., & Qin, Y. (2025). A review of explainable artificial intelligence in smart manufacturing. International Journal of Production Research, 63(23), 8654–8697**. https://doi.org/10.1080/00207543.2025.2513574**

[26] Smaoui, N., & Hamdi, M. (2024). Atelier numérique jumeau : un nouveau paradigme pour l'atelier vers une fabrication intelligente. Revue des Systèmes de Production et de l'Industrie 4.0, 12(3), 45–60**. https://doi.org/10.5281/zenodo**

[27] Li, Y., Zhang, H., & Chen, X. (2020). Digital twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 61, 101837**. https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101837**

[28] Gupta, P., Krishna, C., Rajesh, R., Ananthakrishnan, A., Vishnuvardhan, A., Patel, S. S., Kapruan, C., Brahmbhatt, S., Kataray, T., Narayanan, D., & Chadha, U. (2022). Industrial internet of things in intelligent manufacturing: A review, approaches, opportunities, open challenges, and future directions. International Journal on Interactive Design and Manufacturing, 16, 1–23**. https://doi.org/10.1007/s12008-022-01075-w**

[29] Zhang, Y., Wang, J., Li, X., & Chen, H. (2024). Artificial intelligence-based approaches in smart sensing systems for Industry 4.0 applications. Sensors, 24(2), 44. **https://doi.org/10.3390/s24020044**

[30] Chen, Z., Liu, Y., Wang, K., & Zhang, H. (2022). A review on digital twin-driven smart manufacturing: Enabling technologies, applications, and challenges. Machines, 10(10), 850. **https://doi.org/10.3390/machines10100850**

[32] Almotiri, S. (2024, 22 juin). Enhancing industrial cybersecurity: From flat networks to segmented architectures.

[34] European Commission, Directorate-General for Research and Innovation. (2021). Industry 5.0: Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry. Publications Office of the European Union. **https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/aed3280d-70fe-11eb-9ac9-01aa75ed71a1**

[35] Lu, Y., Liu, Z., Xu, X., Bao, J., Wang, L., Qin, Z., Chand, S., Zheng, H., & Xia, W. (2022). Outlook on human-centric manufacturing towards Industry 5.0. Journal of Manufacturing Systems, 62, 612–627. **https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.02.001**

[36] International Labour Organization (ILO). (n.d.). Skills for artificial intelligence and digitalization. International Labour Organization. **https://www.ilo.org/topics-and-sectors/skills-and-lifelong-learning/skills-artificial-intelligence-and-digitalizatio**

[37] Antonaci, F. G., Olivetti, E. C., & Marcolin, F. (2024). Workplace well-being in Industry 5.0: A worker-centered systematic review. Sensors, 24(17), 5473. **https://doi.org/10.3390/s24175473**

[39] International Energy Agency. (2025). Energy efficiency 2025: Industry. International Energy Agency. **https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2025/industry**

[40] Sakao, T., Bocken, N., Nasr, N., & Umeda, Y. (2024). Implementing circular economy activities in manufacturing for environmental sustainability. CIRP Annals, 73(2), 457–481. **https://doi.org/10.1016/j.cirp.2024.05.007**

[41] Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). (2025). OECD supply chain resilience review: Navigating risks. OECD Publishing. **https://doi.org/10.1787/94e3a8ea-en**

[42] Zhao, N., Hong, J., & Lau, K. H. (2023). Impact of supply chain digitalization on supply chain resilience and performance: A multi-mediation model. International Journal of Production Economics, 259, 108817**. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2023.108817**

[43] International Organization for Standardization. (2024). ISO 79001: (standard page). ISO. **https://www.iso.org/standard/79001.html**

[44] Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). (2025). OECD supply chain resilience review: Navigating risks. OECD Publishing. **https://doi.org/10.1787/94e3a8ea-en**

[45] European Commission. (n.d.). Data Act. Shaping Europe's digital future. **https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/data-act**

[46] National Institute of Standards and Technology. (2025). Cybersecurity framework 2.0 manufacturing profile (Initial public draft), NIST Internal Report 8183 Rev. 2. **https://csrc.nist.gov/pubs/ir/8183/r2/ipd**

[47] Kour, R., Karim, R., Dersin, P., & Venkatesh, N. (2024). Cybersecurity for Industry 5.0: Trends and gaps in computer security. Frontiers in Computer Science, 6, 1434436. **https://doi.org/10.3389/fcomp.2024.1434436**

[48] S. Nahavandi, "Industry 5.0—A Human-Centric Solution, Sustainability, vol. 11, no. 16, p. 4371, 2019.