

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان -

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



## MEMOIRE

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

**En :** Génie industriel

**Spécialité :** Ingénierie des systèmes

**Par :** NEFTI Doha

**Sujet**

# Investigations sur le cycle de vie de la donnée dans le jumeau numérique

Soutenu publiquement, le 25 / 09 /2023 , devant le jury composé de :

SOUIER Mehdi	Pr	Université de Tlemcen	Président
BELKAID Fayçal	Pr	Université de Tlemcen	Encadrant
HAMZAOUI Mohammed Adel	Dr	Université de Bretagne-Sud	Co-Encadrant
JULIEN Nathalie	Pr	Université de Bretagne-Sud	Directrice de stage
GAOUAR Nihad	MCB	Université de Tlemcen	Examinatrice 1
MENADJLIA Nardjes	MCB	Université de Tlemcen	Examinatrice 2

Année universitaire : 2022 /2023

## *Remerciements*

*Le Messager de Dieu (SAW) dit : « N'est pas reconnaissant envers Dieu, celui qui ne l'est pas envers les gens » (rapporté par Abou Daoud).*

*Avant de débiter, je souhaite exprimer ma gratitude envers les membres du jury, à savoir M. SOUIER, Mme. GAOUAR et Mme. MENADJLIA, pour l'intérêt qu'ils ont manifesté en acceptant d'évaluer mon travail de recherche.*

*Il y a cinq ans de cela, j'ai fait mes premiers pas dans le domaine du génie industriel, une filière que je ne connaissais que de nom. C'est lors d'une journée portes ouvertes destinée aux futurs bacheliers que j'ai eu la chance de la découvrir, grâce à la présentation de M. BENSMACHINE, que son âme repose en paix. J'ai pris le temps d'explorer les modules enseignés au cours des deux premières années, et mon choix s'est rapidement cristallisé, séduit par la diversité des cours proposés, majoritairement axés sur les aspects techniques. Cela sembler évident, étant donné que mon diplôme de baccalauréat était en mathématiques. Si je pouvais rétroagir dans le temps, je réitérerais invariablement cette décision.*

*Pour moi, étudier cette filière a toujours été synonyme de passion et d'épanouissement, bien loin de l'image d'une galère étudiante que l'on entend souvent. Alors que la plupart des étudiants parlent de leurs souffrances et des nuits blanches passées à étudier, j'ai vécu cette période avec une passion dévorante. J'aimais chaque sujet que j'étudiais, chaque défi que je relevais.*

*Mon parcours académique n'a pas été de tout repos. Entre les mouvements de grève et la pandémie de COVID-19, qui ont transformé deux années d'enseignement en ligne, j'ai traversé des moments inattendus. Cependant, cette filière a continué de me stimuler, de me donner envie d'apprendre, même dans les circonstances les plus exceptionnelles.*

*Cela a également été une période de rencontres exceptionnelles avec des enseignants qui m'ont profondément marqué. Je ne pourrais pas tous les nommer, car la liste compte plus de 80 noms. Néanmoins, je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers ces formidables pédagogues. Parmi eux, M. MIRI restera à jamais mon professeur de mathématiques préféré. Mme. GHOMRI, avec sa grâce et son élégance, a laissé une empreinte indélébile. M. KAHOUADJI m'a impressionné par sa prestance, tandis que M. BELKHRROUBI m'a enseigné la rigueur à travers son exemple.*

*Je souhaite également rendre hommage à M. BELKAID, qui est devenu mon encadrant et a cru en moi. Ses précieux conseils, son soutien constant, sa disponibilité sans faille et son écoute attentive ont été des piliers essentiels de mon parcours. Grâce à lui, j'ai eu la chance de candidater auprès de l'équipe du jumeau numérique de l'ENSIBS, où j'ai effectué mon stage de fin d'études.*

*Ma reconnaissance s'étend chaleureusement et profondément à ma directrice de stage, Nathalie JULIEN, dont la décision d'intégrer ma personne au sein de son équipe a constitué une opportunité véritablement exceptionnelle. J'éprouve une gratitude sincère à son égard. Sa confiance en mes compétences a constamment alimenté mon zèle tout au long de cette période de stage. Je suis profondément redevable pour les enseignements inestimables ainsi que les compétences précieuses que j'ai eu la chance d'acquérir grâce à cette expérience au sein de son équipe.*

*De même, je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers mon tuteur de stage, Adel HAMZAOUI, dont la présence bienveillante et le partage de connaissances ont grandement contribué à enrichir mon expérience formatrice. Sa sympathie naturelle a rendu beaucoup plus accessible le fait de solliciter son aide et ses conseils. Cet éminent mentor incarne l'excellence, la ténacité et l'engagement, et je suis honorée d'avoir eu la chance de bénéficier de son mentorat.*

*Je souhaite également manifester ma gratitude profonde envers Jeremy DUPONT et Laurent FORESTIER, deux éminents collaborateurs au sein de l'équipe de la société SPIE. Leur maîtrise approfondie du domaine a constitué des piliers fondamentaux lors de la phase de cas d'étude. Je tiens à exprimer ma sincère reconnaissance pour leur contribution et leur précieuse collaboration.*

*Enfin, je tiens à remercier Naomi, pour son écoute bienveillante, ses précieux conseils, sa présence réconfortante, et surtout, pour notre amitié sincère qui a enrichi cette période de ma vie. Je désire aussi témoigner toute ma gratitude envers Ebtissem pour son accueil des plus chaleureux, ainsi que pour sa contribution significative à l'élargissement de ma vision professionnelle.*

NEFTI Doha

Une page :

Le projet de fin d'études a été réalisé dans le cadre d'une collaboration entre l'Université de Tlemcen, le Laboratoire de Productique de Tlemcen, également connu sous le nom de Manufacturing Engineering Laboratory of Tlemcen (MELT), ainsi que l'Université de Bretagne Sud en partenariat avec le laboratoire Lab-STICC.

Une partie de ce mémoire a été présentée lors d'une conférence internationale Cigi Qualita Mosim à Trois-Rivières, au Québec (*CIGI Qualita Mosim, 2023*).

# *Table des matières*

<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
<b>I. Chapitre 1 Généralités sur le jumeau numérique.....</b>	<b>3</b>
I.1 Introduction.....	4
I.2 Transition numérique .....	4
I.2.1 Types.....	5
I.3 L'industrie 4.0 .....	8
I.3.1 Définition .....	9
I.3.2 Principaux piliers .....	9
I.4 Systèmes cyber-physiques.....	12
I.4.1 Définition .....	12
I.4.2 Caractéristiques .....	13
I.5 Jumeau numérique.....	14
I.5.1 Historique .....	14
I.5.2 Définition .....	16
I.5.3 Jumeau numérique et CPS.....	17
I.5.4 Domaines d'application .....	18
I.6 Conclusion .....	20
<b>II. Chapitre 2 Revue de la littérature sur le jumeau numérique .....</b>	<b>21</b>
II.1 Introduction.....	22
II.2 Etat de l'art sur les jumeaux numériques.....	22
II.2.1 Le modèle à cinq dimensions .....	22
II.2.2 ISO 23247 - Cadre de jumeau numérique pour la fabrication.....	24
II.2.3 Le tableau périodique des capacités .....	24
II.2.4 Une méthodologie générique de développement et de déploiement .....	25
II.3 Etat de l'art sur le cycle de vie de la donnée .....	33
II.3.1 Gestion des données pour le développement d'un modèle ontologique.....	34
II.3.2 Données du jumeau numérique : méthodes et technologies clés.....	34
II.3.3 Jumeau numérique et interactions homme-robot 4.0.....	35
II.4 Conclusion .....	35
<b>III. Chapitre 3 Modélisation de l'Interaction Homme-Jumeau Numérique.....</b>	<b>36</b>
III.1 Introduction.....	39

III.2	Modélisation du cycle de vie de la donnée .....	39
III.2.1	Modèle 5A .....	39
III.2.2	Typologie de la donnée .....	41
III.3	Jumeau numérique collaboratif .....	43
III.4	Cas d'étude .....	44
III.4.1	Contexte .....	44
III.4.2	Présentation générale de SPIE France .....	45
III.4.3	Notions sur la maintenance.....	46
III.5	Méthodologie .....	48
III.5.1	Analyser les usages du jumeau numérique collaboratif.....	48
III.5.2	Appliquer l'architecture actuelle entre Spie et le client .....	48
	Application du modèle 5A au cas d'étude SPIE-Client.....	48
III.5.3	Sélection de données .....	49
III.5.4	Classement de données.....	49
III.5.5	Filtrage de données .....	50
III.5.6	Catégorisation des données .....	50
III.5.7	Application de la typologie de données .....	51
III.5.8	Extension du modèle 5A.....	52
III.6	Conclusion .....	53
<b>IV. Chapitre 4 Modélisation de l'Interaction Tri-dimensionnelle du Jumeau Numérique</b>		
<b>39</b>		
IV.1	Introduction.....	55
IV.2	Cas d'étude .....	55
IV.3	Méthodologie .....	56
IV.3.1	Diagramme de séquence.....	56
IV.3.2	Application diagramme de séquence .....	58
IV.3.3	Identification des interactions .....	60
IV.3.4	Modèle d'interaction générique.....	61
IV.4	Conclusion .....	63
<b>Conclusion générale et perspectives .....</b>		<b>65</b>
<b>REFERENCES .....</b>		<b>67</b>

# *Liste des figures*

## **Chapitre 1 : Généralités sur le jumeau numérique**

Figure I.1 : Nombre d'articles sur les jumeaux numériques publiés par an (Xin Liu, 2023). .. 16

## **Chapitre 2 : Revue de la littérature sur le jumeau numérique**

Figure I.1 : Nombre d'articles sur les jumeaux numériques publiés par an (Xin Liu, 2023). ..	16
Figure II.1 : Le modèle 5D du jumeau numérique (Tao et al.,2019).....	23
Figure II.2 : Méthodologie en 5C pour le déploiement du jumeau numérique (Hamzaoui et Julien, 2023). .....	25
Figure II.3 : Hiérarchie des niveaux JN (Julien et Martin, 2021b). .....	26
Figure II.4 : Maturité numérique (Julien et Martin,2021b).....	27
Figure II.5 : Topologies de JN. (Julien et Martin,2021b).....	28
Figure II.6 : Boucle de décision (Julien et Martin,2021b). .....	29
Figure II.7 : Hiérarchie d'utilisation (Julien et Martin, 2021b). .....	30
Figure II.8 : Évolution des versions du jumeau numérique au cours de son cycle de vie (Hamzaoui et Julien, 2023) .....	31
Figure II.9 : Architecture de la Gestion Dynamique de la Précision pour le Jumeau Numérique (Hamzaoui et Julien, 2023). .....	32
Figure II.10 : Classification des modèles (Hamzaoui et Julien, 2023).....	32

## **Chapitre 3 : Modélisation de l'Interaction Homme-Jumeau Numérique**

Figure III.1 : Modèle 5A du cycle de vie de la donnée dans le jumeau numérique (CIGI Qualita Mosim, 2023) .....	40
Figure III.2 : Avant la coopération. ....	53
Figure III.3 : Après la coopération. ....	53

## **Chapitre 4 : Modélisation de l'Interaction Tri-dimensionnelle du Jumeau Numérique**

Figure IV.1 : Notions de base diagramme de séquence (Roques, 2013).....	57
Figure IV.2 : Exemple de fragments (Roques, 2013). .....	58
Figure IV.3 : Application du diagramme de séquence au cas d'étude.....	59
Figure IV.4 : Modèle d'interaction (1). .....	62
Figure IV.5 : Modèle d'interaction (2). .....	62

# *Liste des tableaux*

## **Chapitre 1 : Généralités sur le jumeau numérique**

Tableau I. 1: Définition .....	16
Tableau I. 2: Principales différences entre le JN et CPS .....	17

## **Chapitre 2 : Revue de la littérature sur le jumeau numérique**

Tableau II. 3: Hiérarchie d'utilisation.....	29
--	----

## **Chapitre 3 : Modélisation de l'Interaction Homme-Jumeau Numérique**

Tableau III. 1: Modèle KH-KHC (Pacaux-Lemoine, 2002) et (Kamoise et al., 2023) .....	44
Tableau III. 2: Classification des Données pour la Visibilité des Contraintes. ....	49
Tableau III. 3: Catégorisation des données. ....	50
Tableau III. 4: Typologie de la donnée appliquée à la classe OT. ....	51

## **Chapitre 4 : Modélisation de l'Interaction Tri-dimensionnelle du Jumeau Numérique**

Tableau IV.1 : Typologie appliquée à un cas d'étude.....	55
Tableau IV.2 : Interactions de l'Agent Humain (AH) vers le Jumeau Numérique (JN) ou l'Environnement Virtuel (VE). ....	60
Tableau IV.3 : Interaction du jumeau numérique ou de l'environnement virtuel vers l'agent humain.....	60
Tableau IV.4 : Interactions entre l'Environnement Virtuel (VE) et l'Environnement virtuel (VE). ....	61
Tableau IV.5 : Interactions entre l'Agent Humain (AH) et l'Environnement Physique (PE). ..	61
Tableau IV.6 : Interactions entre l'Environnement Virtuel (VE) et l'Environnement Physique (PE).....	61
Tableau IV.7 : Annotations numériques. ....	62

## *Liste des abréviations*

AFNOR	Association Française de Normalisation
AH	Agent Humain
AMDEC	Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité
CPS	Système Cyber-Physique
DTD	Donnée de Jumeau Numérique
FMD	Fiabilité, Maintenabilité et Disponibilité
GMAO	Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur
ISO	Organisation Internationale de Normalisation
JN	Jumeau Numérique
OME	Élément Observable de Fabrication
OT	Ordre de Travail
PE	Environnement Physique
VE	Environnement Virtuel

# **Introduction générale**

## Introduction générale

À l'ère de la transition numérique, l'évolution constante des technologies transforme profondément la manière dont les entreprises et la société interagissent avec leur environnement. Cette transformation s'accompagne d'une série de transitions numériques touchant divers aspects des activités commerciales et sociétales, allant de l'informatique au matériel, des produits aux processus, et des systèmes aux relations humaines. Au cœur de cette révolution numérique se trouve l'industrie 4.0, une ère de progrès technologiques majeurs qui redéfinit la production et les chaînes d'approvisionnement.

Le jumeau numérique, en tant qu'innovation émergente, joue un rôle central dans cette transformation numérique. Il représente une représentation virtuelle d'objets, de processus ou de systèmes réels, offrant des possibilités de modélisation, de surveillance et d'optimisation en temps réel. Le déploiement réussi du jumeau numérique nécessite un cadre solide et une compréhension approfondie de ses mécanismes internes. C'est dans cette optique que ce mémoire se penche sur les divers aspects du jumeau numérique à travers quatre chapitres distincts, chacun mettant en lumière une dimension essentielle de cette technologie révolutionnaire.

Le premier chapitre jettera les bases en examinant le rôle fondamental du jumeau numérique dans le contexte de la transition numérique. Nous analyserons comment cette technologie contribue à la gestion du changement au sein des organisations, en favorisant une culture d'entreprise axée sur le numérique. Notre objectif est de démontrer comment le jumeau numérique peut servir de catalyseur pour la transformation numérique, en permettant aux entreprises de s'adapter aux changements stratégiques, de restructurer leurs processus et de réinventer leur organisation.

Le deuxième chapitre se consacre à l'impératif de disposer de formalismes rigoureux et résilients, essentiels pour permettre le développement et la mise en place à grande échelle de la technologie des jumeaux numériques. Cette nécessité n'a pas échappé à la vigilance de la communauté scientifique, qui a engagé des efforts significatifs dans cette direction. Ces efforts ont abouti à des contributions variées, chacune ciblant des défis scientifiques et techniques spécifiques. Au cœur de ce chapitre, nous mettons en avant les principaux travaux contribuant à cet objectif essentiel. Nous mettons particulièrement en lumière leur complémentarité, en insistant sur une méthodologie générique pour le déploiement efficace des jumeaux numériques. Cette méthodologie repose sur une base solide et se révèle d'une importance capitale dans l'établissement de normes pour l'utilisation et la mise en œuvre optimale de ces technologies.

Le troisième chapitre plongera dans l'aspect crucial de la modélisation du cycle de vie des données du jumeau numérique. Nous mettrons en évidence l'importance capitale de cette modélisation pour garantir la qualité et la pertinence des données utilisées dans le jumeau numérique. En outre, nous explorerons comment cette modélisation permet une interaction plus efficace entre le jumeau numérique et l'agent humain, un élément essentiel de la manière dont ces systèmes opèrent. Une étude de cas servira de base pour illustrer ces concepts et démontrer leur application pratique.

Enfin, le quatrième chapitre sera dédié à l'analyse approfondie des interactions complexes du jumeau numérique avec les environnements : physique, virtuel et social. Nous détaillerons comment le jumeau numérique évolue au fil de son cycle de vie en interagissant avec ces trois environnements distincts. À l'aide d'une étude de cas spécifique, nous montrerons comment le jumeau numérique peut s'adapter et répondre aux défis changeants de son environnement pour offrir une réelle valeur ajoutée

# **I. Chapitre 1**

## **Généralités sur le jumeau numérique**

### **I.1 Introduction**

La transition numérique a révolutionné le paysage commercial et sociétal, propulsant les entreprises vers un modèle axé sur le numérique. Ce processus complexe, composé de plusieurs phases interdépendantes, vise à préparer les organisations à prospérer dans l'environnement numérique en constante évolution. Selon (*Gerrit et al., 2016*), cette transition implique une gestion du changement stratégique à un niveau hiérarchique élevé, la restructuration des processus et de l'organisation, ainsi que la promotion d'une culture d'entreprise orientée vers le numérique.

Dans ce contexte, différentes formes de transition numérique ont émergé, touchant divers aspects des activités commerciales et de la société. Parmi elles, on trouve la transition du matériel informatique, du logiciel, de la communication, du commerce, des relations, des produits, des humains et de la société. Chaque transition a un impact significatif sur la manière dont les organisations fonctionnent et interagissent avec leur environnement.

Parallèlement, l'avènement de l'industrie 4.0 s'est imposé comme un catalyseur clé de la transition numérique. Cette nouvelle ère industrielle repose sur des concepts novateurs tels que le big data, la réalité virtuelle et l'Internet industriel des objets, transformant les processus de production et les chaînes d'approvisionnement traditionnelles. L'industrie 4.0 offre un potentiel considérable pour améliorer l'efficacité, la flexibilité et l'innovation dans le domaine manufacturier.

Dans cette perspective, le jumeau numérique se positionne comme une innovation prometteuse, apportant de nouvelles perspectives à la transition numérique. En tant que représentation virtuelle d'un objet, d'un processus ou d'un système réel, le jumeau numérique permet de modéliser, de surveiller et d'optimiser en temps réel les performances et les interactions. En comparaison avec les systèmes cyber physiques, le jumeau numérique se concentre davantage sur la représentation et la simulation, offrant ainsi de nouvelles opportunités pour l'innovation et l'amélioration continue.

Au-delà de ses applications potentielles, le jumeau numérique trouve sa place dans divers domaines, tels que la santé 4.0, les villes intelligentes et les bâtiments 4.0. Ces domaines d'application illustrent l'ampleur des possibilités offertes par le jumeau numérique pour transformer notre façon de vivre, de travailler et d'interagir avec notre environnement.

Ce chapitre explorera en profondeur les fondements du jumeau numérique dans la transition numérique, en mettant l'accent sur son rôle essentiel dans la gestion du changement, sa comparaison avec les systèmes cyber physiques, ainsi que ses applications concrètes dans divers secteurs. En fournissant une compréhension approfondie de ces concepts, ce chapitre contribuera à l'avancement des connaissances dans le domaine du jumeau numérique et à l'élaboration de stratégies efficaces pour les organisations confrontées à la transition numérique.

### **I.2 Transition numérique**

Selon (*Gerrit et al., 2016*), la transformation numérique est un processus graduel de mise en œuvre de six phases visant à préparer une entreprise à migrer vers un modèle commercial axé sur le numérique. Ces phases englobent la gestion du changement à un niveau hiérarchique élevé, la restructuration des processus et de l'organisation, la promotion d'une culture d'entreprise orientée vers le numérique, ainsi que la transition d'une approche centrée sur les bénéfices à une vision globale de l'entreprise. L'objectif ultime est de maximiser les revenus générés par le commerce multi-canal tout en optimisant l'efficacité des coûts liés à la

distribution et au marketing. Cette transformation requiert une prise de conscience stratégique de la part de la direction, des ajustements organisationnels, des formations adaptées et une révision des modèles de rémunération des employés.

### **I.2.1 Types (Stark, 2020)**

Afin de saisir pleinement l'ampleur de cette transition majeure, il est essentiel d'effectuer une analyse concise des différentes catégories de transition numérique qui se sont développées au fil du temps. Ces catégories englobent une vaste gamme de domaines, allant des infrastructures matérielles aux dynamiques interpersonnelles. La transition numérique a engendré d'importants changements dans les secteurs de l'informatique, des communications, du commerce, des relations humaines, des produits, de la société et de l'industrie. Elle a conduit à des avancées technologiques majeures, de la miniaturisation des ordinateurs à l'émergence de produits connectés à l'Internet des objets. En outre, la transition numérique a également eu un impact sur les individus, entraînant l'émergence de nouvelles formes de relations, de cyborgs et d'implications sociétales à grande échelle.

- **Transition numérique du matériel informatique**

La transformation numérique du matériel informatique s'est déroulée en deux phases essentielles. La première, survenue dans les années 1950, a marqué la transition des ordinateurs analogiques aux ordinateurs numériques, bouleversant ainsi le paysage technologique de l'époque.

La seconde transformation a été celle de la miniaturisation des ordinateurs. Les imposants ordinateurs numériques transistorisés des années 1950 ont progressivement cédé la place aux mini-ordinateurs des années 1960, qui, bien que de taille réduite par rapport à leurs prédécesseurs, demeuraient encore relativement imposants. Les années 1980 ont été témoins d'une nouvelle réduction de taille avec l'apparition des ordinateurs de bureau, surpassant ainsi les mini-ordinateurs en termes de compacité. Enfin, les années 2010 ont introduit une nouvelle ère avec l'émergence des smartphones, caractérisés par leur format encore plus réduit.

Cette transformation remarquable a été rendue possible grâce à l'utilisation de circuits intégrés de plus en plus petits, qui ont permis d'atteindre des niveaux de miniaturisation jamais imaginés auparavant.

- **Transition numérique du logiciel**

La transformation numérique du logiciel a également engendré des évolutions significatives. Au cours des années 1960, il était courant que les organisations fassent appel à des programmeurs pour rédiger le code de leurs programmes. Toutefois, dès les années 1970, les premiers logiciels commerciaux ont commencé à émerger dans certains domaines spécifiques.

L'avènement des années 1990 a marqué une véritable explosion de l'offre logicielle, avec une multiplication des solutions disponibles dans une multitude de secteurs d'activité. Cette expansion s'est poursuivie jusqu'aux années 2010, où l'on a assisté à l'émergence de logiciels spécifiquement conçus pour répondre aux besoins de l'industrie dans divers domaines.

- **Transition numérique de la communication**

La transformation numérique de la communication a été profondément façonnée par l'avènement d'Internet et du World Wide Web. Internet a révolutionné les interactions en permettant des discussions en ligne et l'échange d'e-mails, qui ont largement supplanté l'envoi traditionnel de lettres par courrier postal. De même, le World Wide Web, avec son vaste éventail

de sites web, blogs et plateformes de réseaux sociaux tels que Twitter, a engendré une transformation majeure des canaux de communication.

Cette transformation s'est caractérisée par la substitution progressive des médias traditionnels tels que les journaux et les magazines imprimés par des publications en ligne accessibles à tous. Le World Wide Web a également émergé comme un concurrent sérieux pour les canaux de diffusion plus classiques tels que la radio et la télévision. Cette évolution a été favorisée par la facilité d'accès aux informations, la rapidité de la diffusion des nouvelles et la possibilité d'interaction directe entre les individus grâce aux commentaires, aux partages et aux échanges en ligne.

- **Transition numérique du commerce**

Autrefois, la vente de produits et de services était principalement réalisée au travers d'établissements physiques. Toutefois, une transformation numérique majeure a engendré un bouleversement des pratiques commerciales. De nos jours, tant les particuliers que les entreprises se tournent massivement vers les canaux électroniques, tels que le World Wide Web et Internet, pour effectuer leurs transactions commerciales. Des plateformes renommées telles que AirBnB, Amazon, eBay et Uber offrent désormais un cadre virtuel permettant l'achat et la vente de biens et de services.

L'évolution de la monétisation des services a également été influencée par cette transformation numérique. Des solutions telles que PayPal ont simplifié les transferts monétaires en ligne, renforçant ainsi l'efficacité et la sécurité des opérations commerciales. Parallèlement, la publicité en ligne s'est imposée comme une méthode privilégiée pour générer des revenus grâce aux services numériques. Des acteurs majeurs tels que Google et YouTube ont exploité ces plateformes pour offrir des opportunités de publicité en ligne, permettant aux annonceurs d'atteindre des audiences ciblées et aux utilisateurs d'accéder à un contenu pertinent.

- **Transition numérique des relations**

Par le passé, les relations humaines impliquaient généralement un contact physique ou vocal. Cependant, la transformation numérique a introduit de nouveaux modes de connexion. Aujourd'hui, de nombreuses relations se forment en ligne via des plateformes telles que Facebook, LinkedIn et Tinder. Cette évolution soulève des questions sur l'authenticité et la profondeur de ces relations virtuelles, ainsi que sur la protection de la vie privée et la sécurité des données. Néanmoins, cette transformation offre de nouvelles perspectives et opportunités pour la communication et l'interaction sociale.

- **Transition numérique des produits**

Au cours de la première moitié du XXe siècle, les produits étaient dépourvus de tout élément électronique et logiciel. Cependant, une transformation numérique majeure s'est produite, façonnant l'évolution des produits tels que nous les connaissons aujourd'hui. L'introduction de composants électroniques a permis une intégration progressive de fonctionnalités avancées, tandis que l'incorporation de logiciels embarqués a ouvert de nouvelles perspectives en termes de contrôle et de programmation des produits.

Cette évolution s'est poursuivie avec l'émergence de produits robotiques et intelligents, qui sont capables d'effectuer des tâches complexes de manière autonome. De plus, la connectivité croissante des produits à l'Internet des objets a permis une intercommunication en temps réel, facilitant ainsi l'échange de données et l'interaction avec les utilisateurs.

- **Transition numérique des humains**

À la fin des années 1950, une étape révolutionnaire a été franchie avec l'implantation du premier pacemaker artificiel, marquant ainsi le début d'une transformation numérique significative chez les êtres humains. Depuis lors, un nombre croissant d'individus ont embrassé leur statut de "cyborgs", fusionnant harmonieusement avec des technologies électroniques et numériques pour améliorer leurs capacités physiologiques et fonctionnelles.

- **Transition numérique de la société**

Les évolutions numériques susmentionnées ont engendré une profonde transformation numérique de la société à travers tous les secteurs, incluant notamment le gouvernement, la planification urbaine, l'éducation, le transport, la santé, les services financiers, le commerce de détail, l'édition, les arts, les médias, la recherche, les loisirs et l'industrie manufacturière.

Ces transformations numériques ont remodelé la manière dont les institutions gouvernementales fonctionnent et interagissent avec les citoyens, en adoptant des technologies numériques pour améliorer l'efficacité des services publics, faciliter l'accès à l'information et renforcer la participation citoyenne.

Dans le domaine de la planification urbaine, les progrès numériques ont favorisé l'émergence de méthodes plus sophistiquées et pérennes en matière de gestion urbaine. Cette évolution numérique a engendré des répercussions considérables quant aux modalités d'interaction, de collaboration et de communication entre les résidents, les parties prenantes et les autorités municipales. De plus, elle a mis en évidence l'interdépendance des divers systèmes d'information et processus nécessaires à la prestation de services efficaces (*Bokolo, 2020*).

La transformation numérique dans l'éducation a révolutionné les méthodes d'enseignement et d'apprentissage. Les technologies numériques offrent des opportunités d'éducation à distance, de collaboration en ligne et de personnalisation de l'enseignement. Les ressources éducatives sont accessibles à distance, élargissant les possibilités d'apprentissage. La collaboration en ligne facilite les échanges entre étudiants, enseignants et experts, favorisant la construction de connaissances collectives. Les contenus et méthodes pédagogiques peuvent être adaptés aux besoins individuels, favorisant l'engagement et la motivation des étudiants. Dans l'ensemble, les technologies numériques jouent un rôle essentiel dans la promotion de l'apprentissage continu, de la collaboration mondiale et de l'adaptation des pratiques éducatives à l'époque moderne (*Akour, 2022*).

La transition numérique a profondément transformé le secteur des transports, en introduisant des avancées technologiques telles que les solutions de transport intelligentes et les véhicules autonomes. Ces innovations ont révolutionné la gestion des flux de trafic en permettant une optimisation basée sur les données en temps réel.

Grâce à la transition numérique, les entreprises de transport peuvent désormais exploiter les données pour améliorer l'efficacité opérationnelle, réduire les temps de trajet et offrir des services plus personnalisés aux utilisateurs. Les technologies numériques ont également permis de développer de nouvelles formes de mobilité, telles que les services de covoiturage et les plateformes de réservation en ligne (*Toymentseva et al., 2021*).

La transition numérique a profondément impacté le domaine de la santé en offrant des avancées majeures. Grâce à la gestion améliorée des dossiers médicaux électroniques, les professionnels de la santé peuvent désormais accéder rapidement et facilement aux informations essentielles des patients, ce qui facilite les diagnostics précis. L'analyse des données médicales permet une compréhension approfondie des tendances et des modèles,

permettant ainsi d'identifier plus précisément les maladies, de prédire les risques et de prendre des décisions éclairées sur les traitements.

De plus, la transformation numérique a favorisé l'émergence des soins de santé à distance. Grâce aux technologies de communication et de télémédecine, les patients peuvent bénéficier de consultations et de suivis médicaux à distance, ce qui réduit les barrières géographiques et améliore l'accessibilité aux soins. Cela permet également d'optimiser l'utilisation des ressources médicales et de réduire les délais d'attente pour les patients (*Kozak et al., 2018*).

Les progrès technologiques dans le secteur financier ont engendré une transformation majeure des services bancaires grâce à la mise en place de transactions sécurisées en ligne, de paiements mobiles et à l'adoption de technologies de blockchain. Ces avancées technologiques ont grandement simplifié les opérations financières, offrant ainsi des services bancaires plus rapides, pratiques et accessibles à distance. L'utilisation de la technologie de blockchain a permis de sécuriser, de rendre transparentes et vérifiables les transactions financières, renforçant ainsi la confiance des utilisateurs dans ces opérations.

De plus, les paiements mobiles ont simplifié les transactions en permettant aux utilisateurs d'effectuer des paiements instantanés à partir de leurs appareils mobiles. En combinant ces avancées, la transformation numérique a profondément modifié la façon dont les services financiers sont offerts, créant de nouvelles opportunités tant pour les consommateurs que pour les entreprises. (*Jialong et al., 2021*).

- **Transition numérique de l'industrie**

Dans la perspective de Stark (*Stark, 2020*), la transition numérique est une conceptualisation qui décrit le processus par lequel une organisation industrielle, qu'elle soit partielle ou globale, se transforme en utilisant des technologies numériques spécifiques, voire multiples, dans le but d'améliorer ses activités. Cette évolution implique l'adoption de nouvelles plateformes et infrastructures numériques, l'intégration de systèmes intelligents et connectés, ainsi que l'utilisation de l'analyse de données et d'autres avancées technologiques liées au numérique.

L'objectif essentiel de cette transition est d'optimiser les performances de l'organisation, que ce soit en termes d'efficacité opérationnelle, de qualité des produits ou services, de relation client ou encore de prise de décisions éclairées. En embrassant ces technologies numériques, l'organisation cherche à se positionner stratégiquement sur le marché, à s'adapter aux évolutions technologiques et aux attentes changeantes des clients, tout en explorant de nouvelles opportunités de croissance.

Dans la section qui suit, nous explorerons plus en détail l'impact de la transformation numérique sur l'industrie, en nous concentrant sur les principes fondamentaux de l'industrie 4.0 et les différentes facettes de cette révolution industrielle.

### **I.3 L'industrie 4.0**

Comme précédemment mentionné, la transition numérique a donné lieu à des changements profonds dans divers secteurs tels que l'urbanisme, l'éducation, les transports, la santé et la finance.

Au cours des dernières décennies, nous avons été témoins d'une révolution technologique marquée, caractérisée par une utilisation intensive des technologies de l'information et de la communication qui a transformé fondamentalement le fonctionnement des organisations et leur interaction avec leur environnement. La transition numérique a permis

une exploitation optimale du potentiel des innovations technologiques, remodelant ainsi les processus, les services et les produits dans tous les secteurs d'activité.

Cependant, parmi les domaines où l'impact de la transformation numérique est le plus significatif, l'industrie occupe une place prépondérante. L'avènement de l'industrie 4.0 marque l'émergence d'une nouvelle ère où les technologies numériques jouent un rôle central dans la production, l'automatisation et la gestion des opérations industrielles.

### **I.3.1 Définition**

L'apparition du terme "Industrie 4.0" remonte à 2011, lors de la foire industrielle Hannover Messe, où il a été introduit en tant que stratégie technologique de pointe adoptée par l'industrie allemande (*Kagermann et al., 2011*). Depuis lors, ce concept s'est progressivement répandu dans d'autres pays et a été adopté à l'échelle mondiale (*Pfeiffer, 2017*).

L'Industrie 4.0, également désignée comme la quatrième révolution industrielle, est définie comme une nouvelle manifestation de la révolution industrielle qui intègre la fusion du monde physique et du monde virtuel (*Kagermann et al., 2011*). Cette évolution est caractérisée par la convergence des technologies de l'information, des télécommunications et de la fabrication. L'Industrie 4.0 repose sur l'interconnexion accrue des systèmes de fabrication grâce à l'incorporation des technologies de l'information et de la communication (TIC), de l'Internet des objets (IoT) et des machines au sein de systèmes cyber-physiques (CPS) (*Xu et al., 2018*) (*Kagermann et al., 2013*) (*Dalenogare et al., 2018*).

Cette révolution industrielle récente présente des éléments qui, en soi, ne sont pas nécessairement nouveaux, mais leur perspective et leur approche novatrices constituent des points de distinction essentiels (*Kagermann et al., 2011*). L'Industrie 4.0 favorise la numérisation et la digitalisation des processus de fabrication, ce qui engendre des améliorations significatives en termes d'efficacité, de flexibilité et de productivité pour les secteurs industriels (*Kagermann et al., 2011*).

### **I.3.2 Principaux piliers**

Les piliers fondamentaux de l'Industrie 4.0 sont constitués de plusieurs concepts clés qui forment le socle de cette révolution industrielle. Ces piliers comprennent :

- **Big Data**

Le concept de big data s'applique à des ensembles de données volumineux, diversifiés et complexes qui influencent la prise de décision stratégique des entreprises (*Ji et Wang, 2017*) (*Seele, 2017*). Il permet d'augmenter l'avantage concurrentiel en améliorant la productivité, l'innovation et la concurrence. Les décideurs utilisent le big data pour résoudre des défis organisationnels en surveillant, mesurant et gérant de manière plus efficace. L'analyse des big data permet d'obtenir des informations sur les préférences des clients, les tendances et les corrélations (*Ji et Wang, 2017*). Cela peut être utilisé dans différents domaines, tels que la prédiction des défaillances et la réduction des dommages potentiels (*Seele, 2017*). Les entreprises qui maîtrisent le big data bénéficient d'un avantage compétitif, notamment dans leurs opérations, leur marketing et l'expérience client. La quantité de données générées par les machines, les solutions cloud et la gestion d'entreprise a considérablement augmenté, jouant un rôle clé dans la quatrième révolution industrielle (*Yin et Kaynak, 2015*).

- **Robots autonomes**

Les robots sont utilisés dans les industries manufacturières pour résoudre des tâches complexes qui ne peuvent pas être facilement résolues par un être humain. Avec la stratégie d'automatisation traditionnelle, les entreprises ne peuvent pas pleinement mettre en œuvre des

stratégies JIT (Juste-à-Temps) et des améliorations continues sans opter pour des robots autonomes. Les améliorations actuelles dans les industries rendent l'utilisation des robots moins compliquée et facilite leur utilisation. Diverses interfaces homme-robot permettent une étroite coopération entre l'utilisation des robots et le cerveau humain.

Cependant, l'utilisation de l'opérateur est également significative car elle permet la connexion avec la station sur les tâches effectuées. Par conséquent, l'opérateur fournit les informations nécessaires et contrôle le système, donnant des instructions aux robots industriels (*Hedelind et Jackson, 2011*).

L'utilisation de plus en plus de robots industriels dans les usines s'accélère avec l'Industrie 4.0. Les robots peuvent être utilisés dans plusieurs domaines tels que la production, la logistique, les activités de distribution, et peuvent être contrôlés à distance par des humains grâce à la coopération homme-robot. Plusieurs nouvelles technologies sont introduites par les entreprises en termes de technologie robotique, telles que le Kuka LBR IIWA qui réalise des tâches sensibles sur les lieux de travail et collabore avec les humains. Ce robot a la capacité d'apprendre des collègues humains, de vérifier, d'optimiser et de documenter les tâches grâce aux systèmes cloud (*Aiman et al., 2016*).

- **Simulation**

Dans le contexte de la production, les outils de simulation jouent un rôle de soutien en favorisant un environnement de fabrication durable. Ces outils numériques permettent la conception des systèmes de production avec une capacité d'autoconfiguration, ce qui facilite une gestion efficace de l'atelier. Dans des environnements commerciaux de plus en plus compétitifs, la simulation offre la possibilité d'effectuer des ajustements dans des systèmes complexes en planifiant les opérations, en disposant des connaissances et des informations nécessaires, ainsi qu'en fournissant des estimations précises sur le système en utilisant les capacités d'ingénierie (*Weyer et al., 2016*).

Les modèles de simulation permettent également une planification stratégique, en offrant des investigations dynamiques sur les systèmes de production grâce à l'utilisation de données en temps réel. Cette approche permet d'optimiser en temps réel les opérations (*Uhlemann, 2017*).

- **Intégration horizontale et verticale**

L'intégration verticale fait référence aux systèmes flexibles et reconfigurables à l'intérieur de l'usine et à leur degré d'intégration mutuelle afin d'atteindre l'agilité.

L'intégration horizontale concerne l'intégration des partenaires au sein des chaînes d'approvisionnement. Le réseau industriel collecte des Big Data afin d'optimiser les performances du système et les transmettre dans le cloud. Ce mécanisme de coordination crée le cadre de la smart factory.

Par conséquent, les systèmes de fabrication sont conçus comme une structure auto-organisée qui intègre chaque objet physique les uns aux autres grâce à des réseaux intelligents. De plus, les systèmes basés sur le cloud permettent aux partenaires verticaux de s'intégrer mutuellement grâce à des plateformes partagées. Les flux de produits et de processus peuvent ainsi être visualisés et suivis par les membres de la chaîne d'approvisionnement (*Wang et al., 2016*).

- **Internet industriel des objets**

L'internet industriel des objets (IIoT) est une référence à la prochaine révolution technologique qui offre des solutions en matière de calcul, d'analyse, etc., en s'appuyant sur des

systèmes basés sur le cloud. L'objectif principal de l'IIoT est de connecter Internet en collectant des données à partir d'objets physiques. Ces données collectées permettent aux ordinateurs ou aux dispositifs de niveau supérieur de prendre des décisions concernant les opérations (*Rahman et Rahmani, 2017*). L'utilisation de l'IIoT permet d'améliorer l'agilité et l'intégration des opérations commerciales, tout en offrant un avantage concurrentiel au sein de la chaîne d'approvisionnement. Par conséquent, les capacités de l'IIoT au sein des entreprises joueront un rôle crucial à l'avenir, notamment en ce qui concerne l'agilité opérationnelle et la prise de décisions efficaces (*Akhtar et al., 2018*).

- **Cloud**

Le cloud computing (CC) offre de multiples avantages au paradigme des technologies de l'information et de la communication (TIC), en permettant notamment l'automatisation et l'intégration des chaînes d'approvisionnement, ainsi qu'une gestion et une administration simplifiées. Il s'agit d'une approche de virtualisation des ressources et des services, combinant un système basé sur des clients et des serveurs. Le CC met à disposition des pools de ressources informatiques offrant des capacités de stockage et de traitement dans un environnement virtuel, pour servir plusieurs utilisateurs. On distingue trois modèles de cloud computing : le logiciel en tant que service (SaaS), qui conditionne l'accès à des applications en fonction des achats des clients, tels que les systèmes ERP ; la plateforme en tant que service (PaaS), qui permet aux clients d'accéder à leurs applications via le cloud, comme les développeurs de logiciels ; et l'infrastructure en tant que service (IaaS), qui offre des fonctionnalités de stockage de base. Des exemples bien connus de systèmes cloud sont Google Drive proposé par Google, Windows Azure de Microsoft et BlueCloud d'IBM (*Candel-Haug et al., 2016*).

- **Fabrication Additive**

La Fabrication Additive, également connue sous le nom d'Impression 3D, consiste à produire des biens personnalisés en réponse aux besoins des clients. Cette technologie permet de créer des prototypes et de produire de petites séries avec moins de stock et de surproduction. Les entreprises du secteur aérospatial, par exemple, utilisent ces techniques pour réduire le poids des avions et l'utilisation de matériaux tels que le titane (*Rüßmann et al., 2015*). Des entreprises leaders telles que Google, Motorola et Apple investissent dans l'impression 3D pour accélérer leurs activités de smartphones, en offrant des avantages tels que des délais de production réduits, une personnalisation accrue et une agilité améliorée (*Conner et al., 2014*). La Fabrication Additive consiste à produire des pièces à partir de modèles 3D en utilisant des méthodes de production couche par couche, permettant ainsi une production plus efficace et adaptée (*Frazier, 2014*).

- **Réalité virtuelle**

Google a lancé les premières lunettes de réalité augmentée connues sous le nom de Google Glass, tandis que la société Magic Leap, fondée en 2011, propose des dispositifs qui ajustent la perception visuelle en convertissant les angles et la profondeur du champ lumineux (*He et al., 2017*). La réalité augmentée est une technologie interactive qui permet une intégration fluide du monde virtuel avec l'environnement réel des utilisateurs. En combinant des graphismes générés par ordinateur et des objets physiques, elle trouve de nombreuses applications. Cette technologie offre une interaction homme-machine améliorée, permettant un contrôle à distance des tâches de maintenance et offrant aux utilisateurs une inspection visuelle virtuelle. Grâce à l'utilisation de capteurs, elle permet aux utilisateurs d'exercer un contrôle précis sur les mouvements, facilitant ainsi l'accomplissement intuitif et efficace de tâches spécifiques (*He et al., 2017*).

- **Cybersécurité**

La cybersécurité revêt une importance cruciale dans le contexte des affaires, étant donné les impacts dévastateurs potentiels des attaques terroristes motivées par des intentions malveillantes. Ainsi, il est impératif de mettre en place des solutions préventives et des systèmes de défense visant à contrer les effets néfastes de tels incidents. Une approche consiste à analyser les attaques terroristes précédentes à travers un contrôle des radiations afin d'anticiper et de prévenir les attaques futures. Par ailleurs, il est primordial de développer des systèmes de défense nationaux robustes et de former les employés aux stratégies de protection contre les attaques cybernétiques. Bien que ces mesures puissent engendrer des coûts pour les entreprises, les dépenses totales attendues demeurent relativement modérées, étant donné les conséquences potentiellement dévastatrices des attaques cybernétiques (*Cho et Woo, 2017*).

Dans la continuité de la transformation numérique de l'industrie, l'Industrie 4.0 a émergé en tant que nouveau paradigme de production industrielle. Au cœur de l'Industrie 4.0 se trouvent les systèmes cyber-physiques (CPS), qui représentent une convergence puissante entre les mondes physique et numérique. Les CPS combinent des capteurs, des actuateurs, des réseaux de communication et des systèmes informatiques pour créer des environnements intelligents et interconnectés. Dans la prochaine section, nous explorerons en détail les caractéristiques, les fonctionnalités et les applications des systèmes cyber-physiques dans le contexte de l'Industrie 4.0.

### **I.4 Systèmes cyber-physiques**

L'industrie moderne est en pleine transformation grâce à l'émergence des systèmes cyber-physiques (CPS). Autrefois, l'efficacité de la production était limitée par les capacités individuelles et les contraintes géographiques. Cependant, l'avènement des nouvelles technologies de l'information telles que le cloud computing, l'Internet des objets (IoT), le big data et l'intelligence artificielle (IA) a ouvert de nouvelles possibilités. Les CPS sont une architecture innovante qui permet la convergence de l'espace physique et de l'espace virtuel, créant ainsi un écosystème où les actifs physiques sont connectés, surveillés et contrôlés en temps réel par des systèmes virtuels. Cette intégration transparente et cette fusion harmonieuse des deux espaces offrent des perspectives prometteuses pour améliorer les processus de conception, de fabrication et de service (*Tao et al., 2019*). Dans cette section, nous explorerons en détail les concepts et les applications des systèmes cyber-physiques, en mettant l'accent sur leur rôle essentiel dans la transformation de l'industrie moderne.

#### **I.4.1 Définition**

Selon (*Lee, 2008*), les systèmes cyber-physiques sont définis comme une intégration étroite entre le calcul et les processus physiques. Ces systèmes utilisent des ordinateurs intégrés et des réseaux pour surveiller et contrôler en temps réel les processus physiques. Les composants physiques et les composants de calcul interagissent à travers des boucles de rétroaction, où les résultats des calculs influencent les processus physiques et vice versa. Grâce à cette intégration étroite, les systèmes cyber-physiques sont capables d'ajuster et d'optimiser en continu leur fonctionnement en fonction des données et des conditions du monde réel.

Les systèmes cyber-physiques (CPS), selon (*Baheti et al., 2011*), représentent une nouvelle génération de systèmes qui combinent des capacités informatiques et physiques pour interagir avec les humains à travers différentes modalités. Ils élargissent les capacités du monde physique en exploitant la computation, la communication et le contrôle, ouvrant ainsi de nouvelles opportunités de développement technologique dans des domaines tels que l'aéronautique, les véhicules hybrides, la conduite autonome et les prothèses contrôlées par des signaux cérébraux. La recherche dans le domaine des CPS vise à intégrer les connaissances et

les principes d'ingénierie provenant des domaines informatiques et de l'ingénierie afin de développer de nouvelles connaissances et technologies (*Baheti et al., 2011*).

CPS sont des systèmes qui combinent étroitement les systèmes en réseau et les systèmes physiques, permettant une coordination et une collaboration avancées entre les technologies de calcul, de communication et de contrôle.

### **I.4.2 Caractéristiques**

Les systèmes cyber-physiques (CPS) engagent des interactions avec les systèmes physiques par le biais de réseaux. Le système final d'un CPS est typiquement un système informatique embarqué centralisé traditionnel, intégrant un ensemble conséquent de systèmes physiques constitués de réseaux de capteurs sans fil intelligents. Ainsi, les CPS se caractérisent par les éléments suivants (*Yang Liu et al., 2017*) :

- **Domaine physique** : Les systèmes cyber-physiques (CPS) accordent une importance primordiale au domaine physique, couvrant la conception matérielle, la gestion de l'énergie, la taille des composants matériels, l'encapsulation de la connectivité, et les tests systématiques. Les ingénieurs spécialisés dans ce domaine possèdent une connaissance approfondie des systèmes et environnements mécaniques, électroniques, biologiques et chimiques, maîtrisant les caractéristiques des capteurs et les technologies de traitement du signal. Chaque système physique présente des caractéristiques de réseau, une couverture multi-niveau optimale, des échelles spatio-temporelles complexes et une automatisation élevée.
- **Système d'information** : Le système d'information constitue le cœur des CPS, où les ingénieurs convertissent les informations des systèmes physiques en règles et modèles pour les systèmes logiciels. Ils équilibrent les systèmes en temps réel, les systèmes en réseau, les systèmes de fichiers, les systèmes de stockage hiérarchique, la gestion de la mémoire, la conception modulaire des logiciels, la conception concurrente et la vérification formelle.
- **Systèmes hétérogènes** : Les CPS sont le résultat de l'intégration de systèmes hétérogènes, combinant les systèmes d'information et les systèmes physiques avec une gestion de la synchronisation temporelle et de la localisation spatiale des composants.
- **Exigences de sécurité, de temps réel et de prévisibilité** : Les CPS répondent à des exigences de sécurité, de capacité en temps réel et de prévisibilité. En tant que systèmes ouverts, ils font face à des problèmes tels que l'intrusion, la manipulation, la contrefaçon et les attaques malveillantes, ainsi que des délais de transmission dans les réseaux. Les CPS doivent garantir la crédibilité, la sécurité, l'efficacité, le temps réel, la dynamique et la prévisibilité. La crédibilité implique l'authentification des sources d'information et des expéditeurs d'instructions de contrôle, tandis que la sécurité implique le chiffrement des informations échangées et la préservation de la confidentialité. La validité garantit l'exactitude du traitement et l'intégrité des informations, la capacité en temps réel assure la transmission en temps opportun des données, et la dynamique comprend la réorganisation automatique des règles pour répondre aux exigences des tâches. Enfin, la prévisibilité se réfère à la capacité des CPS à allouer efficacement les ressources pour satisfaire les exigences en temps réel de chaque tâche.

Les systèmes cyber-physiques jouent un rôle de premier plan dans le cadre de l'Industrie 4.0 en facilitant l'intégration harmonieuse entre le monde physique et le monde virtuel. Ils permettent une coordination avancée des technologies de calcul, de communication et de contrôle, jetant ainsi les bases nécessaires pour le développement du concept du jumeau numérique, qui sera abordé dans la section suivante. Grâce à leur capacité à créer une représentation virtuelle en temps réel des objets physiques, ces systèmes ouvrent de nouvelles

perspectives en matière de simulation, d'analyse et de prise de décision. En somme, ils offrent un potentiel considérable pour l'amélioration des processus industriels et l'exploration de nouvelles opportunités dans l'ère de l'Industrie 4.0.

### **I.5 Jumeau numérique**

Avec les avancées des nouvelles technologies de l'information (New IT), l'intégration entre les espaces physique et virtuel devient essentielle. Les systèmes cyber-physiques (CPS) permettent cette convergence en intégrant les capacités de communication et de calcul dans les actifs physiques. Néanmoins, le concept des systèmes cyber-physiques (CPS) demeure principalement de nature théorique. Le jumeau numérique (JN), en tant qu'application concrète des CPS, fournit des valeurs pratiques et des détails d'implémentation, offrant une voie pragmatique pour l'intégration et la fusion harmonieuses. Le jumeau numérique (JN) est une application concrète des systèmes cyber-physiques (CPS) qui offre une voie pragmatique pour une intégration harmonieuse. Il consiste en un modèle virtuel représentant chaque objet physique, doté de capacités d'analyse, d'évaluation, d'optimisation et de prédiction. Le JN permet une interaction synchronisée entre le modèle virtuel et l'objet physique, formant ainsi une boucle fermée. Les données provenant des deux côtés peuvent être fusionnées pour obtenir des informations plus complètes. Le JN devient de plus en plus concret en intégrant les composants clés des CPS.

#### **I.5.1 Historique**

Le concept de "jumeau" a été développé à partir du programme Apollo de la NASA, qui a construit deux véhicules spatiaux réellement identiques. L'un d'entre eux a été lancé dans l'espace pour effectuer la mission, tandis que l'autre est resté sur Terre, permettant aux ingénieurs de reproduire les conditions du véhicule lancé (*S. Boschert et al., 2016*). Selon le document de référence rédigé par (*Grieves, 2014*), le jumeau numérique a été proposé pour la première fois lors de son cours exécutif sur la gestion du cycle de vie des produits (PLM). Avec des améliorations techniques, le jumeau numérique a été introduit dans l'industrie aérospatiale par la NASA et l'US Air Force (*E.H. Glaessgen 2012*).

Au fil du temps, le concept de jumeau numérique s'est développé en différentes étapes. En 2003, Michael Grieves a proposé un modèle conceptuel comprenant une entité physique, un homologue numérique et une connexion entre les deux (*Grieves, 2014*). À cette époque, le modèle était connu sous le nom de "Modèle d'espaces miroirs". Parallèlement, en 1991, David Gelernter avait déjà imaginé un concept similaire appelé "Monde miroir", où des modèles logiciels reflètent la réalité à partir d'informations provenant du monde physique (*Gelernter, D. Mirror Worlds*). Kary Främling et ses collègues ont également proposé une architecture basée sur des agents en 2003, où chaque élément de produit avait une "contrepartie virtuelle" ou un agent associé, pour résoudre les inefficacités du transfert d'informations dans le PLM (*Främling, K. 2003*).

Cependant, à l'époque, en raison des limitations technologiques telles que la puissance de calcul limitée, la connectivité limitée à Internet, le stockage et la gestion des données, ainsi que le développement incomplet des algorithmes de machine, le jumeau numérique n'avait pas encore trouvé d'applications pratiques. En 2005, Grieves a également proposé l'idée que le jumeau numérique pouvait être classé en trois sous-types, à savoir le prototype de jumeau numérique, l'instance de jumeau numérique et l'agrégat de jumeaux numériques (*M. Grieves 2005*).

Ce n'est qu'en 2010 que le terme "Digital Twin" (DT) a été mentionné pour la première fois dans les plans de la NASA, où il était décrit comme une "simulation intégrée multi-physique, multi-échelle et probabiliste d'un véhicule ou d'un système qui utilise les meilleurs

modèles physiques disponibles, les mises à jour des capteurs, l'historique de la flotte, etc., pour refléter la vie de son double volant" (*Shafto et al., 2012*).

Par la suite, l'US Air Force a également adopté la technologie du jumeau numérique pour la conception, la maintenance et la prédiction de leurs avions (*Tuegel, E. 2013*). L'idée était d'utiliser le jumeau numérique pour simuler les propriétés physiques et mécaniques de l'avion afin de prévoir toute fatigue ou fissure dans la structure, prolongeant ainsi sa durée de vie utile restante (*Gockel, B.T. et al., 2015*). Le terme "Airframe Digital Twin" (ADT) a été utilisé pour décrire le modèle informatique gérant l'avion tout au long de son cycle de vie.

En plus de la surveillance et de la maintenance, les jumeaux numériques ont également été proposés pour l'exploration spatiale durable et les futures générations de véhicules aérospatiaux (*Glaessgen et al., 2012*). En créant des jumeaux numériques de systèmes spatiaux, les ingénieurs peuvent simuler et analyser le comportement des engins spatiaux, prédire leurs performances dans différentes conditions et optimiser la planification des missions. Cela permet une utilisation plus efficace des ressources, améliore les taux de réussite des missions et réduit les risques dans l'exploration spatiale.

Le concept de jumeaux numériques n'a cessé d'évoluer et de s'étendre. Avec l'avènement de technologies telles que l'Internet des objets (IdO), l'intelligence artificielle (IA) et l'analyse des mégadonnées, les jumeaux numériques peuvent désormais incorporer des données en temps réel des capteurs, des algorithmes d'apprentissage automatique et des analyses prédictives pour fournir des simulations encore plus précises et dynamiques (*J. Lee et al., 2013*). Cela permet une maintenance proactive, une surveillance en temps réel et une analyse prédictive des actifs physiques et des systèmes.

En 2019, (*Tao et al. 2019*) ont proposé un modèle paradigmatique visant à expliquer la technologie du jumeau numérique. Ce modèle se compose de cinq composantes principales, qui ajoutent deux éléments supplémentaires aux trois proposés précédemment par (*Grieves 2014*), afin de refléter les caractéristiques clés d'un jumeau numérique.

Actuellement, le concept de jumeaux numériques a été largement reconnu par les experts de l'industrie et les organisations de recherche. Ces dernières années, il a été cité comme l'une des principales tendances technologiques par des cabinets de recherche de premier plan tels que Gartner (*K. Panetta, 2018*) et a attiré l'attention d'associations influentes et de conférences du monde entier (*Smart Manufacturing Association of China, 2019*). Cela témoigne de l'importance croissante et de l'impact potentiel des jumeaux numériques dans le façonnement de l'avenir de diverses industries. Les travaux relatifs aux jumeaux numériques, réalisés entre 2012 et septembre 2022, ont été recensés par (*Xin Liu, 2023*), comme le démontre la figure (Figure I. 1). On peut observer sur le graphique une croissance exponentielle du nombre de documents chaque année depuis 2017, avec un nombre d'articles dépassant les 800 en 2021. Cette évolution témoigne de l'intérêt croissant et de l'ampleur des recherches consacrées aux jumeaux numériques au cours de cette période.

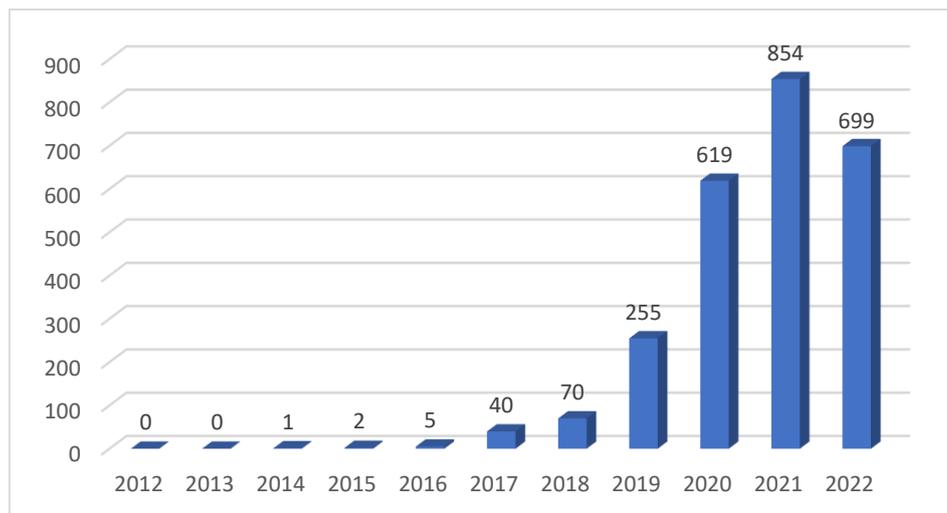


Figure I.1 : Nombre d'articles sur les jumeaux numériques publiés par an (Xin Liu, 2023).

### I.5.2 Définition

Le terme de jumeau numérique est de plus en plus couramment utilisé dans diverses communications, témoignant de la maturité des technologies permettant de concrétiser ce concept. Cependant, il existe une diversité de définitions qui ne font pas consensus, donnant lieu à une multitude de problématiques abordées. En effet, la littérature recense près d'une cinquantaine de définitions distinctes (*Julien et Martin, 2021b*). Néanmoins, le jumeau numérique peut être défini comme une représentation virtuelle interactive qui accompagne l'objet physique tout au long de son cycle de vie, offrant des fonctionnalités d'évaluation, d'optimisation, de prédiction, etc. Les définitions mettent en avant à la fois les aspects physiques et virtuels ainsi que la connexion entre eux, qui sont les éléments clés du cadre tridimensionnel du jumeau numérique. Afin de mieux comprendre cette diversité, un tableau regroupant différentes définitions a été élaboré, permettant ainsi d'appréhender les multiples facettes du jumeau numérique.

Tableau I. 1: Définition

Définition	Source	Contexte
<b>Jumeau numérique</b>	(Grieves, 2017)	« Connexion entre un "espace réel" et un "espace virtuel" grâce à l'échange de données et d'informations »
<b>Jumeau numérique</b>	(Shafto et al., 2012)	« Simulation intégrée multi-physique, multi-échelle et probabiliste d'un véhicule ou d'un système qui reproduit la vie de son jumeau volant correspondant en utilisant les meilleurs modèles physiques disponibles »
<b>Jumeau numérique</b>	Deloitte, 2017)	« Image numérique quasi en temps réel d'un objet physique ou d'un processus qui aide à optimiser les performances commerciales »
<b>Jumeau numérique</b>	(Bolton et al., 2018)	« Représentation numérique réaliste des actifs, des processus ou des systèmes dans l'environnement bâti ou naturel »

<b>Jumeau numérique</b>	(Stark et al., 2019)	« Représentation numérique d'un produit unique actif ou d'un système produit-service unique »
-------------------------	----------------------	---

### I.5.3 Jumeau numérique et CPS

Dans le dessein de procéder à une distinction entre le jumeau numérique et le système cyber-physique (CPS), une analyse des caractéristiques, des éléments fondamentaux et des avantages inhérents à chacun a été réalisée, en se basant sur les détails extraits du livre de (*Tao et al., 2019*). Cette démarche permet d'approfondir notre compréhension du rôle et de la contribution de ces deux approches dans l'optimisation des performances des systèmes physiques et virtuels.

L'étude comparative approfondie présente une vision claire et concise des différences entre le jumeau numérique et le CPS, tout en mettant en évidence leurs similitudes. Ainsi, le tableau récapitulatif qui en découle offre une synthèse organisée des informations, facilitant ainsi la compréhension des caractéristiques distinctives et communes entre le jumeau numérique et le CPS.

Tableau I. 2: Principales différences entre le JN et CPS

	<b>Jumeau numérique</b>	<b>Système cyber-physique (CPS)</b>
<b>Architecture</b>	Peut être intégré de manière intrinsèque au sein d'un système cyber-physique (CPS)	Architecture globale et interopérable, permettant l'intégration de multiples technologies et encourageant les avancées novatrices
<b>Caractéristiques</b>	Mappage cyber-physique (Mise en relation entre les entités physiques et virtuelles) Contrôle en boucle fermée (Surveillance et coordination des processus physiques et cybernétiques) Structure à trois niveaux (Niveaux d'entité, de système et de système de systèmes)	Cartographie cyber-physique (Association entre les entités physiques et virtuelles) Contrôle en boucle fermée (Surveillance et coordination efficaces des processus physiques) Structure à trois niveaux (Niveaux d'entité, de système et de système de systèmes)
<b>Éléments clés</b>	Modèles haute-fidélités (Représentations virtuelles et précises des entités physique) Données fusionnées. (Combinaison des données provenant de différents sources des données). Services à la demande (Fournis en fonction des besoins).	Capteurs, actionneurs, systèmes embarqués. Acquisition de données à grande échelle via des capteurs, traitement et analyse des données. Services à la demande.

<b>Avantage</b>	Fournit des connaissances approfondies et des perspectives plus détaillées	Intuitif et efficace
-----------------	--	----------------------

#### **I.5.4 Domaines d'application**

- **Agriculture**

Les entreprises opérant dans l'agriculture sont engagées dans la production de divers produits, notamment des cultures, du bétail, de la volaille, des poissons, des engrais, des aliments emballés, des machines agricoles. Cette industrie est soumise à une pression considérable pour accroître sa production en raison de la croissance rapide de la population mondiale et de la nécessité de répondre à la demande alimentaire croissante. Lors de la Conférence asiatique-australasienne sur l'agriculture de précision, (*Verdouw et al., 2017*) ont exploré les applications potentielles des jumeaux numériques dans divers domaines de l'agriculture, notamment l'élevage, l'apiculture, le stockage des cultures, ainsi que dans le contexte des équipements et des machines agricoles.

- **Énergie 4.0**

L'application du concept de jumeau numérique dans le domaine de l'énergie 4.0 offre des opportunités considérables pour l'optimisation des systèmes énergétiques. D'une part, comme illustré par le travail de (*Haddad, 2021*), les jumeaux numériques peuvent être déployés pour améliorer l'efficacité énergétique des systèmes de refroidissement. Cette innovation permet de minimiser les émissions de réfrigérant dans l'environnement et de détecter en temps réel les fuites potentielles, conduisant ainsi à des avantages significatifs en matière de durabilité environnementale et d'efficacité opérationnelle. En surveillant constamment l'état des systèmes de refroidissement et en anticipant les problèmes, cette approche contribue à réduire l'impact environnemental tout en améliorant les performances globales.

D'autre part, dans le contexte de la transition vers des réseaux électriques plus intelligents, le jumeau numérique joue également un rôle clé. Comme en témoigne l'étude menée par l'équipe de (*Yan et al., 2022*), les jumeaux numériques ont été appliqués avec succès aux centrales de pompage-turbinage, une technologie majeure de stockage d'énergie. Cette fusion innovante entre le modèle d'information du bâtiment et les technologies des systèmes d'information géographique a donné naissance à des jumeaux numériques spécifiques à chaque centrale. Ces jumeaux numériques fournissent une assistance technique précieuse pour la conception et la construction intelligentes de ces installations complexes. Ainsi, le jumeau numérique joue un rôle essentiel dans la création de systèmes énergétiques innovants et dans la réalisation de l'objectif ambitieux de neutralité carbone, ouvrant la voie à une gestion énergétique plus intelligente et durable.

- **Réseau d'irrigation**

En raison de la croissance mondiale de la population, la gestion de l'eau, y compris son stockage et sa distribution, devient de plus en plus cruciale, en particulier dans le secteur agricole. Cette nécessité peut être satisfaite grâce à la mise en place d'un système d'irrigation

collectif (*Cunha et al., 2019*). En combinant un jumeau numérique des systèmes d'eau avec l'utilisation de mégadonnées, il est envisageable de réduire les incertitudes et les risques associés à la gestion de l'eau, tout en analysant les modèles de consommation et en optimisant les opérations (*Pesantez et al., 2022*). De plus, dans un contexte d'irrigation collective, l'amélioration de l'efficacité de l'utilisation de l'eau peut contribuer à minimiser les pertes. Dans cette optique, un concept de jumeau numérique a été élaboré grâce à des essais pratiques réalisés sur le terrain et en laboratoire, dans le cadre d'un réseau d'irrigation collectif. Cette démarche visait à évaluer différents aspects, tels que la consommation énergétique, les installations de pompage, les pertes d'eau, ainsi que l'efficacité globale de l'utilisation de l'eau (*Moreira et al., 2021*).

- **Santé 4.0**

La révolution numérique a ouvert de nouvelles perspectives dans le domaine de la santé, et l'intégration des technologies de l'industrie 4.0 a donné naissance au concept de Santé 4.0 (H4.0). Ce terme englobe la capacité de personnaliser les soins de santé en temps réel, tant pour les patients que pour les professionnels de la santé et les aidants (*Hamzaoui et al., 2022*).

La reconnaissance des émotions dans le domaine de la santé a captivé l'attention, grâce aux récents progrès dans le domaine de l'apprentissage automatique et des techniques d'apprentissage en profondeur. L'intégration de systèmes de reconnaissance des émotions avec des jumeaux numériques en temps réel ouvre la voie à une surveillance plus efficace, à une meilleure compréhension et à l'amélioration des capacités physiques, tout en contribuant de manière continue à l'amélioration de la qualité de vie et du bien-être dans le contexte des soins de santé personnalisés. De plus, une approche globale a été proposée, combinant un système de reconnaissance des émotions avec une configuration de jumeau numérique, offrant ainsi la possibilité de prédire et de tester les résultats avant de fournir le traitement de santé personnel optimal, comme le suggèrent les travaux de (*Subramanian et al., 2022*).

En radiologie, un jumeau numérique d'un dispositif radiologique peut être déployé pour évaluer ses caractéristiques, apporter des modifications à sa conception ou à ses matériaux, et évaluer l'impact de ces changements dans un environnement virtuel. Des avancées technologiques telles que l'intelligence artificielle et les sciences ohmiques peuvent être exploitées pour créer des jumeaux numériques pour les patients, qui peuvent être constamment actualisés en fonction des données de santé et du mode de vie en temps réel. Cette approche pourrait contribuer à améliorer la médecine personnalisée. Par ailleurs, la création de jumeaux numériques basés sur des données de déploiements réels pourrait ouvrir la voie à l'utilisation de vastes populations virtuelles de patients pour des essais cliniques virtuels et des études de population. Les jumeaux numériques ont le potentiel de transformer la détection et la gestion des maladies, mais il subsiste d'importants défis à relever dans leur développement, comme le soulignent les travaux de (*Pesapen et al., 2022*). Les radiologues pourraient jouer un rôle crucial dans l'introduction de cette technologie dans le domaine de la santé à mesure qu'elle évolue.

- **Villes intelligentes**

Une ville intelligente se distingue par l'utilisation stratégique des technologies de l'information et de la communication pour une gestion efficace. Elle collecte, analyse, et

intègre habilement les données clés des systèmes essentiels, prenant ainsi des décisions éclairées pour répondre aux divers besoins de la cité, qu'il s'agisse de la qualité de vie au quotidien, de la préservation de l'environnement, de la sécurité publique, des services urbains, des activités industrielles et commerciales, entre autres (*Su et al., 2011*). Dans cette perspective, les jumeaux numériques trouvent également leur place dans la planification urbaine des villes intelligentes, contribuant à l'amélioration du bien-être des citoyens.

Un exemple concret de cette application des jumeaux numériques est illustré par l'étude menée par (*Dembski et al., 2020*) à Herrenberg, en Allemagne, dans le domaine de l'urbanisme. Dans ce cas, le jumeau numérique représente la ville de manière virtuelle et résout divers problèmes liés à la mobilité urbaine, à la qualité de l'air, ainsi qu'à la prise de décision publique. Son utilisation permet de surveiller en temps réel les systèmes de transport, facilite la communication entre les experts et les citoyens, et promeut l'accès ouvert aux données urbaines. Le but ultime est de favoriser le développement urbain durable, en harmonie avec les besoins de la communauté.

### **I.6 Conclusion**

Ce chapitre a été le théâtre d'une exploration approfondie de l'importance prépondérante du jumeau numérique au sein du contexte de la transition numérique. En qualité de représentation virtuelle novatrice, douée de la capacité à élaborer des modèles précis et à exécuter des simulations en temps réel, le jumeau numérique se positionne en tant que moteur incontournable propulsant l'innovation continue et l'amélioration permanente. Son éventail d'applications pertinent s'étend du domaine médical jusqu'aux villes intelligentes, engendrant ainsi une transformation d'envergure de nos interactions et des structures sous-tendant nos sphères sociétales et commerciales.

Toutefois, l'établissement de normes et de modèles communs pour assurer un fonctionnement optimal et une intégration harmonieuse de ces technologies au sein d'un environnement numérique de plus en plus complexe représente également un défi de taille. C'est à cet égard que le deuxième chapitre sera dédié à une revue minutieuse de la littérature concernant la clarification des concepts liés au jumeau numérique et au développement de formalismes précis pour encadrer cette technologie.

**II. Chapitre 2**  
**Revue de la littérature**  
**sur le jumeau numérique**

## II.1 Introduction

Le jumeau numérique, en tant que technologie émergente résultant de la révolution numérique, a attiré l'attention dans divers domaines de l'ingénierie (*Gartner, 2019*). Pour assurer le développement et le déploiement à grande échelle de cette technologie, il est impératif de disposer d'un cadre formel solide, ce qui a conduit à des recherches approfondies dans plusieurs domaines clés.

La première revue examine le jumeau numérique lui-même, se concentrant sur les approches méthodologiques adoptées pour son développement et sa mise en œuvre (*Julien et Martin, 2021b*). Une méthodologie générique a été proposée, basée sur l'architecture CPS 5C, mettant l'accent sur l'identification précoce des besoins dictés par les usages (*Julien et Martin, 2021a*). Cette approche offre un cadre formel solide qui reste indépendant de l'application finale du jumeau numérique.

La deuxième revue se penche sur le cycle de vie des données dans le contexte du jumeau numérique. Une gestion efficace de ce cycle de vie est essentielle pour garantir la qualité et la pertinence des données utilisées. Cependant, le manque de standardisation des modèles de données existants nécessite des recherches supplémentaires pour développer des méthodes standardisées et efficaces de modélisation du cycle de vie des données.

## II.2 Etat de l'art sur les jumeaux numériques

La nécessité impérieuse de disposer de formalismes rigoureux et robustes pour le développement et le déploiement de la technologie jumeau numérique à grande échelle a été un sujet abordé par divers chercheurs. Ces travaux ont été discutés en détail dans le chapitre X de livre de (*Hamzaoui et Julien, 2023*), où l'importance de cette exigence a été soulignée et analysée en profondeur. Ces contributions ont été axées sur la résolution de verrous scientifiques et techniques spécifiques, chacune apportant sa pierre à l'édifice de la formalisation du jumeau numérique. Dans cette section, nous mettrons en lumière les principales contributions de ces travaux et leur rôle complémentaire dans l'élaboration d'un cadre formel robuste pour le jumeau numérique.

### II.2.1 Le modèle à cinq dimensions

L'un des modèles les plus robustes formalisant le jumeau numérique est celui proposé par (*Tao et al., 2019*), et communément appelé le modèle 5D. Ceci, en référence au fait de décrire le jumeau numérique en le décomposant en 5 dimensions différentes, ajoutant donc deux éléments supplémentaires aux trois proposés par (*Grieves, 2014*) (élément physique, élément virtuel, données et informations). Dans le modèle 5D, on retrouve donc les éléments « Services » et « Connexions » comme dimensions supplémentaires, comme illustré dans la Figure (Figure II. 1)

Le modèle 5D offre une approche holistique pour la création et l'exploitation du jumeau numérique, en utilisant cinq dimensions distinctes Eq. (1). Chacune de ces dimensions joue un rôle spécifique et interconnecté dans la construction et la compréhension du jumeau numérique. Une description détaillée de chaque dimension est fournie dans l'étude de référence (*Tao et al., 2019*). Pour une meilleure compréhension du modèle, il convient de présenter une synthèse conséquente de chaque dimension :

$$M_{DT} = (PE, VE, S_s, DD, CN) \quad (1)$$

Entité Physique (PE) : Cette dimension représente une entité physique existant dans le monde réel. Il peut s'agir d'une machine, d'un équipement, d'un produit ou de tout autre objet physique qui est modélisé et connecté au jumeau numérique.

Entité Virtuelle (VE) : La dimension de l'Entité Virtuelle se compose d'une collection de modèles qui représentent l'entité physique dans le monde virtuel. Ces modèles capturent les caractéristiques, les comportements et les attributs de l'entité physique, permettant ainsi de simuler et de manipuler virtuellement cette dernière.

Service Système (SS) : Le Service Système est un service fourni à la fois par l'entité physique et l'entité virtuelle. Il s'agit des fonctionnalités et des capacités offertes par le jumeau numérique, telles que la surveillance en temps réel, la prédiction des performances, la maintenance prédictive, etc.

Données (DD) : La dimension des Données fait référence à l'ensemble des informations et des données qui constituent le jumeau numérique. Ces données sont collectées, stockées, traitées et utilisées pour alimenter les différents modèles et les fonctionnalités du jumeau numérique.

Connexions (CN) : Les Connexions représentent les liens et les interactions entre les différentes parties du jumeau numérique. Cela peut inclure les relations entre les entités physiques et virtuelles, les interactions entre les modèles, ainsi que les flux d'informations et de données entre les différents composants du jumeau numérique.

Ces cinq dimensions interagissent de manière synergique pour créer et exploiter le jumeau numérique, fournissant ainsi une représentation complète et dynamique de l'entité physique dans le monde virtuel (Tao et al., 2019).

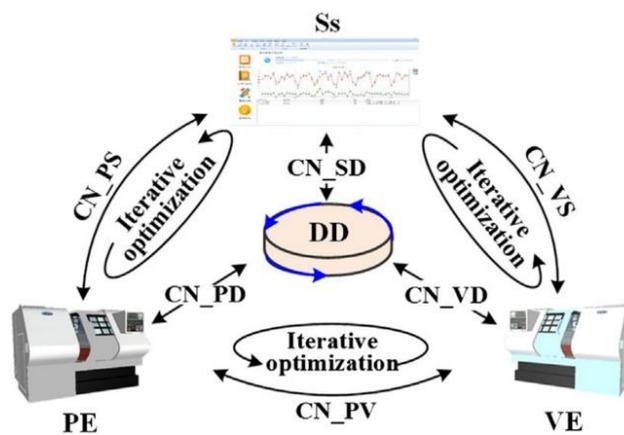


Figure II.1 : Le modèle 5D du jumeau numérique (Tao et al.,2019).

Dans (Tao et al., 2019), le jumeau numérique est comparé au corps humain, de la sorte, le PE agit comme un "squelette" qui prend en charge le JN. En tant que "cœur" du système, le VE agit comme une "pompe" qui alimente les résultats et les techniques de simulation vers d'autres composants.

La dimension SS représente quant à elle un "organe sensoriel" qui parle directement à l'utilisateur. L'élément DD est le "sang" qui alimente en permanence le JN en informations vitales. En conséquence, les connexions CN agissent comme un "conduit sanguin" transmettant des informations.

## **II.2.2 ISO 23247 - Cadre de jumeau numérique pour la fabrication**

Les initiatives visant à formaliser et normaliser le concept de jumeau numérique ont été menées par diverses organisations, parmi lesquelles l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO) occupe une place prépondérante. À cet égard, l'ISO a récemment publié la norme ISO 23247 (*International Organization for Standardization, 2021*), qui représente une étape cruciale dans le développement et l'utilisation efficace des jumeaux numériques au sein des environnements industriels.

La norme ISO 23247 est articulée en quatre parties distinctes, chacune fournissant des directives spécifiques pour la création et l'application des jumeaux numériques dans des contextes d'utilisation définis. Elle propose une terminologie précise et une nomenclature claire, facilitant ainsi la communication cohérente et la diffusion efficace de l'information entre les parties prenantes impliquées dans les projets de jumeaux numériques.

En outre, cette norme propose une architecture cohérente et structurée pour la conception et la mise en œuvre des jumeaux numériques, favorisant leur intégration harmonieuse dans les processus industriels. Elle offre également des directives pour l'analyse des besoins en modélisation, la délimitation des objectifs et du champ d'application, ainsi que pour la réutilisation des données communes et des composants du modèle.

En adoptant la norme ISO 23247, les organisations peuvent bénéficier d'un cadre solide pour développer leurs jumeaux numériques, garantissant ainsi la compatibilité, l'interopérabilité et la cohérence des pratiques. Cela facilite la collaboration entre les différentes parties prenantes et encourage l'échange d'expériences et de bonnes pratiques dans le domaine des jumeaux numériques.

## **II.2.3 Le tableau périodique des capacités**

Dans un registre plus bas niveau, en d'autres termes, qui s'intéresse plus aux technologies mises en jeu pour le développement du JN qu'aux définitions et formalismes ou architectures et modèles. Nous trouvons le tableau périodique des capacités du jumeau numérique (*Pieter, 2022*), proposé par le Digital Twin Consortium.

Cet outil vise à aider les organisations à concevoir, développer, déployer et exploiter des jumeaux numériques en fonction des exigences de capacités de cas d'utilisation spécifiques, plutôt que de s'appuyer sur les fonctionnalités des solutions technologiques.

Le CPT (*Capabilities Periodic Table*) utilise une architecture et un cadre de définition des exigences indépendant de la technologie pour définir les exigences des cas d'utilisation individuels, qui peuvent ensuite être agrégées pour déterminer les exigences globales en matière de capacité, d'architecture du jumeau numérique, ainsi que des solutions technologiques nécessaires pour répondre aux besoins spécifiques de l'entreprise.

Les travaux mentionnés ci-dessus traitent des définitions des concepts et formalismes autour du jumeau numérique suivant des approches et angles de perception différents. Le modèle 5D définit les composants élémentaires du JN ainsi que leurs interconnexions, la norme ISO 23247 offre un cadre de base pour la construction de JN dans un environnement industriel, alors que le CPT vient apporter une dimension plus opérationnelle avec une approche par fonctionnalité et capacités du JN.

Cependant, bien que nécessaires, voire cruciaux, ces formalismes ne sont pas suffisants s'ils ne sont pas intégrés dans une méthodologie générique de développement et de déploiement du jumeau numérique.

## II.2.4 Une méthodologie générique de développement et de déploiement

Comme évoqué plus haut, la mise en place d'une méthodologie générique pour le développement et le déploiement du JN, qui ne soit pas dictée par l'application finale du jumeau (industrie, santé, bâtiment, transport, etc.), et qui soit indépendante des technologies utilisées, est une nécessité.

Dans ce sens, (*Julien et Martin, 2021b*) ont proposé une méthodologie se déclinant en cinq étapes (Figure II.2) basée sur l'architecture CPS 5C établie par (*Lee et al., 2015*). Cette dernière se présentant selon une approche top-down donne une grande importance à l'identification des besoins dictés par les usages pendant les premières étapes du développement du JN (*Julien et Martin, 2021a*).

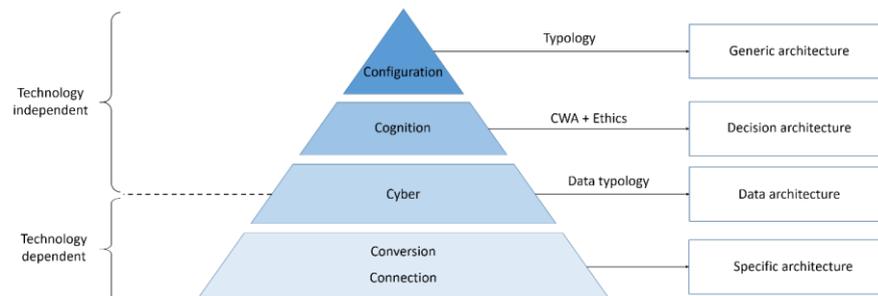


Figure II.2 : Méthodologie en 5C pour le déploiement du jumeau numérique (Hamzaoui et Julien, 2023).

Cette méthodologie se présente donc en cinq étapes distinctes, les deux premières d'entre elles étant indépendantes de la technologie, alors que les deux dernières en sont dépendantes. La troisième étape étant particulière, car servant d'une étape charnière. Elle fera objet d'une analyse détaillée dans le chapitre 3, en se référant à la littérature pertinente. Décrivons néanmoins en quoi consiste chacune des étapes :

### II.2.4.1 Configuration

Afin d'aider les concepteurs du JN à développer une architecture initiale générique, des propriétés clés doivent être définies en suivant concisément une « Typologie » constituée en 13 critères (*Hamzaoui et Julien, 2023*). Ici, il s'agira d'esquisser le profil général du JN à mettre en place. Un exemple illustrant cette typologie est exposé dans le quatrième chapitre.

#### II.2.4.1.1 Entité JN

Selon (*Julien et Martin, 2021b*), le JN va au-delà de la simple représentation virtuelle d'un objet physique. Il peut exister indépendamment de l'objet lui-même, permettant une optimisation préalable de la conception et persistant sous forme de données et de modèles. Les entités encapsulées par le JN peuvent être physiques ou non, comprenant des produits, des composants, des processus, des services et des systèmes complexes.

La norme ISO/DIS 23247 définit l'entité JN comme une entité distincte avec une existence autonome, tandis que les éléments observables de fabrication (OME) englobent divers éléments tels que le personnel, l'équipement, les matériaux, les processus, les installations, l'environnement, les produits et les documents de support. De plus, le JN peut interagir avec le processus pour ajuster les paramètres opérationnels et garantir la qualité (*Julien et Martin, 2021b*).

#### II.2.4.1.2 Type

La classification établie par Grieves dans l'étude de (*Grieves et Vickers, 2017*) présente de manière rigoureuse trois catégories distinctes de JN :

- Le prototype JN principalement mobilisé dans le cadre du processus de conception, servant de modèle préliminaire pour affiner les caractéristiques et les performances souhaitées.
- L'instance JN désigne un équipement spécifique, étroitement lié à la production, qui est représenté et exploité à travers le JN.
- L'agrégat JN englobe l'ensemble des instances JN déployées lors des phases d'exploitation ou de maintenance pour une même entité, formant ainsi une entité globale cohérente.

Cette classification minutieuse et structurée offre une compréhension plus approfondie des différents types de JN, en mettant en évidence leurs rôles distincts et leurs domaines d'application spécifiques (*Grieves et Vickers, 2017*).

### II.2.4.1.3 Niveau

La classification de (*Grieves et Vickers, 2017*) structure le domaine des jumeaux numériques en plusieurs niveaux : les composants, les équipements, les systèmes et les systèmes de systèmes. Cette classification permet de mieux comprendre la structure et les interactions complexes entre ces différents niveaux. Elle est précieuse pour l'analyse et la gestion des données techniques dans divers domaines d'application (*Grieves et Vickers, 2017*) (Figure II.3).

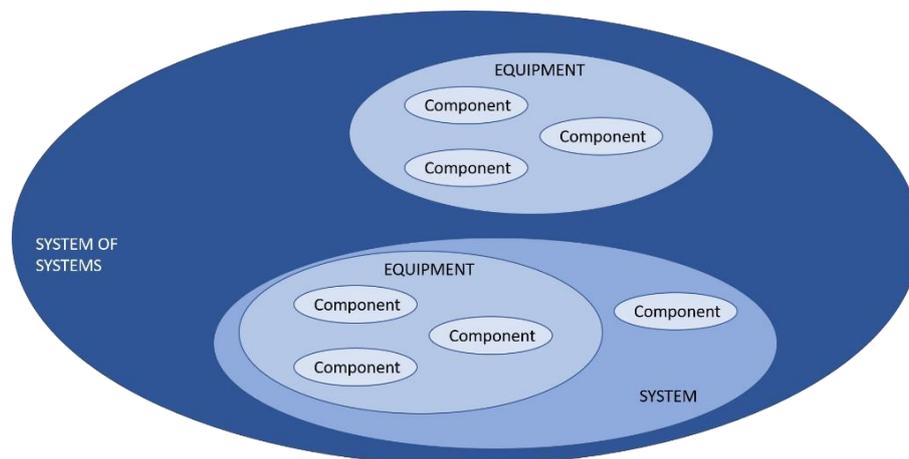


Figure II.3 : Hiérarchie des niveaux JN (Julien et Martin, 2021b).

### II.2.4.1.4 Maturité

Selon la classification effectuée par (*Julien et Martin, 2021b*), les représentations numériques peuvent être regroupées en trois catégories distinctes (Figure II.4) :

- L'ombre numérique concerne les activités numériques liées à l'objet physique, offrant une représentation dynamique unidirectionnelle.
- Le miroir numérique consiste en des modèles mathématiques détaillés décrivant l'objet sans interaction réelle.
- Le jumeau numérique fusionne les éléments physiques et virtuels dans un système cyber-physique, permettant une rétroaction vers l'objet physique et une communication en temps réel.

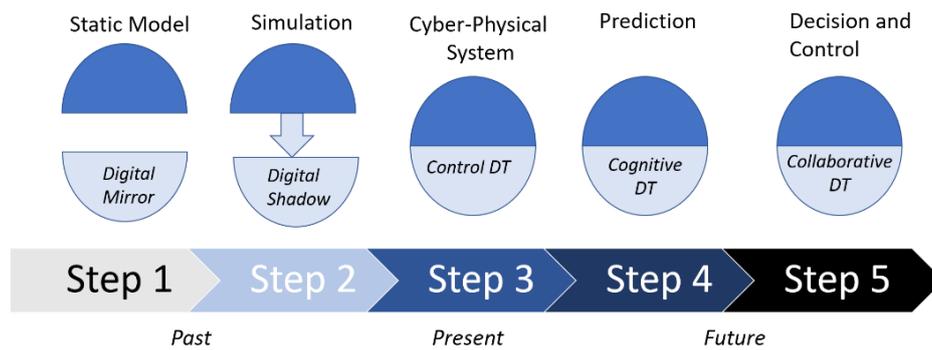


Figure II.4 : Maturité numérique (Julien et Martin,2021b).

Cette classification des représentations numériques permet de mieux comprendre les différentes caractéristiques et fonctionnalités des ombres numériques, des miroirs numériques et des jumeaux numériques dans le contexte des systèmes cyber-physiques (Julien et Martin, 2021b)

### II.2.4.1.5 Topologie

Cette classification établit une clarté quant à la relation entre l'élément manufacturable observable (OME) et son équivalent numérique (Julien et Martin, 2021b). À partir des travaux de (Schroeder et al. 2021), quatre topologies distinctes ont été définies pour visualiser ces relations (Figure II.5).

- A. Topologie de déconnexion : Aucune connexion directe entre le JN et son entité. Les informations proviennent de sources externes ou d'utilisateurs.
- B. Topologie de connexion :
  - Intégration : Le JN est intégré à son objet ou à son environnement matériel (OME), permettant une communication directe, mais avec des capacités de calcul limitées.
  - Séparation : Malgré la connexion entre le JN et l'OME, ils restent physiquement distants l'un de l'autre.
- C. Topologie de jointure : Une combinaison des deux topologies précédentes. Une partie du JN est intégrée à l'OME, tandis que l'autre partie reste physiquement éloignée.

Cette classification des topologies de relation entre le JN et son entité offre une meilleure compréhension des différentes configurations possibles, mettant en évidence les aspects de connexion, d'intégration et de distance physique entre ces éléments (Schroeder et al., 2021).

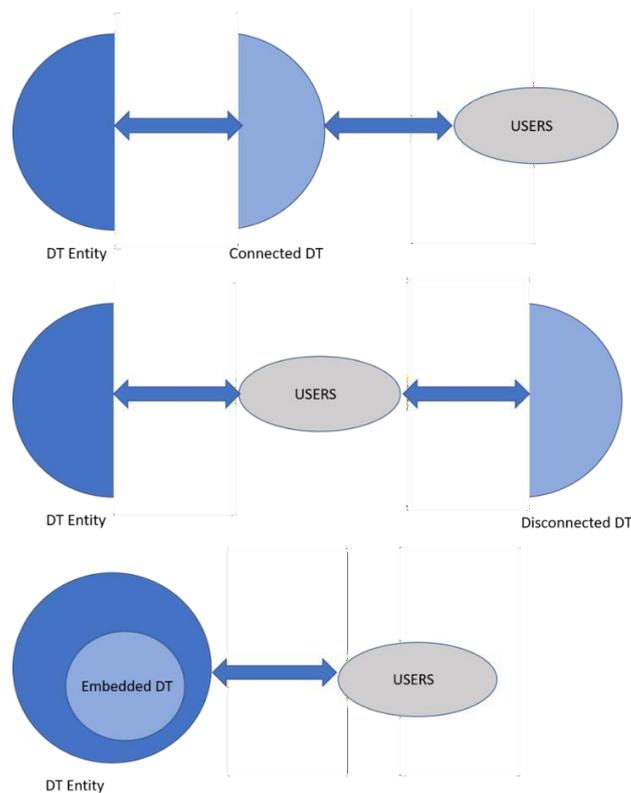


Figure II.5 : Topologies de JN. (Julien et Martin, 2021b).

### II.2.4.1.6 Synchronisation

Une fois le jumeau numérique (JN) et son entité connectée, une communication directe ou indirecte peut être établie entre eux. Selon la norme ISO/DIS, il est essentiel de garantir une communication synchronisée à une fréquence appropriée (ISO/DIS, référence de la norme). Cette communication peut prendre différentes formes, telles que l'asynchronisme (événementiel, conditionnel, à la demande) ou la synchronisation en temps réel, quasi temps réel ou périodique, en fonction de l'application et des objectifs visés (ISO/DIS, référence de la norme).

### II.2.4.1.7 Boucle de décision

Le concept de boucle de décision, introduit par (Traoré, 2021), est utilisé pour décrire la communication entre le jumeau numérique (JN) et son entité, également connue sous le nom de "Jumeau d'Intérêt". Cette boucle de jumelage permet d'envisager trois scénarios de prise de décision (Figure II.6) :

- La boucle ouverte, où la décision est prise par un être humain.
- La boucle fermée, où la décision est prise par le JN lui-même.
- La boucle mixte, qui offre une combinaison des deux approches.

L'absence de lien direct ou indirect entre la représentation virtuelle et l'entité indique la présence d'un miroir numérique ou d'une ombre numérique, plutôt qu'un véritable jumeau numérique. Cette approche améliorée permet une compréhension plus précise de la prise de décision dans le contexte du JN et de son entité (Traoré, 2021).

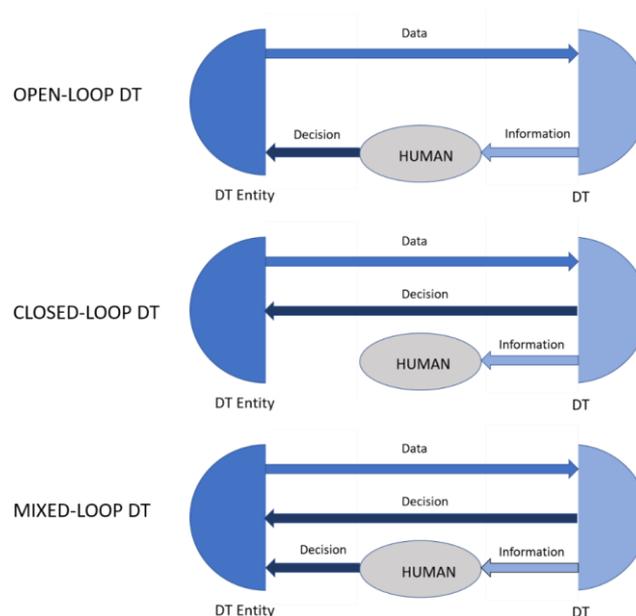


Figure II.6 : Boucle de décision (Julien et Martin,2021b).

#### II.2.4.1.8 Usager

Conformément à l'ISO (2021), il est essentiel de fournir des interfaces appropriées pour répondre aux besoins diversifiés des utilisateurs du jumeau numérique (JN), qu'ils soient humains, des dispositifs, des logiciels/applications ou d'autres JN. Cette approche favorise une interaction fluide et une collaboration optimale entre les acteurs du JN, facilitant ainsi des échanges d'informations cohérents.

#### II.2.4.1.9 Usages

Selon (Julien et Martin, 2021), plusieurs applications ont été présentées dans le domaine de la fabrication, illustrant les différentes utilisations des JN. Ces applications sont regroupées en sept catégories, comme indiqué dans le tableau ci-dessous :

Tableau II. 1: Hiérarchie d'utilisation.

Catégories	Exemples d'applications
Analyse	Contrôle, surveillance, régulation...
Simulation	Conception, amélioration des performances, gestion...
Optimisation	Optimisation d'un produit, d'un processus, d'un poste de travail...
Cognition	Prédiction de situations futures, évaluation des risques...
Collaboration	Collaboration avec des humains, des systèmes, d'autres JN, des usines
Comparaison	Comparaison entre les prévisions et les résultats réels...

Conceptualisation	Traduction d'informations visuelles en informations symboliques pour communiquer avec les humains
-------------------	---

Les étapes d'analyse et de simulation jouent un rôle central dans l'utilisation des applications de jumeau numérique (JN) (*Julien et Martin, 2021b*). Les JN de Contrôle assurent la visibilité et la traçabilité des produits et des processus, tandis que les algorithmes d'intelligence artificielle enrichissent les modèles de JN pour une anticipation avancée et la création de JN de Cognition (Figure II.7).

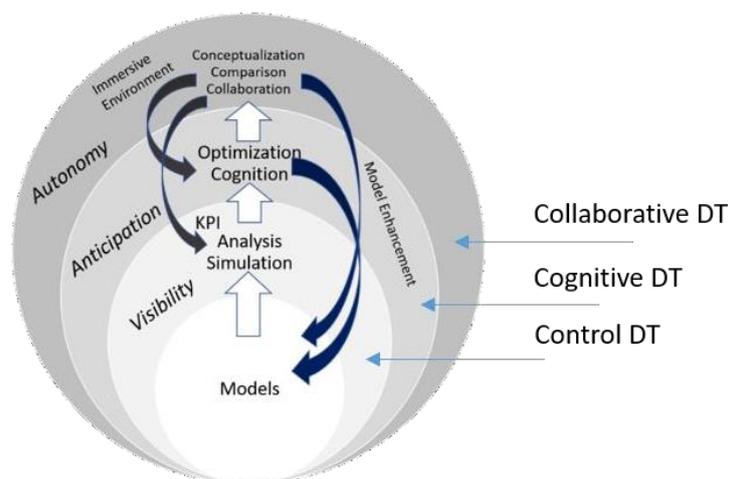


Figure II.7 : Hiérarchie d'utilisation (*Julien et Martin, 2021b*).

Les JN évoluent vers une autonomie en collaborant avec leur environnement physique ou virtuel. Les JN Collaboratifs offrent des environnements immersifs et des tableaux de bord pour faciliter l'analyse et la prise de décision (*Julien et Martin, 2021b*).

#### II.2.4.1.10 Applications

Le JN offre diverses applications, telles que le contrôle en temps réel, l'analyse hors ligne, la maintenance prédictive et la conception technique (ISO/DIS). Il est également utilisé dans la gestion de la production, la maintenance et la formation des opérateurs. De plus, le JN peut être utilisé pour la reconfiguration en ligne, le support diagnostique et la formation des opérateurs, élargissant ainsi ses possibilités. La typologie du JN a été enrichie par des projets industriels, introduisant les concepts de "version", "précision" et "modèles" pour mieux comprendre sa réalité et son évolution.

#### II.2.4.1.11 Version

Il s'agit des différentes itérations que peut connaître le jumeau numérique au cours de son cycle de vie (Figure II.8). À titre d'exemple, une première version interne du jumeau numérique (élaborée par le développeur ou le fournisseur du jumeau numérique) peut être créée pour un équipement spécifique (IV0). Cette version peut ensuite servir de base pour le développement de deux autres versions internes, l'une en mode Prototype (IV1) et l'autre en mode Agrégat (IV2). De plus, ces différentes versions peuvent être adaptées pour créer de nouvelles versions personnalisées destinées au client (EV0), avec des caractéristiques ajustées en fonction des besoins spécifiques du client.

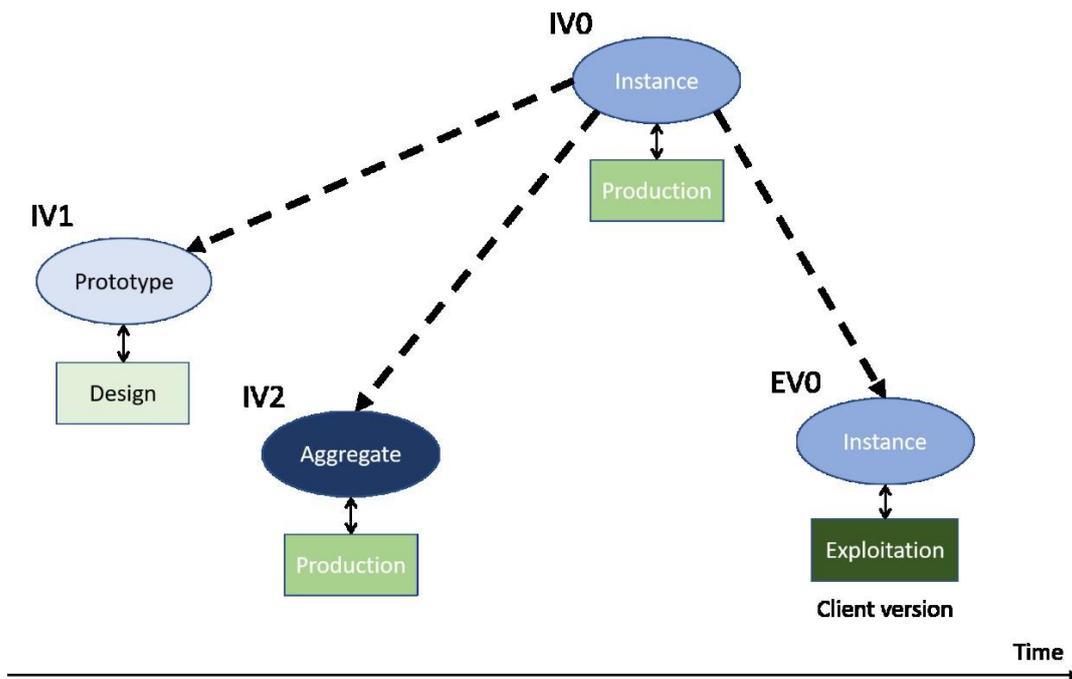


Figure II.8 : Évolution des versions du jumeau numérique au cours de son cycle de vie (Hamzaoui et Julien, 2023)

#### II.2.4.1.12 Précision

La précision est liée à la mesure utilisée pour valider le jumeau numérique, c'est-à-dire le degré de précision auquel le jumeau numérique doit répondre pour résoudre les besoins opérationnels clairement définis. Cela peut être mis en œuvre de manière "fixe" (la même précision est maintenue quelles que soient les situations rencontrées), "variable" (le jumeau numérique s'adapte aux situations auxquelles il est confronté et ajuste sa précision en fonction du besoin, ce qui lui confère un certain degré d'autonomie) ou "configurable" (la précision varie en fonction de situations préalablement définies, le jumeau numérique étant donc paramétré à l'avance pour ajuster sa précision en cas de situations prédéfinies). Un exemple de gestion dynamique de la précision du jumeau numérique est illustré dans la Figure (Figure II.9), et de plus amples informations à ce sujet sont disponibles dans l'étude de (Julien et Hamzaoui, 2022).

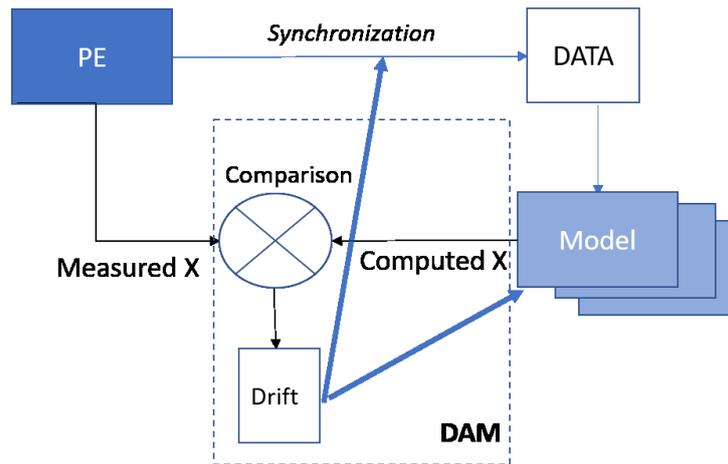


Figure II.9 : Architecture de la Gestion Dynamique de la Précision pour le Jumeau Numérique (Hamzaoui et Julien, 2023).

### II.2.4.1.13 Modèles

Cet attribut vise à définir les besoins en modélisation pour reproduire au mieux les caractéristiques et le comportement d'un objet physique à dupliquer numériquement. Ces besoins sont classés en trois catégories : "réalisme", "précision" et "généralité" (Levins 1966). Le réalisme concerne le nombre de processus sous-jacents pris en compte dans le modèle, la précision se réfère à l'exactitude des mesures ou prédictions, et la généralité concerne la capacité du modèle à s'adapter à diverses situations, y compris des contextes différents de celui de sa création. Selon Levins, lors du développement d'un modèle, il est nécessaire de privilégier deux de ces critères au détriment du troisième, ce qui conduit à trois types de modèles : "empiriques", "mécanistes" et "analytiques" (Figure II.10).

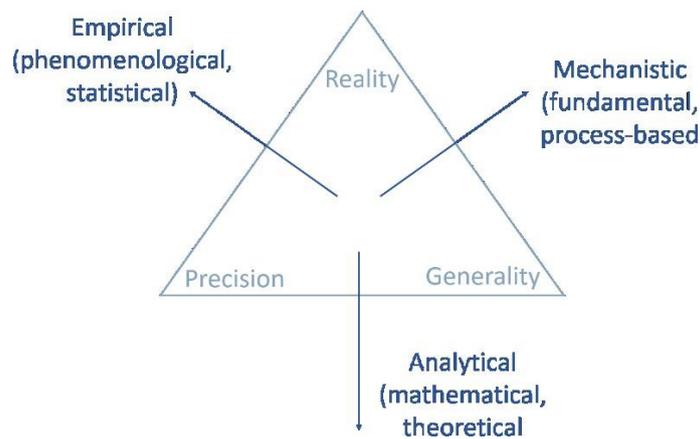


Figure II.10 : Classification des modèles (Hamzaoui et Julien, 2023)

Il est également important de noter une autre distinction entre les modèles "probabilistes" (stochastiques) et "déterministes". Un modèle déterministe permet de calculer de manière précise un événement futur sans utiliser de variables aléatoires. En revanche, un

modèle probabiliste peut gérer l'incertitude associée aux données d'entrée et présente une part d'imprévisibilité intrinsèque, de sorte que des conditions initiales identiques peuvent entraîner différentes issues.

### ***II.2.4.2 Cognition***

La collaboration entre le jumeau numérique et l'agent humain revêt une importance capitale, principalement en ce qui concerne l'affectation des tâches de prise de décision. À ce niveau-là, les auteurs avaient proposé la méthode « Cognitive Work Analysis » (CWA) développé par (Rasmussen, 1986). Cette dernière permet d'appréhender une structure ou système sociotechnique complexe en considérant les interactions entre les différents agents (humains, machines, robots, des capteurs et logiciels). Un travail préliminaire appliqué à la maintenance prédictive a été présenté par (Kamoise et al., 2022) Le CWA est structuré en cinq étapes :

- L'analyse du domaine de travail (Work Domain Analysis) examine les objectifs, les contraintes et les ressources du travail effectué.
- L'analyse des tâches de contrôle (Control Task Analysis) se concentre sur la supervision et la régulation du système.
- L'analyse des stratégies (Strategy Analysis) explore les méthodes utilisées pour atteindre les objectifs du système.
- L'analyse de l'organisation sociale et de la coopération (Social Organization Cooperation Analysis) étudie les interactions sociales et la coordination entre les acteurs humains et les systèmes techniques.
- L'analyse des compétences des travailleurs (Worker Competencies Analysis) se concentre sur les compétences et les connaissances nécessaires des individus impliqués.

### ***II.2.4.3 Cyber***

La phase "cyber" représente une étape clé dans la conception et l'implémentation du JN, où les décisions technologiques initiales sont prises, y compris l'identification des besoins à partir desquels ces choix technologiques seront effectués, tels que la décentralisation, la cybersécurité, la réactivité du système, et d'autres critères pertinents. En outre, cette section est une transition importante entre les aspects autonomes et interdépendants de la technologie, englobant les étapes de génération, collecte et traitement de données. Dans ce papier, nous nous intéressons à l'analyse de cette étape "cyber" du point de vue de la donnée, de la typologie de la donnée vivant dans le jumeau numérique, ainsi que de son cycle de vie dans ce dernier.

### ***II.2.4.4 Conversion et connexion***

Arrivant à ces niveaux-là, l'architecture précédemment définie sera progressivement raffinée en spécifiant les interconnexions (interfaces logicielles et matérielles) et les protocoles de communication en utilisant des outils et technologies standards tels que OPC-UA, MTConnect, MQTT. Ces choix détermineront la sélection des capteurs et des méthodes de collecte de données en fonction de l'environnement de l'application. Selon ce contexte, de nombreux choix peuvent être faits en privilégiant les technologies déjà existantes dans l'entreprise. L'objectif de ces étapes est de produire des métriques pour comparer les différents choix technologiques afin de sélectionner l'architecture la mieux adaptée en termes de coût, de performance, d'agilité, de sécurité, etc.

## **II.3 Etat de l'art sur le cycle de vie de la donnée**

Il convient de souligner que l'étape « Cyber » représente une étape charnière entre la partie indépendante de la technologie et la partie dépendante de la technologie dans le

développement du jumeau numérique. Pour saisir correctement le cycle de vie de la donnée dans le jumeau, une architecture de données bien définie est nécessaire à cette étape. Bien que différents modèles de données soient disponibles, leur manque de standardisation rend essentielle une analyse approfondie pour répondre aux exigences de détails à ce stade du processus de développement du jumeau. Par conséquent, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour développer des méthodes standardisées et efficaces pour modéliser le cycle de vie de la donnée dans le jumeau numérique.

### **II.3.1 Gestion des données pour le développement d'un modèle ontologique**

L'étude conduite par (*Singh et al., 2020*) expose une approche reposant sur l'exploitation d'une ontologie dédiée aux jumeaux numériques. Cette ontologie vise à capturer les définitions conceptuelles, les relations, les assertions et les règles sémantiques associées à ce domaine, dans le but de représenter les aspects sémantiques des données et d'assurer leur cohérence tout au long du cycle de vie du jumeau numérique. Parallèlement, une méthodologie en cinq étapes est proposée pour extraire une structure minimale de modèle de données à partir de cette ontologie, facilitant ainsi la gestion des bases de données dans le contexte des applications des jumeaux numériques.

Cependant, cette approche présente certaines limites et insuffisances qu'il convient de mettre en évidence. Une analyse approfondie des défis spécifiques liés à la modélisation du cycle de vie des données dans les jumeaux numériques est essentielle. Il est nécessaire de comprendre les obstacles potentiels pour développer des solutions adaptées. De plus, une méthodologie de validation plus détaillée est recommandée pour évaluer l'efficacité de la méthode proposée, notamment par le biais de comparaisons avec d'autres approches existantes. Enfin, il est crucial d'explorer les domaines d'application spécifiques et de généraliser l'approche à différents types de jumeaux numériques, en tenant compte des limitations et des contextes d'utilisation.

### **II.3.2 Données du jumeau numérique : méthodes et technologies clés**

L'article de (*Zhang et al. 2021*) constitue une contribution significative dans le domaine de la recherche sur les jumeaux numériques en posant les fondements théoriques de la DTD (Digital Twin Data) et en soulignant son importance cruciale pour la promotion et l'application du JN. Les chercheurs mettent en évidence le rôle fondamental de la DTD en tant que pilier du JN, permettant la création et la maintenance en temps réel du jumeau numérique d'un objet physique ou d'un système.

L'un des points forts de l'article réside dans les orientations fournies pour la collecte, le stockage, l'analyse et la sécurité des données du jumeau numérique. Ces orientations offrent des recommandations précieuses pour les professionnels qui cherchent à concevoir et à mettre en œuvre des jumeaux numériques fiables et efficaces. En suivant ces lignes directrices, les praticiens sont en mesure de garantir la qualité et la pertinence des données utilisées dans le cadre des jumeaux numériques, ce qui contribue à renforcer leur valeur et leur utilité dans un large éventail d'applications industrielles.

Cependant, il convient de noter que l'article présente une limitation dans l'approfondissement de l'analyse de la structuration des données pour les jumeaux numériques. Bien qu'il offre une vue d'ensemble complète des méthodes et des technologies clés associées aux jumeaux numériques, il ne se penche pas de manière détaillée sur les aspects spécifiques liés à la structuration des données. Une analyse plus approfondie de cette question permettrait de mieux comprendre les stratégies et les meilleures pratiques en matière de structuration des données pour les jumeaux numériques.

### **II.3.3 Jumeau numérique et interactions homme-robot 4.0**

(Gallala et al., 2022) se concentre sur l'utilisation des technologies de l'Industrie 4.0 pour améliorer les interactions entre humains et robots en exploitant les jumeaux numériques. Les auteurs proposent une analyse approfondie des approches de structuration des données spécifiquement conçues pour faciliter le déploiement et l'utilisation de ces jumeaux numériques dans ce contexte.

Cependant, une limitation identifiée dans l'article concerne le cycle de vie des données proposé, qui présente une approche linéaire. Cette approche ne tient pas suffisamment compte de la complexité et de la dynamique inhérentes à la gestion des données dans les projets de jumeaux numériques.

En réalité, la gestion des données dans ce domaine peut souvent impliquer des itérations, des boucles et des ajustements continus plutôt qu'une simple progression linéaire. Par conséquent, la tâche de gestion des données devient plus complexe et exige une approche plus souple.

Pour pallier cette limitation, il est impératif de mettre en place une gestion de données flexible, accompagnée d'outils et de méthodologies appropriés. Cette démarche vise à s'adapter aux interactions réciproques inhérentes aux différentes phases du cycle de vie des données des jumeaux numériques, ainsi qu'aux ajustements et révisions fréquemment requis pour préserver la cohérence et l'exactitude des données tout au long du projet.

Une approche itérative et adaptable se révèle essentielle pour répondre aux exigences changeantes des jumeaux numériques et garantir une gestion optimale des données à long terme.

## **II.4 Conclusion**

Dans un souci de concision, ce chapitre met en évidence l'impératif de deux éléments fondamentaux au sein de la sphère toujours évolutive des jumeaux numériques. Il démontre la nécessité cruciale d'embrasser des méthodologies rigoureuses, telles que celle qui repose sur la méthodologie 5C, pour orienter le développement des jumeaux numériques tout en conservant une flexibilité adaptative à l'égard des besoins spécifiques à chaque application.

Il souligne également l'importance vitale de la gestion efficace du cycle de vie des données des jumeaux numériques, laquelle est garante de la qualité et de la pertinence des données employées. Pour relever ce défi de manière optimale, une approche itérative et adaptable s'avère impérative pour répondre aux exigences changeantes de ces systèmes. Dans ce contexte, le chapitre 3 de ce mémoire se donne pour mission de formaliser en profondeur ce cycle de vie des données au sein du domaine des jumeaux numériques. Il met particulièrement l'accent sur une exploration minutieuse du modèle 5A, un cadre concis mais éclairant qui guide la gestion des données tout au long de ce cycle.

Il convient de noter que ce modèle a déjà été présenté lors d'une conférence internationale de renom (*CIGI Qualita Mosim, 2023*), attestant ainsi de son importance et de son utilité pratique dans ce domaine en constante évolution.

**III. Chapitre 3**  
**Modélisation de**  
**l'Interaction Homme-**  
**Jumeau Numérique**

### III.1 Introduction

Au sein de l'industrie 4.0, le jumeau numérique représente une technologie incontournable, façonnée pour des applications spécifiques sans pour autant chercher à supplanter l'opérateur humain. En revanche, il incarne un vecteur de collaboration essentiel entre l'agent humain et le jumeau numérique, une collaboration dont le pilier central réside dans l'échange de données. Dans ce contexte évolutif et complexe des jumeaux numériques, nous entreprenons une exploration minutieuse du cycle de vie des données. Notre démarche met en lumière le modèle 5A, un cadre conceptuel concis mais éclairant qui oriente la gestion des données sur l'ensemble de ce cycle.

Cependant, notre quête ne se limite pas à une simple formalisation du modèle 5A. Nous aspirons également à élargir cette compréhension en scrutant attentivement les interactions de données entre agent coopérant, à savoir l'agent technique (JN) et l'agent humain. Cette étude s'appuie sur un cas d'étude concret inséré dans l'élaboration d'un jumeau numérique collaboratif dédié à la maintenance 4.0. Un partenariat de cette envergure se développe en collaboration avec Spie Industrie, une entreprise de renom, en conjonction avec un acteur de premier plan dans le secteur ferroviaire.

Le chapitre en question vise à atteindre un objectif de fond : c'est-à-dire l'établissement d'une architecture clairement définie sous-jacente aux échanges de données entre le jumeau numérique et l'opérateur humain. En accomplissant cet objectif, nous contribuons de manière significative à relever un défi fondamental dans le domaine de la maintenance prédictive, en formalisant la coopération entre l'agent humain et le jumeau numérique. Nous envisagerons cette coopération à travers l'échange de données nécessaire à l'activité des planification des ordres de travaux (OT) préventifs.

### III.2 Modélisation du cycle de vie de la donnée

La phase « cyber » de la méthodologie 5C (*Julien et Martin, 2021b*) comprend plusieurs aspects clés du développement du jumeau numérique, notamment la gestion des données, l'organisation architecturale et les décisions technologiques. La gestion des données est essentielle pour répliquer avec précision les systèmes physiques, de plus, la modélisation des données permet d'organiser et de structurer les informations.

L'organisation de l'architecture est également importante, car elle influe sur le stockage et le traitement des données, ainsi que sur la construction du système, ce qui peut avoir un impact significatif sur la qualité, la précision, la performance et la consommation d'énergie du jumeau numérique (*Julien et Hamzaoui, 2022*).

#### III.2.1 Modèle 5A

Pour viser l'atteinte de cet objectif, la proposition visuelle formulée (*Nefti et al., 2023*) s'est alignée sur le modèle visuel énoncé dans les travaux de (*Zhang et al. 2021*), qui repose sur une représentation sous forme de blocs du flux de données, avec le schéma périodique formulé par le Digital Twin Consortium (*Pieter, 2022*). Afin de réaliser cette convergence, un schéma constitué de cinq étapes a été élaboré, par le biais desquelles les données cheminent tout au long de leur existence au sein du jumeau numérique. Cette démarche confère une vue d'ensemble au cycle de vie des données, en incluant l'ensemble des étapes, de leur acquisition jusqu'à leur effacement (Figure III. 1), Il est à souligner que ce modèle a déjà été exposé lors d'une prestigieuse conférence internationale (*CIGI Qualita Mosim, 2023*).

L'intention sous-jacente était de créer un modèle qui, d'une part, demeure suffisamment précis et spécifique pour identifier et énumérer les phases essentielles, et d'autre part, évite de se perdre dans les détails méticuleux au détriment de son universalité. Ainsi, les cinq phases cardinales du cycle de vie des données au sein du jumeau numérique, couvrant de la collecte à l'application, ont été identifiées. Une caractéristique les rassemble : toutes débutent leur dénomination par la lettre "A", ce qui a valu au modèle son appellation de "5A". Ces phases sont les suivantes :

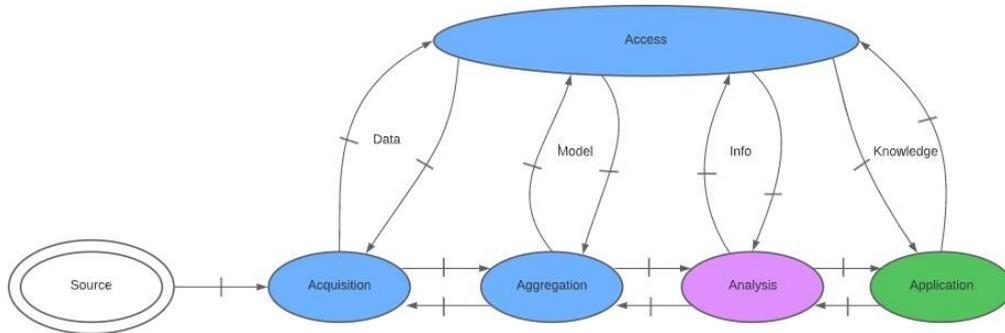


Figure III.1 : Modèle 5A du cycle de vie de la donnée dans le jumeau numérique (CIGI  
Qualita Mosim, 2023)

**Acquisition** : Cette phase englobe la collecte des données provenant de diverses sources, requérant une évaluation minutieuse de leur nature intrinsèque, de leur provenance et de leurs attributs, qu'ils soient endogènes ou exogènes, relevant de l'interaction humaine ou non. En conséquence, ces données sont rassemblées puis consignées en vue de leur exploitation ultérieure.

**Agrégation** : Après avoir été collectées, ces données peuvent être agrégées avec d'autres en vue de la création de modèles dynamiques, nourrissant ainsi la phase subséquente.

**Analyse** : Au stade de l'analyse, une démarche est entreprise pour extraire des connaissances des données agrégées et modélisées en faisant appel à des approches telles que l'intelligence artificielle et les méthodologies d'apprentissage fondées sur les données. Cette initiative vise à appréhender les tendances, les comportements ainsi que les schémas inhérents aux données.

**Application** : A l'issue de l'analyse des données, celles-ci se trouvent prêtes à être employées à des fins variées, conformément aux exigences spécifiques des utilisateurs. Ces applications englobent la prédiction de tendances, la prise de décisions éclairées ainsi que l'élaboration de nouvelles offres de produits et de services, tout en répondant aux besoins évolutifs de ces derniers.

**Accès** : Cette phase englobe les domaines de la gestion d'accès aux données, de la sécurité et de la confidentialité. Elle implique la conservation, l'archivage, la suppression ou la destruction des données, ainsi que la prise en charge des aspects juridiques et de cybersécurité inhérents à la gestion des données.

La notion d'unicité repose sur une hypothèse générale qui s'étend à tous les stades de vie des données. Cependant, il convient de noter que l'étape d'accès, agissant comme une dimension transversale par rapport aux autres étapes, peut entraîner une duplication des données. En effet, au niveau de l'accès, des procédures de stockage, d'archivage et de suppression peuvent altérer l'unicité des données. Toutefois, il est essentiel de souligner que l'origine et le cheminement des données restent constants à chaque cycle de vie, débutant toujours par la source avant de progresser vers les autres étapes. Bien que des répliques ultérieures de ces mêmes données

puissent être générées et dupliquées, le cycle initial de vie des données demeure inchangé.

Ce modèle présente une opportunité de structurer le cheminement des données au sein du jumeau numérique. Cette approche se fonde sur la subdivision en "états" de l'entité de données ainsi que de son rôle global au sein du jumeau numérique à chaque phase. Cependant, il est également impératif de considérer les caractéristiques spécifiques des données traitées. Une appréhension approfondie des attributs clés de ces données est cruciale pour déterminer avec précision les besoins en ressources technologiques. Ainsi, la section suivante introduit une typologie de données issue de (Nefti et al., 2023), ayant pour objectif d'établir des profils pour les données à gérer dans le jumeau numérique en identifiant des attributs essentiels.

### **III.2.2 Typologie de la donnée**

L'établissement de profils détaillés pour les données à être traitées au sein du jumeau numérique représente un élément de grande envergure dans le processus. La typologie des données, telle qu'elle est présentée dans la section suivante, joue un rôle clé en esbossant les contours initiaux de ces données.

Cette typologie vise à identifier et à décrire en profondeur les critères essentiels qui permettent de caractériser une donnée dans toute sa complexité. En effet, chaque donnée, qu'elle soit quantitative, qualitative, ou même comportementale, détient des attributs distincts qui la définissent et qui la rendent apte à être intégrée dans le jumeau numérique. Cette typologie fournit ainsi une grille de classification indispensable pour contextualiser et structurer les données :

- **La source** : C'est l'origine de la donnée. Il revêt une importance capitale de démêler la provenance précise des données, car cette connaissance sert de base essentielle à l'évaluation minutieuse de leur qualité intrinsèque et de leur pertinence contextuelle.
- **Le type** : Il renvoie à la caractéristique fondamentale qui définit la nature même de la donnée. Cette catégorisation détermine si la donnée est de nature environnementale, géométrique, fonctionnelle, temporelle, ou si elle appartient à d'autres catégories spécifiques. Cette précieuse information revêt une importance significative dans le processus de manipulation et d'analyse des données, car elle offre un cadre conceptuel pour l'interprétation et l'exploitation adéquates de la donnée dans son contexte applicatif.
- **La valeur** : C'est la mesure ou l'observation que représente la donnée. En d'autres termes, elle renvoie à la signification inhérente à la donnée et à la quantification de ce qu'elle représente dans le contexte concerné. Avoir une compréhension précise de la valeur attribuée à la donnée est essentiel pour garantir son utilisation appropriée. En effet, cette valeur détermine la pertinence de la donnée pour des analyses ultérieures, des prises de décision informées et des actions entreprises en fonction des résultats obtenus à partir de cette donnée.
- **L'accès** : Ceci englobe les diverses modalités d'accès à la donnée, qui peuvent prendre la forme d'un accès libre ou conditionnel. Ces modalités définissent les droits et les restrictions accordés aux utilisateurs pour interagir avec la donnée. Elles peuvent inclure des paramètres tels que la possibilité d'accéder à la donnée en lecture seule, en écriture ou en mode de modification. En fonction du contexte et des besoins spécifiques, la manière dont la donnée peut être consultée, utilisée et modifiée est définie par ces modalités d'accès.
- **La criticité** : Cela fait référence à la signification stratégique de la donnée pour l'entreprise ou l'organisation. Cette évaluation de l'importance de la donnée est

cruciale dans le cadre de la gestion de la cybersécurité et de la mise en place de mesures de protection adéquates. Comprendre le degré d'importance de chaque donnée permet de hiérarchiser les ressources de sécurité et de concentrer les efforts de protection sur les données les plus critiques. Cette démarche garantit une allocation efficace des ressources de sécurité et renforce la capacité de l'entreprise à réagir aux menaces potentielles.

- **Le stockage :** Il revêt une importance capitale de définir l'emplacement de stockage de la donnée ainsi que les modalités de sauvegarde afin d'éviter toute éventuelle perte de données. Cette mesure est fondamentale pour assurer l'intégrité et la disponibilité des données essentielles à l'activité de l'entreprise ou de l'organisation. La détermination d'une stratégie de stockage adéquate, assortie d'un plan de sauvegarde robuste, permet de minimiser les risques liés à la défaillance matérielle, aux erreurs humaines ou aux incidents de sécurité, garantissant ainsi la préservation et la continuité des données.
- **La synchronisation :** Ceci englobe la périodicité de collecte et de mise à jour de la donnée. La synchronisation régulière de la donnée en fonction des exigences est cruciale pour assurer la pertinence et la fiabilité des analyses. Il est impératif d'établir un calendrier approprié de collecte et de mise à jour de la donnée, en tenant compte des besoins opérationnels et des objectifs d'analyse. Cette démarche vise à éviter la stagnation de la donnée et à garantir sa conformité avec l'évolution des besoins et des contextes. En adaptant la fréquence de mise à jour en conséquence, les informations demeurent actuelles, ce qui permet des prises de décision éclairées et une interprétation précise des tendances et des événements.
- **La précision :** Ceci englobe la qualité intrinsèque et la précision de la donnée. La connaissance de la précision des données revêt une importance capitale pour garantir des analyses rigoureuses et exactes. La qualité des informations influe directement sur la fiabilité des résultats obtenus à partir de ces données. Il est donc essentiel d'évaluer la justesse, la fiabilité et la cohérence de la donnée en amont de son utilisation dans des analyses ou des prises de décision. Cette évaluation minutieuse permet de détecter d'éventuelles erreurs, incohérences ou biais qui pourraient altérer la pertinence et la validité des résultats obtenus. En obtenant une mesure précise de la qualité et de la précision des données, les utilisateurs peuvent aborder leurs analyses en toute confiance, en ayant l'assurance que les informations sur lesquelles ils s'appuient sont fiables et véridiques.
- **La variabilité :** Ceci traite de la variabilité inhérente à la donnée, quantifiable par la dispersion de ses valeurs autour de la moyenne ou de la médiane. Cette variabilité reflète l'étendue des fluctuations potentielles de la donnée. Une variabilité accrue est liée à une plus grande incertitude et dispersion des valeurs, ce qui peut influencer la fiabilité des résultats générés. Par conséquent, la variabilité constitue un critère d'une importance significative. Une plus grande variabilité peut indiquer des écarts plus importants entre les mesures individuelles, suggérant ainsi une imprévisibilité accrue dans les données. Les utilisateurs doivent être conscients de cette caractéristique, car elle peut influencer sur l'interprétation des résultats et la confiance qu'ils peuvent accorder aux analyses basées sur ces données.
- **Le modèle :** Cette facette englobe le choix du modèle analytique ou de l'algorithme qui sera appliqué à la donnée lors du processus d'analyse. Il s'agit d'un élément crucial car la méthode d'analyse utilisée aura un impact direct sur les résultats obtenus. Par conséquent, il est impératif d'avoir une compréhension approfondie du

modèle ou de l'algorithme sélectionné, car cela permettra d'interpréter de manière adéquate les résultats obtenus à partir de la donnée.

- **L'information** : Cette considération porte sur la nature des informations qui peuvent être dérivées de la donnée. Il est crucial de discerner les informations potentielles qui peuvent être obtenues à partir de la donnée afin d'évaluer pleinement sa pertinence et son utilité dans un contexte donné.
- **La connaissance** : Ceci concerne les connaissances qui peuvent être extraites des données. Il est crucial d'avoir une compréhension des connaissances pouvant être dérivées des données, car cela permet d'évaluer la pertinence des données elles-mêmes.
- **L'utilisateur** : Cela concerne les utilisateurs de la donnée. Il est important de connaître les utilisateurs de la donnée pour en évaluer l'accessibilité et la pertinence.
- **La communication** : Cela englobe les modes de transmission de la donnée, tels que sa présentation sous forme de tableaux de bord ou de courbes d'évolution. Il est crucial d'adapter la communication de la donnée aux exigences spécifiques des utilisateurs.

Ayant scruté minutieusement le cycle de vie de la donnée au sein du jumeau numérique, en identifiant les jalons essentiels de son évolution, notre attention se tourne désormais vers un aspect tout aussi crucial : l'interaction du jumeau numérique avec ses partenaires collaboratifs. Il convient de souligner que le jumeau numérique s'inscrit en tant que coéquipier plutôt que substitut à l'humain. Cette transition marque une progression organique vers l'exploration de la dynamique d'interaction entre le jumeau numérique et ses acteurs, une dynamique qui sera amplifiée dans le prolongement du modèle 5A que nous avons ébauché. La section subséquente plonge dans l'univers du jumeau numérique collaboratif, mettant en lumière la matérialisation de ces échanges de données et leur contribution à l'enrichissement du modèle existant.

### **III.3 Jumeau numérique collaboratif**

À la lumière des recherches sur la coopération entre l'homme et les systèmes, l'humain et le jumeau numérique se révèlent comme des partenaires collaboratifs partageant des objectifs communs. Dans leur travail, (*Pacaux-LeMoine et Debernard, 2002*) discernent le concept de "Know-how", englobant les connaissances intrinsèques à chaque agent collaborant pour résoudre des problèmes liés à leurs activités, ainsi que le "Know-how-to-cooperate" qui détermine comment coopérer avec le partenaire. Ces deux attributs sont impératifs pour une collaboration fructueuse (*Kamoise et al., 2023*).

L'essence du "Know How" (KH) se dédouble en deux dimensions. D'une part, le KH interne, représentant les savoirs, l'expertise et les compétences propres à chaque agent (qu'il soit humain ou technique). D'autre part, le KH externe, lié à la capacité de l'agent à extraire des informations de l'activité et de l'environnement, ainsi qu'à influencer ce dernier. Le "Know-to-cooperate" (KHC) présente également une dualité interne et externe.

Le premier concerne la capacité de construire un modèle de compréhension des intentions du partenaire. Le second réfère à la compétence de collecter et de partager des informations avec le partenaire. Le modèle de compréhension (KHC interne) s'appuie sur la compréhension mutuelle des KH et KHC respectifs, tandis que l'échange d'informations (KHC externe) soutient le maintien de l'espace de travail collaboratif.

Ce modèle s'avérera essentiel pour discerner les exigences des agents humains en matière de collaboration avec le jumeau numérique, abordant des questions telles que les compétences

du jumeau numérique, les informations qu'il remonte et la répartition des rôles entre l'agent humain et le jumeau numérique.

Tableau III. 1: Modèle KH-KHC (Pacaux-Lemoine, 2002)

<b>KNOW-HOW (KH) : Connaissances propres à chaque agent coopérant</b>
<b>Interne</b> : compétences de chaque agent coopérant (i.e., expertise, expérience)
<b>Externe</b> : obtenir des informations de l'environnement et agir sur le processus
<b>KNOW-HOW-TO-COOPERATE-(KHC): Savoir coopérer avec son partenaire</b>
<b>Interne</b> : identifier l'organisation coopérative, produire un plan commun
<b>Externe</b> : comprendre et fournir des informations à son partenaire

### III.4 Cas d'étude

#### III.4.1 Contexte

La maintenance prédictive est une des applications majeures du jumeau numérique dans l'industrie 4.0. Grâce à sa capacité à émuler fidèlement l'état physique d'un élément, il augmente la qualité des décisions relatives à la planification, la gestion et la mise en œuvre des activités de maintenance (*Kamoise et al., 2023*).

Cependant, les investigations de (*Wellsandt et al. 2021*) mettent en évidence les entraves à l'intégration harmonieuse de l'agent humain dans ce processus, mettant ainsi en lumière la nécessité inéluctable de la synergie entre l'homme et l'agent technique lors de la mise en œuvre du jumeau numérique à des fins de maintenance prédictive, une perspective également évoquée par (*Gely et al. 2021*).

L'essence de cette coopération réside dans la justesse de l'interaction entre le jumeau numérique et son collaborateur. Cette interaction se matérialise par l'échange de données, soulignant ainsi la préoccupation capitale : le jumeau numérique doit être nourri de données significatives, une condition sine qua non pour engendrer des informations pertinentes pour le partenaire humain.

L'élément central du déploiement réussi du jumeau numérique dans le domaine de la maintenance prédictive réside dans l'harmonisation de la collaboration entre l'humain et la technologie. Dans cette optique, l'impératif indiscutable demeure la fourniture au jumeau numérique de données porteuses de sens, ce qui constitue un prérequis pour la production d'informations utiles pour le collaborateur humain. Allant bien au-delà de la simple reproduction de connaissances préexistantes, le jumeau numérique doit apporter une réelle valeur ajoutée en présentant des connaissances novatrices et des perspectives originales, tout en considérant l'expertise et les compétences du collaborateur humain.

Au cœur de cette investigation réside la conception d'une architecture de données au sein de l'entreprise Spie Industrie, en partenariat avec un acteur du domaine ferroviaire. Dans ce cadre, l'exploitation du jumeau numérique ouvre des horizons prometteurs, notamment pour renforcer la planification des opérations de maintenance préventive. Cette approche novatrice ne permet pas de surveiller et de maintenir les trains et les infrastructures ferroviaires en bon état, mais de garantir que les équipements utilisés pour la maintenance sont eux-mêmes en parfait état de fonctionnement.

### **III.4.2 Présentation générale de SPIE France**

#### ***III.4.2.1 Introduction***

SPIE est reconnu comme un acteur majeur dans la transition énergétique et la transformation numérique. Fort de ses 120 années d'expérience, SPIE s'est imposé comme le principal groupe européen indépendant dans son secteur. La société a su s'adapter aux évolutions technologiques et aux enjeux environnementaux pour offrir des solutions innovantes aux entreprises du secteur industriel.

Dans un contexte mondial marqué par la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre et de favoriser l'efficacité énergétique, la transition énergétique et la transformation numérique jouent un rôle clé dans le secteur industriel. Ces évolutions permettent d'adopter des pratiques plus durables et d'optimiser les processus de production.

L'histoire de SPIE est marquée par une ambition visionnaire et un engagement constant en faveur de l'amélioration de la qualité de vie grâce à des services techniques innovants. Depuis sa création, SPIE a connu une croissance internationale et est aujourd'hui présente dans plusieurs régions du monde. En France, SPIE occupe une position de leader et propose une large gamme d'expertises métier couvrant différents secteurs industriels.

SPIE France offre une expertise diversifiée dans de nombreux domaines, tels que l'énergie, le génie climatique, les systèmes de communication, la gestion technique des installations, les services numériques et technologiques, etc. Grâce à son écosystème d'innovation collaboratif, SPIE favorise la coopération avec ses clients, partenaires et collaborateurs pour développer des solutions techniques de pointe.

#### ***III.4.2.2 Filiales***

Aujourd'hui, SPIE se distingue par son organisation en filiales spécialisées qui interviennent à toutes les étapes du cycle de vie des installations techniques. Voici un aperçu de ses principales filiales :

- a. SPIE ICS : Cette filiale se concentre sur les services numériques et technologiques pour faciliter la transformation numérique de ses clients.
- b. SPIE Facilities : Spécialisée dans la maintenance et le Facility Management, cette filiale assure la gestion efficace des installations techniques de ses clients.
- c. SPIE CityNetworks : Axée sur les réseaux d'énergie et numériques, les transports et les services à la cité, cette filiale contribue à la création de villes intelligentes et durables.
- d. SPIE Nucléaire : Cette filiale propose des services spécialisés pour l'industrie nucléaire, garantissant la sûreté et la performance des installations.
- e. SPIE Industrie : En tant que partenaire industriel de référence, cette filiale offre des solutions intelligentes et agiles pour répondre aux besoins variés des industries.
- f. SPIE Building Solutions : Dédiée à l'intelligence du bâtiment et à sa performance, cette filiale apporte des expertises spécialisées.

Ces filiales travaillent en étroite collaboration, combinant leurs savoir-faire et leurs ressources pour répondre de manière optimale aux besoins du marché et des clients de SPIE. Cette approche cohérente renforce l'efficacité opérationnelle de SPIE et permet de proposer une gamme complète de services techniques et d'ingénierie.

- **Spie industrie**

SPIE Industrie, une division de SPIE, se divise en quatre divisions régionales : Est, Ouest, Nord et Sud. Chaque division se spécialise dans une gamme d'activités, fournissant des solutions complètes pour les clients industriels.

- Services

Services de proximité : Cette division se concentre sur les installations générales et offre son expertise dans les systèmes électriques, la tuyauterie, l'instrumentation et l'électromécanique. Elle propose des solutions sur mesure pour répondre aux besoins spécifiques des clients.

Sécurité électrique : Cette expertise englobe les réseaux de distribution électrique haute et moyenne tension (privés), les centrales d'énergie, l'électronique de puissance (onduleurs, variateurs de vitesse), les batteries de condensateurs, les audits de mesure et les expertises spécifiques en conception, réalisation et mise en service.

Processus d'intégration : Cette expertise couvre l'automatisation des processus industriels, les systèmes informatiques de processus et de gestion, la supervision, la conception et la réalisation, la programmation, la simulation et la mise en service.

Solutions mécaniques : Cette expertise comprend l'intégration mécanique, la robotique, les systèmes de manutention des matériaux, le transfert industriel, la conception et la réalisation, la programmation, la simulation et la mise en service.

Maintenance industrielle : Cette division se spécialise dans la maintenance des équipements industriels et des utilités, en mettant l'accent sur la fiabilité, l'optimisation des coûts, le suivi des performances, la gestion des stocks, l'électromécanique, l'électricité, la mécanique et les méthodes de maintenance. Son objectif est d'assurer un fonctionnement efficace et une longévité des équipements industriels.

Services Navals & Energies Marines : Cette division fournit des services complets et multi-spécialités dans la gestion et la conversion de l'énergie, les essais et la mise en service, les systèmes électriques et de tuyauterie à bord des navires, les armoires de commande navales et les études et la conception. Elle se concentre sur les applications marines et navales.

Au sein de notre cas étude, nous avons collaborer étroitement avec l'entreprise Spie Industrie. Au cœur des opérations de Spie Industrie se trouve une composante essentielle de son activité, à savoir la gestion et la mise en œuvre de processus de maintenance.

### **III.4.3 Notions sur la maintenance**

#### ***III.4.3.1 Définitions***

- **Maintenance**

Le concept de maintenance industrielle a été initialement défini dans la norme de l'Association Française de Normalisation (*Afnor*) NF-X 60 000. Cette définition englobe “l'ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé”.

- **Maintenance 4.0**

La Maintenance 4.0 est décrite comme une progression dans la manière dont on aborde la gestion de la maintenance pour les équipements de production. Son principal objectif est l'anticipation des défaillances à venir des actifs, visant en fin de compte à recommander la meilleure mesure préventive en appliquant des techniques d'analyse avancées aux données volumineuses. Ces données englobent divers éléments tels que l'état technique, l'utilisation, l'environnement, l'historique de maintenance, et même des équipements similaires situés ailleurs (*Jasiulewicz et al., 2019*).

- **GMAO**

En 1985, (M. Gabriel et Y. Pimor, 1985) établissaient la première définition de la GMAO. Selon eux, il s'agissait d'un système informatique de gestion de la maintenance. Cette vision mettait en avant un logiciel structuré autour d'une base de données, conçu pour planifier et suivre tous les aspects techniques, budgétaires et organisationnels liés à la maintenance.

Cette couverture s'étendait à l'ensemble des activités de maintenance et aux éléments qui les composent, tels que les services, les ateliers, les machines, les équipements, les sous-ensembles et les pièces. L'accès à ce système pouvait être réalisé depuis divers terminaux répartis dans différents bureaux techniques, ateliers, magasins et bureaux d'approvisionnement.

### **III.4.3.2 Formes de maintenance**

- **Maintenance préventive**

L'objectif premier de la maintenance préventive est de réduire la probabilité de défaillance ou de détérioration des équipements et biens. Cette approche vise à éviter les pannes pendant leur utilisation en adoptant des mesures programmées. La maintenance préventive suit des plages temporelles préétablies ou des conditions spécifiques pour minimiser les risques de pannes. Selon la norme AFNOR X-60010, elle est définie comme « c'est la maintenance effectuée dans l'intention de réduire la probabilité de défaillance d'un bien ou la dégradation d'un service rendu » (Debbah, 2020).

- **Maintenance prévisionnelle**

La maintenance prévisionnelle se fonde sur une étude analytique des grandeurs déterminantes liées à la dégradation des équipements. Elle vise à optimiser la programmation des opérations de maintenance pour exploiter au mieux les capacités des biens. Cela permet une meilleure surveillance des machines, bien que la mesure des paramètres puisse être complexe et coûteuse en fonctionnement. Généralement réservée aux équipements vitaux et sujets à des pannes coûteuses, cette approche répond à la norme AFNOR X-60010 en tant que « une maintenance exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien » (Debbah, 2020).

### **III.4.3.3 Documents de maintenance**

- **Ordre de travail**

L'ordre de travail est élaboré pour rassembler, traiter et organiser en temps opportun toutes les informations liées à une intervention, en parallèle avec la préparation. Son utilité réside dans la saisie des paramètres de contrôle liés à la nature des activités de maintenance, en particulier les échéances et les coûts des services rendus. Il se transforme en un indicateur de comparaison pour identifier les écarts entre les prévisions et les réalisations, et offre aux responsables de la maintenance les données nécessaires pour prendre des décisions et mettre en place des actions correctives visant à répondre de manière optimale aux exigences opérationnelles.

L'ordre de travail peut revêtir une forme permanente ou temporaire. Il est permanent pour des tâches simples, bien connues, répétitives et de courte durée, simplifiant ainsi les tâches administratives liées à la maintenance. Il devient individuel et temporaire lorsqu'il est employé pour autoriser, initier, superviser et suivre des travaux de grande envergure ayant un impact direct sur des considérations de sécurité, de délais d'exécution et de coûts (Bensaada et Feliachi, 2015).

## III.5 Méthodologie

### III.5.1 Analyser les usages du jumeau numérique collaboratif

#### Identification des usages

L'objectif principal de cette étude est d'implémenter un jumeau numérique dédié à la planification des ordres de travaux (OT) préventifs. Le jumeau numérique est envisagé comme un outil destiné à améliorer la visibilité des contraintes et à faciliter la gestion des compromis inhérents à la planification. Dans cette étude, nous mettons en lumière les contraintes inhérentes à la planification de maintenance, c'est-à-dire les défis et obstacles qui se présentent lors de la planification des opérations de maintenance. Plus spécifiquement, nous nous concentrons sur ce que nous appelons la "Visibilité des contraintes". Cela signifie que nous examinons en détail les contraintes qui peuvent surgir lors de la planification, telles que les contraintes liées aux OT et les contraintes d'ordre humain, telles que la disponibilité des techniciens de maintenance, les habilitations requises pour certaines tâches, etc. La classification et la présentation de ces contraintes seront détaillées dans le paragraphe III.5.4.

#### Identification des acteurs de l'activité de planification

Le déploiement du jumeau numérique dans cette étude implique une collaboration avec un principal acteur : le Responsable de Site de Maintenance.

### III.5.2 Appliquer l'architecture actuelle entre Spie et le client

#### Application du modèle 5A au cas d'étude SPIE-Client

**Acquisition** : Au sein de l'environnement SPIE - Client, la gestion de l'architecture des données constitue une tâche complexe qui requiert une attention particulière afin d'assurer une gestion efficace des données. Ce processus comporte plusieurs étapes essentielles. Tout d'abord, il s'agit de procéder à l'acquisition des données, généralement réalisée par le biais de la saisie manuelle dans la GMAO (Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur). Afin de sécuriser le processus d'acquisition des données, une connexion VPN (Virtual Private Network) est établie entre les systèmes de SPIE et du client. Cette connexion sécurisée permet d'établir un canal de communication privé et crypté, empêchant ainsi toute interception ou altération des données pendant leur transmission.

**Agrégation** : Ensuite, intervient l'étape de l'agrégation des données collectées avec d'autres sources de données, afin de créer des modèles dynamiques. Pour ce faire, le logiciel "VisionAlgotech" est utilisé pour faciliter la tâche d'agrégation des données.

**Analyse** : Les modèles ainsi créés sont ensuite soumis à une analyse détaillée, en utilisant différentes méthodes adaptées. Chez SPIE, cette analyse est effectuée à l'aide de l'outil "Power BI", permettant ainsi de détecter des tendances ou des comportements spécifiques.

**Application** : Dans le contexte de notre étude, les modèles de planification des ordres de travail constituent des exemples concrets des principaux modèles utilisés pour l'analyse. Les informations extraites de ces modèles permettent de réajuster les plannings d'intervention et de prioriser les ordres de travaux. Ces connaissances seront ensuite restituées sous forme de tableaux de bord ou de rapports synthétiques.

**Accès** : Cependant, la gestion de l'accès aux données doit être réalisée avec prudence afin de garantir la sécurité et la confidentialité des données stockées. Cette tâche requiert également une attention particulière pour gérer les aspects juridiques et de cybersécurité liés à la gestion des données. Il est donc primordial de mettre en place des mesures appropriées pour prévenir tout accès non autorisé et assurer la conformité aux réglementations en vigueur.

### III.5.3 Sélection de données

Dans la quête essentielle d'assurer que le jumeau numérique soit alimenté en données pertinentes, en vue de générer des informations cruciales pour le Responsable de Site, il devient impératif que ce processus transcende la simple reproduction d'informations préexistantes. Au contraire, il doit insuffler une réelle valeur ajoutée en proposant de nouvelles connaissances ou en offrant une perspective novatrice.

Dans une phase préliminaire, la démarche initiale visait à sélectionner les données pertinentes pour la planification des (OT) préventifs, puis à les hiérarchiser en termes de données, d'informations, et de connaissances. À cette étape, la distinction entre ces termes et leur adaptation au modèle 5A n'étaient pas évidentes. Par conséquent, il s'est avéré nécessaire d'opérer une classification préliminaire entre les données déjà existantes (telles que celles fournies par la GMAO), et les données potentiellement accessibles (qu'elles soient à la portée de l'agent ou qu'elles découlent de nouvelles technologies, comme les capteurs sur le terrain).

### III.5.4 Classement de données

Dans une seconde phase, une différenciation s'est révélée cruciale pour la catégorisation des données en fonction de leurs divers usages. L'objectif principal de cette étude porte sur la visibilité des contraintes.

En ce qui concerne cette visibilité des contraintes, une série de données spécifiques à chaque contrainte a été identifiée. Ces données ont été structurées en diverses catégories, englobant notamment les contraintes techniques, humaines et technologiques. Afin de concrétiser cette distinction, une synthèse des données a été élaborée sous forme de tableau, facilitant ainsi leur compréhension visuelle.

Tableau III. 2: Classification des Données pour la Visibilité des Contraintes.

CONTRAINTES TECHNIQUES	CONTRAINTES HUMAINES	CONTRAINTES TECHNO
<ul style="list-style-type: none"> <li>-Contrainte géographique (multisite)</li> <li>-Transports</li> <li>-Temps d'ouverture des différents sites</li> <li>-Besoin d'équipements supplémentaires</li> <li>-Moyens d'interventions</li> <li>-Degrés de niveau stratégique</li> <li>-Date butoir</li> <li>-Disponibilité des pièces de rechange</li> <li>-Disponibilité de l'équipements du client</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Habitations des techniciens</li> <li>-Intervention avec besoin de compétences</li> <li>-compétences spécifiques (tâches, machines, contrats)</li> <li>-Evaluation subjective du responsable de site (aspects affectifs/émotionnels)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Données issues des modèles prédictives</li> </ul>

<ul style="list-style-type: none"> <li>-Disponibilité des techniciens, organisme contrôle</li> <li>-Durée de l'OT</li> <li>-Type de l'OT</li> <li>-Charges d'OT à réaliser</li> <li>-Conditions météorologiques</li> <li>-Stratégie équipement : vitale, important, secondaire</li> <li>-Connectivité</li> </ul>		
--	--	--

### III.5.5 Filtrage de données

Une fois de plus, une étape de filtrage a été entreprise afin de sélectionner les contraintes les plus pertinentes à conserver. Les données associées à ces différentes contraintes ont été minutieusement évaluées pour déterminer leur existence, leur accessibilité ou leur absence. Dans cette démarche, une réflexion persistante s'est focalisée sur la collecte des données existantes, qu'elles soient acquises directement par le jumeau numérique lui-même.

Les données atteignables, quant à elles, peuvent être alimentées aussi bien par l'utilisateur que par le jumeau numérique. Toutefois, l'origine des données non existantes pose la question de leur provenance, qu'elle soit attribuable au jumeau numérique ou à l'utilisateur.

### III.5.6 Catégorisation des données

Dans le prolongement de notre démarche, nous avons procédé à l'organisation des données pertinentes en plusieurs catégories distinctes. Chacune de ces catégories est corrélée à un ensemble d'informations spécifiques. Les catégories identifiées comprennent "OT", "Responsable de site : représente l'utilisateur du jumeau numérique ", "Environnement : concerne le lieu d'intervention ", "Technicien de maintenance", "Équipement" et "Coactivité : une entité externe relevant de la société ferroviaire ".

Tableau III. 3: Catégorisation des données.

OT	Responsable de site	Environnement
N° désignation Type Durée Échéance Gamme	Nom Expertise Connaissance	Superficie Disponibilité des voies
Technicien de maintenance	Équipement	Coactivité
Nom Compétence Habilitation Emploi du temps	Nom Type Famille AMDEC Performance FMD	Planning maintenance planning intervenants

### III.5.7 Application de la typologie de données

Après avoir accompli la phase de catégorisation des données, la typologie des données a été appliquée à chaque classe de données identifiée de manière groupée, en tenant compte de leurs critères similaires.

Le tableau présenté a été utilisé pour démontrer l'application de cette typologie à la classe dédiée aux "Ordres de Travail" (OT). Cette démarche a permis d'analyser comment les critères de la typologie des données se manifestent au sein de cette classe spécifique. Au cours de cette application, deux nouveaux critères, la "Longévité" et la "Mise à Jour".

Tableau III. 4: Typologie de la donnée appliquée à la classe OT.

CRITERE	Ordre de travail - OT (Actuelle)
SOURCE	GMAO
TYPE	Textuelle (nom), nominale(type), temporelle (date, échéance), opérationnelle (gamme)
VALEUR	Qualitative, Quantitative
ACCES	Conditionnel
CRITICITE	Elevé
STOCKAGE	Local
SYNCHRONISATION	Asynchronous (condition)
LONGEVITE	Long terme
PRECISION	Non applicable
VARIABILITE	Non
MODELE	Modèle de planification de la maintenance
INFORMATION	Besoin : ressource, environnement
CONNAISSANCE	Plan de maintenance ajusté
USAGERS	JN – Responsable de site, ingénieur méthode – logiciel de mobilité
COMMUNICATION	Oui – GMAO (extraction possible : fichier Excel)
MISE A JOUR	Oui, unidirectionnelle

**Longévité :** cette notion englobe la durée pendant laquelle les données seront maintenues dans le système avant de faire l'objet d'une suppression ou d'un archivage, conformément aux politiques de gestion des données de l'entreprise. Elle prend en compte des

facteurs tels que la réglementation en vigueur, les besoins opérationnels et les considérations de sécurité.

**Mise à jour :** ce critère indique si une donnée est sujette à des modifications au fil du temps. Elle reflète la capacité d'une donnée à être actualisée pour tenir compte des évolutions, des corrections ou des ajustements nécessaires dans le contexte de son utilisation.

### **III.5.8 Extension du modèle 5A**

**Acquisition :** Au cours de la phase d'acquisition des données, divers attributs sont associés à chaque ordre de travail.

**Agrégation :** Ces attributs sont agrégés avec d'autres données issues d'autres classes, créant ainsi un modèle de planification complet.

**Analyse :** Parmi les informations extraites, on peut citer la durée de l'OT, l'identité de l'exécutant, et l'emplacement.

**Application :** En se basant sur ces données, l'application peut déclencher des ajustements potentiels dans la planification des ordres de travail, par exemple, en réordonnant les OT en fonction de leur priorité.

**Collaboration au niveau informationnelle :** Après l'exécution d'un OT, il est envisageable que le technicien de maintenance apporte des modifications fondées sur son expertise, réduisant ainsi la durée de l'intervention par rapport au calcul initial effectué par le jumeau numérique. Cette mise à jour d'information peut être transmise de l'utilisateur au jumeau numérique, marquant ainsi la première interaction entre les deux entités.

**Collaboration au niveau des connaissances :** Une deuxième mise à jour éventuelle pourrait impliquer la communication de la gamme de maintenance utilisée, particulièrement si elle diffère de celle qui avait été employée pour effectuer la maintenance préventive de manière plus efficace en termes de temps. Cette situation représente une autre opportunité d'interaction entre le jumeau numérique et l'agent humain, principalement axée sur le partage de connaissances. Ces interactions correspondent aux niveaux d'information et de connaissance du Know-how-to-cooperate (KHC) entre l'agent humain et l'agent technique, symbolisé par le jumeau numérique. Une illustration de l'extension du modèle est présentée dans la (Figure III. 2).

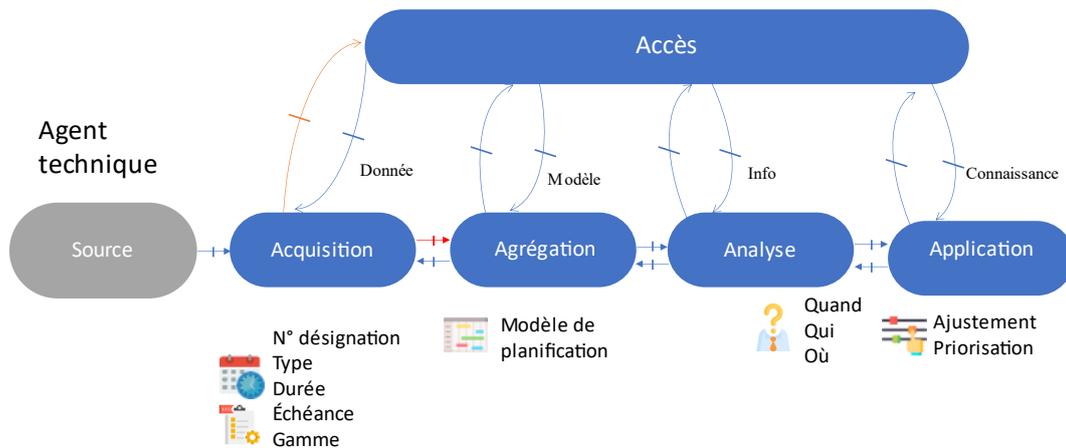


Figure III.2 : Avant la coopération.

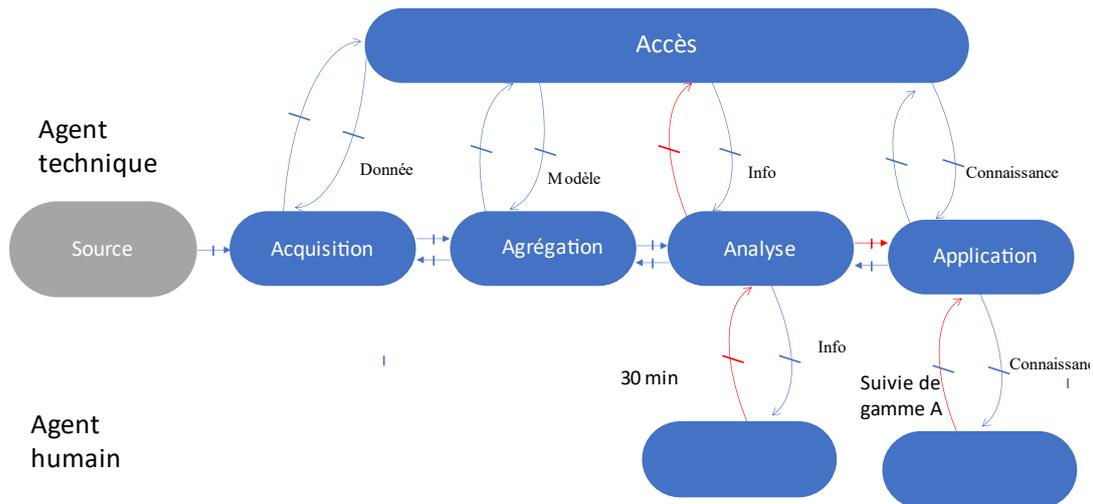


Figure III.3 : Après la coopération.

### III.6 Conclusion

À l'issue de l'analyse approfondie de cette étude de cas, les mécanismes essentiels qui régissent les échanges entre le jumeau numérique et l'agent humain ont été éclaircis. Ces interactions, qu'elles englobent le partage d'informations ou de connaissances, revêtent une importance primordiale pour le bon fonctionnement de ces systèmes hybrides. Il est toutefois crucial de noter avec insistance que le modèle 5A, bien qu'il serve efficacement à la compréhension de ces interactions, ne parvient pas à capturer intégralement leur dimension temporelle.

Par ailleurs, il est impératif de mettre en exergue que le jumeau numérique ne se limite pas à interagir exclusivement avec l'agent humain, qui représente l'élément de l'environnement

### Chapitre 3 Modélisation de l'Interaction Homme-Jumeau Numérique

social. Il entretient également des relations avec l'environnement physique et virtuel, formant ainsi un réseau complexe d'interconnexions. C'est dans ce contexte que sera abordée, dans le quatrième chapitre de cette étude, la modélisation de ces interactions à travers les trois environnements distincts, ainsi que l'évolution du jumeau numérique en réponse à ces interactions tout au long de son cycle de vie.

# **IV. Chapitre 4**

## **Modélisation de l'Interaction Tri- dimensionnelle du Jumeau Numérique**

## IV.1 Introduction

Le jumeau numérique, en tant que système cyber-physique, évolue en interagissant avec trois environnements distincts : l'environnement physique, l'environnement virtuel et l'environnement social. Cette étude vise à analyser en profondeur ces interactions et à définir leur nature, au sein du modèle 5D de (Tao et al. 2019) les "Connexions" représentent les liens et les interactions entre les différentes entités du jumeau numérique, englobant les relations entre les entités physiques et virtuelles, les interactions entre les modèles, ainsi que les flux d'informations et de données entre les différents composants du jumeau numérique. Toutefois, ce modèle ne fournit pas de détails sur la dynamique de ces interactions ni sur l'évolution du jumeau numérique tout au long de son cycle de vie.

Pour combler cette lacune, ce chapitre introduit un modèle dynamique élaboré qui illustre de manière précise les interactions du jumeau numérique avec ses trois environnements. Nous nous appuyons sur une étude de cas basée sur une entreprise agroalimentaire spécialisée dans la fabrication de gâteaux, où le jumeau numérique déployé représente un jumeau process. Cette analyse approfondie nous permettra de comprendre comment le jumeau numérique interagit avec l'environnement physique, évolue en parallèle avec le cycle de vie de l'élément qu'il représente, intègre les connaissances de son collaborateur humain, et interagit avec divers logiciels et autres éléments de l'environnement virtuel.

## IV.2 Cas d'étude

Aujourd'hui, une des préoccupations de l'industrie agroalimentaire en pâtisserie est la contamination fongique. Pour remédier à ce problème, des additifs sont ajoutés avant l'emballage pour limiter cette contamination. Quelques industries ont adopté le concept de « Clean Label » (plus produits naturels sans additifs chimiques) comme notre partenaire avec lequel nous menons cette étude de cas. L'objectif ici, est de mettre en place un jumeau numérique de la chaîne de production, qui pourra qualifier et prédire le risque de contamination d'un lot de gâteaux pour éviter l'utilisation d'additifs chimiques. La typologie de l'étape de configuration, telle qu'exposée dans le chapitre 2, a été appliquée pour une meilleure appréhension du profil du jumeau numérique dans ce cas d'étude (Tableau IV. 1).

Tableau IV.1 : Typologie appliquée à un cas d'étude.

Critère	
Entité JN (OME)	Ligne de production
Version	Primaire - interne
Type	Instance
Niveau	Système
Maturité	Contrôle - Cognitif
Topologie	Connecté disjoint
Boucle de décision	Ouverte - fermé
Taux de jumelage	Synchrone
Précision	Probabilité de contamination
Modélisation	Mixte
Usager	Humain – logiciel/ application
Usages	Analyse – cognition - comparaison
Application	Contrôle en temps réel- aide à la décision

### IV.3 Méthodologie

L'objectif central de cette initiative est de créer des modèles dynamiques, évolutifs et épurés. Cette démarche démarre par la conception méticuleuse de modèles détaillés et de diagrammes techniques visant à saisir toutes les nuances et interactions spécifiques. Par la suite, une perspective globale est adoptée pour élaborer un modèle générique, un schéma abstrait qui synthétise les éléments clés et les processus impliqués.

Cette approche vise à favoriser la clarté, la flexibilité et la sophistication pour une meilleure compréhension du fonctionnement du jumeau numérique et de son évolution au sein de son cycle de vie, en tenant compte de ses interactions.

#### IV.3.1 Diagramme de séquence

- Notions de base

Dans l'ouvrage de (*Roques, 2013*), le diagramme de séquence est défini comme un schéma qui illustre la séquence verticale des messages échangés entre des entités (lignes de vie) au sein d'une interaction.

- Ligne de vie

La représentation de l'existence d'une entité participante dans un diagramme de séquence est appelée une ligne de vie. Une ligne de vie est caractérisée par un nom et un type, et elle est symbolisée graphiquement par une ligne verticale en pointillés.

- Message

Un message est un élément de communication unidirectionnel entre des lignes de vie, déclenchant une action chez le destinataire. Lorsqu'un message est reçu, il provoque un événement chez le récepteur. Une flèche pointillée indique un retour, signifiant que le message en question est la conséquence directe du message précédent.

Un message synchrone, où l'émetteur attend une réponse, est représenté par une flèche pleine, tandis qu'un message asynchrone est symbolisé par une flèche évidée. Une flèche en boucle (message réflexif) est utilisée pour décrire un comportement interne.

- Activation

Les bandes verticales le long d'une ligne de vie représentent des périodes d'activation, bien que leur utilisation soit facultative. Elles aident à mieux comprendre la flèche pointillée du message de retour, mais dans un souci de simplicité, elles sont généralement omises.

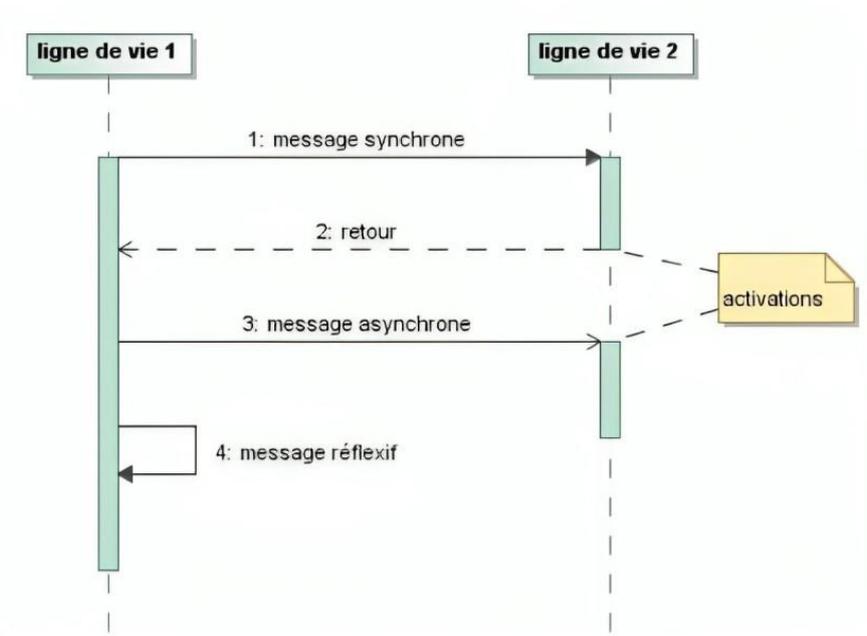


Figure IV.1 : Notions de base diagramme de séquence (Roques, 2013).

- Fragment

Un fragment, au sein de la modélisation de scénarios, constitue une unité élémentaire qui peut être insérée de diverses manières dans un scénario global. Chaque fragment est assorti d'un opérateur, et parmi les opérateurs les plus couramment employés, on trouve :

"Loop" ou "boucle" : Ce type de fragment est capable d'itérer plusieurs fois en fonction d'une condition spécifiée au préalable. Il permet ainsi de modéliser des boucles d'exécution au sein d'un scénario, où une séquence d'actions se répète tant que la condition demeure vraie.

"Opt" ou "optionnel" : L'opérateur "opt" indique que le fragment sera exécuté uniquement si une condition particulière est validée. Dans le cas contraire, il peut être omis, ce qui autorise la représentation de branches optionnelles au sein d'un scénario.

"Alt" ou "alternatif" : L'opérateur "alt" est utilisé pour décrire des alternatives au sein d'un scénario. Parmi plusieurs fragments alternatifs, seul celui dont la condition est évaluée comme vraie sera exécuté. Cette fonction permet de représenter diverses voies possibles dans un scénario, en fonction de conditions spécifiques.

"Par" ou "parallèle" : L'opérateur "par" est mis en œuvre lorsque plusieurs fragments doivent être exécutés simultanément, c'est-à-dire en parallèle. Cette fonction est employée pour représenter des activités concurrentes ou simultanées au sein d'un scénario.

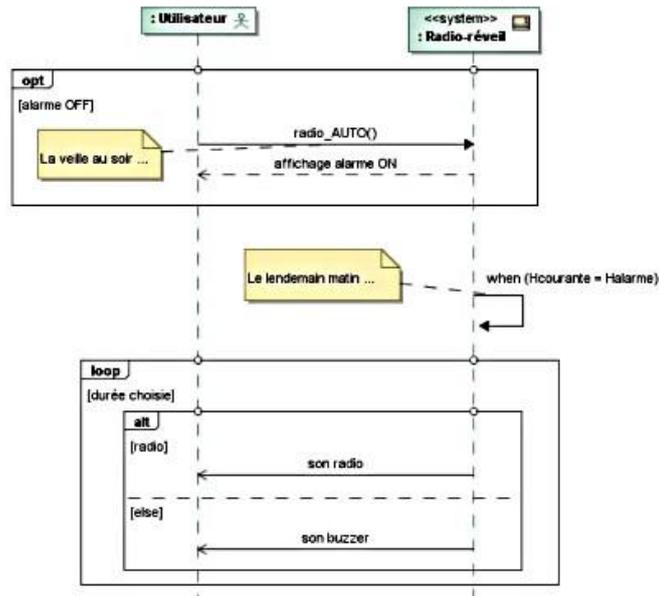


Figure IV.2 : Exemple de fragments (Roques, 2013).

### IV.3.2 Application diagramme de séquence

Il est important de noter que le diagramme de séquence présenté ci-dessous ne représente pas nécessairement la réalité exacte des opérations, mais plutôt une simulation plausible basée sur le scénario envisagé.

Lors de la mise en œuvre du diagramme de séquence, une étape fondamentale a été l'identification préalable des parties prenantes qui allaient interagir entre elles. Ces parties prenantes incluent le jumeau numérique, l'agent humain, VE (environnement virtuel) et PE (environnement physique ; l'entité physique représentant le jumeau numérique étant l'élément clé de l'environnement physique, et dans cette étude, nous nous sommes spécifiquement concentrés sur cette entité physique).

Le processus débute par l'authentification de l'agent humain auprès de VE, qui, dans notre cas, incarne le logiciel MES. Une fois cette étape d'authentification réussie, l'utilisateur est dirigé vers la plateforme, où il active le jumeau numérique. Ce dernier confirme ensuite formellement son activation.

Afin que le jumeau numérique puisse effectuer des prédictions sur la probabilité de contamination, il est impératif qu'il collecte des données provenant des capteurs présents sur la ligne de production, laquelle représente l'élément physique central de l'étude. Pour ce faire, le MES initie une requête auprès du PE en vue d'obtenir les données des capteurs. Une fois que le PE a transmis ces données, elles sont ensuite acheminées vers le jumeau numérique par le biais d'un transfert effectué depuis le MES. Nous présumons que ce processus de requête se déclenche de manière automatique à des intervalles de temps prédéfinis, notés T.

Suite à l'acquisition des données indispensables, le jumeau numérique procède à l'élaboration du calcul de la probabilité de taux de contamination. Cette information est ensuite diffusée à travers la plateforme. Dans le cas où le taux calculé s'avère inférieur au seuil de tolérance préalablement établi, aucune mesure n'est entreprise. En revanche, si le taux dépasse ce seuil critique, le MES prend immédiatement la décision d'interrompre la ligne de production. Par la suite, une demande d'autorisation est formulée par le MES en vue de rediriger la ligne de production vers un bac de stockage spécifique, où les produits seront conservés au moyen d'un

procédé de conservation industriel conventionnel. L'octroi de cette autorisation dépend de certains paramètres. Dans le cas où l'autorisation est accordée, les produits sont alors dirigés vers le bac approprié. Dans le cas contraire, aucune mesure n'est déclenchée.

Un diagramme de séquence illustrant de manière détaillée cette procédure peut être examiné à la figure (Figure IV. 1).

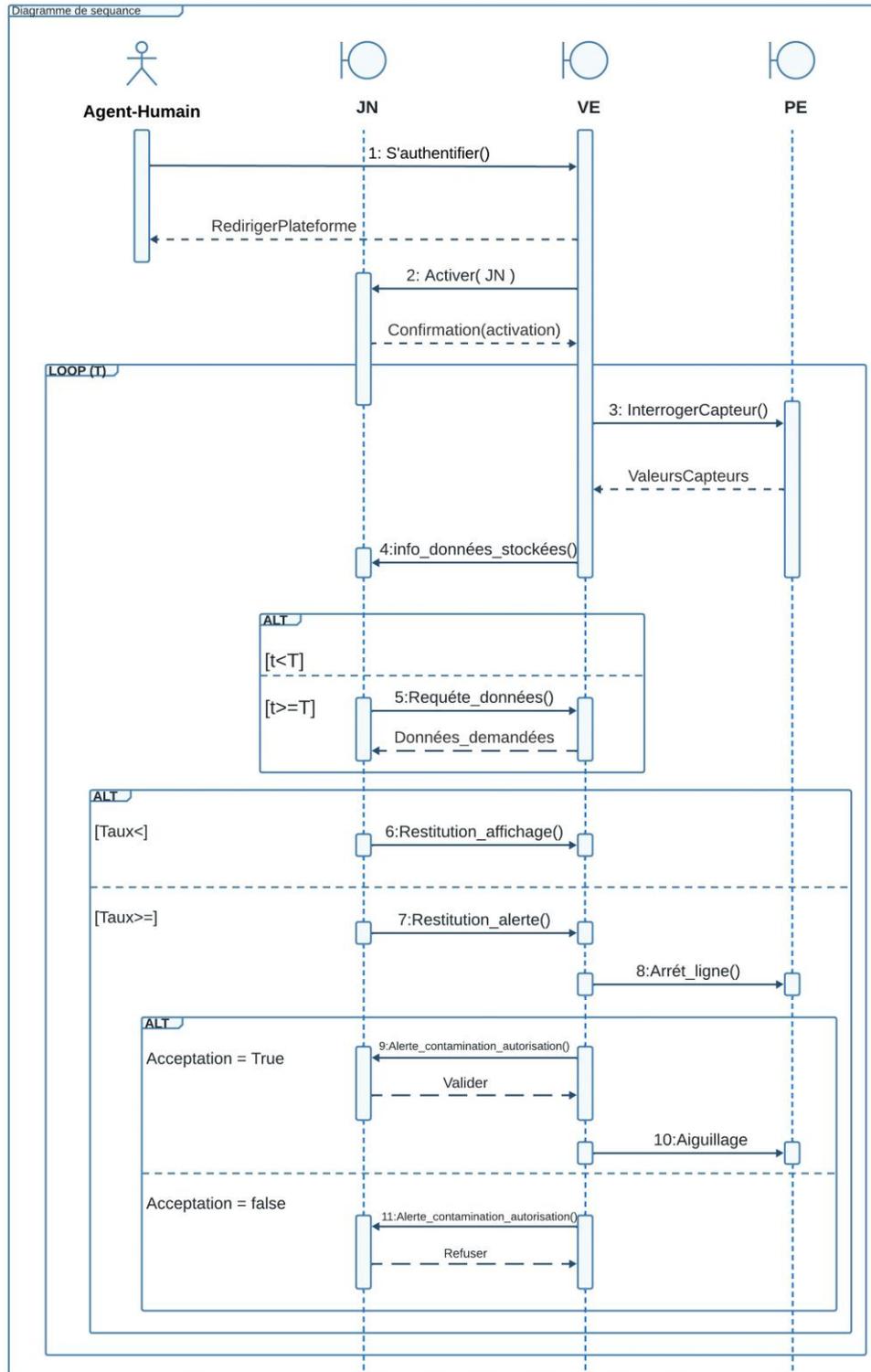


Figure IV.3 : Application du diagramme de séquence au cas d'étude.

### IV.3.3 Identification des interactions

À la suite de l'application du diagramme de séquence, un outil qui s'est avéré particulièrement efficace pour représenter en détail les interactions et les échanges entre les divers acteurs, nous avons procédé à une analyse approfondie. Notre objectif était d'identifier les caractéristiques et les différentes catégories d'interventions qui se manifestent entre chaque entité participant à l'interaction.

Par ailleurs, nous avons complété cette liste en ajoutant d'autres interventions, telles que mises en évidence dans l'étude de cas présentée dans le chapitre 3. Vous trouverez dans les tableaux ci-dessous la liste complète des interventions identifiées.

**Tableau IV.2 : Interactions de l'Agent Humain (AH) vers le Jumeau Numérique (JN) ou l'Environnement Virtuel (VE).**

<b>Interaction</b>	<b>Description</b>
S'authentifier	L'agent humain s'authentifie auprès du jumeau numérique ou de l'environnement virtuel.
Observer	L'agent humain observe des informations du jumeau numérique ou de l'environnement virtuel.
Être alerté	L'agent humain reçoit des alertes du jumeau numérique ou de l'environnement virtuel.
Valider / approuver une décision	L'agent humain valide ou approuve une décision du jumeau numérique ou de l'environnement virtuel.
Prendre/ suggérer/ construire des solutions	L'agent humain prend, suggère ou construit des solutions en interaction avec le jumeau numérique ou l'environnement virtuel.
Alimenter par informations et connaissances	L'agent humain alimente le jumeau numérique ou l'environnement virtuel en informations et connaissances.
Mettre à jour	L'agent humain met à jour le jumeau numérique.

**Tableau IV.3 : Interaction du jumeau numérique ou de l'environnement virtuel vers l'agent humain.**

<b>Interaction</b>	<b>Description</b>
Restituer (JN – VE)	Le jumeau numérique restitue des informations à l'environnement virtuel.
Monter en compétences (JN – AH)	Le jumeau numérique contribue à l'amélioration des compétences de l'agent humain.

Tableau IV.4 : Interactions entre l'Environnement Virtuel (VE) et l'Environnement virtuel (VE).

Interaction	Description
Échange de données (VE – JN) (JN – VE)	Échanges de données entre l'environnement virtuel et le jumeau numérique.
Restitution de donnée	Restitution de données du jumeau numérique vers l'environnement virtuel
Mise à jour	Mise à jour des données entre l'environnement virtuel et le jumeau numérique.

Tableau IV.5 : Interactions entre l'Agent Humain (AH) et l'Environnement Physique (PE).

Interaction	Description
Conscience situationnelle	L'agent humain prend conscience de la situation dans l'environnement physique grâce à ses cinq sens.
Agir	L'agent humain prend des mesures ou agit en réponse à la situation dans l'environnement physique

Tableau IV.6 : Interactions entre l'Environnement Virtuel (VE) et l'Environnement Physique (PE).

Interaction	Description
Acquisition des données	L'environnement virtuel acquiert des données de l'environnement physique.
Rétroaction / correction	L'environnement virtuel fournit une rétroaction ou effectue des corrections en fonction des données de l'environnement physique.
Action préventive	L'environnement virtuel prend des mesures préventives en réponse aux données de l'environnement physique.

#### IV.3.4 Modèle d'interaction générique

Après avoir identifié les interactions du jumeau numérique avec les trois axes environnementaux, la démarche suivante visait à adopter une approche plus globale et générique pour modéliser ces interactions. Ce modèle conceptuel est présenté de manière schématique dans la figure ci-dessous, où les annotations numériques sont utilisées pour identifier des composants spécifiques. Les détails des annotations sont expliqués dans le tableau correspondant.

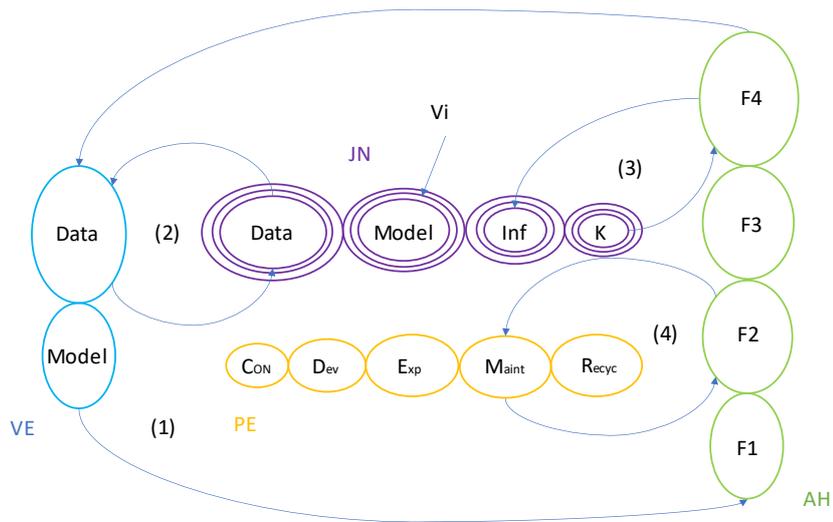


Figure IV.4 : Modèle d'interaction (1).

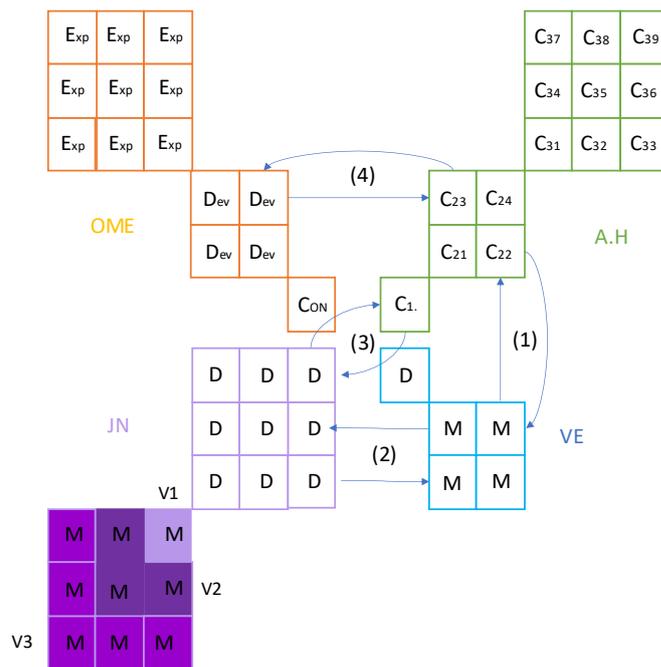


Figure IV.5 : Modèle d'interaction (2).

Tableau IV.7 : Annotations numériques.

Annotation	Explication
<b>Interactions</b>	
<b>(1)</b>	Agent humain – environnement virtuel.

(2)	Jumeau numérique – environnement virtuel.
(3)	Agent humain jumeau numérique.
(4)	Agent humain – environnement physique
<b>Cycle de vie de l'entité physique (OME)</b>	
<b>Con</b>	Phase de conception
<b>Dev</b>	Phase de développement
<b>Expo</b>	Phase d'exploitation
<b>Main</b>	Phase de maintenance
<b>Recyc</b>	Phase de recyclage
<b>Jumeau numérique (JN)</b>	
<b>Vi</b>	Version
<b>Data/D</b>	Donnée
<b>Model/M</b>	Modèle
<b>Inf</b>	Information
<b>K</b>	Connaissance
<b>Agent humain (AH)</b>	
<b>Fi</b>	Fonction
<b>Cii</b>	Compétence

#### IV.4 Conclusion

La conclusion de ce chapitre met en lumière les complexités liées à la modélisation des interactions du jumeau numérique avec les trois axes environnementaux, ainsi que son évolution tout au long de son cycle de vie.

Nous avons examiné l'écosystème composé d'un objet physique, d'un opérateur humain et du jumeau numérique en tant qu'outil et d'un environnement virtuel. Initialement, l'opérateur humain exprime un besoin spécifique pour utiliser l'objet physique, ce qui déclenche la conception du jumeau numérique. Ce dernier intègre des modèles et des données provenant de ses interactions avec l'environnement physique, l'environnement social et l'environnement virtuel

Nous avons constaté que le jumeau numérique peut évoluer, notamment en ce qui concerne ses usages, ses modèles et ses données. Les changements d'usage peuvent entraîner des modifications qualitatives ou quantitatives des modèles et des données. Ces évolutions

peuvent découler soit d'un changement dans le cycle de vie de l'objet physique, soit d'une adaptation des compétences de l'opérateur humain.

Plus précisément, nous avons observé que l'amélioration de la précision des modèles, par exemple grâce à une quantité accrue de données, peut entraîner une mise à jour du jumeau numérique, même en l'absence de changements d'usage. De plus, cette évolution du jumeau numérique peut contribuer à l'amélioration des compétences de l'opérateur humain grâce aux retours d'informations formalisés.

Cette étude souligne la nécessité d'une approche flexible pour modéliser et gérer les versions du jumeau numérique, en prenant en compte à la fois les évolutions de ses usages et l'amélioration de la précision de ses modèles, afin de garantir une adaptation efficace aux besoins changeants de l'opérateur humain et de l'objet physique.

# **Conclusion générale et perspectives**

## Conclusion générale et perspectives

Au fil de ce mémoire, nous avons consolidé les découvertes et les avancées substantielles provenant des quatre chapitres précédents. Au cœur de cette étude, le jumeau numérique s'est révélé comme une innovation de première importance au sein de l'ère de la transition numérique. Notre exploration a mis en relief son rôle majeur en tant que catalyseur primordial de l'innovation et de la transformation, transcendant divers domaines tels que la médecine et les villes intelligentes.

Néanmoins, le tableau qui se dessine n'est pas exempt de défis. L'établissement de normes et de modèles communs demeure une entreprise complexe, mais cruciale pour une intégration harmonieuse de cette technologie dans un environnement numérique en constante évolution.

Le deuxième chapitre a souligné l'impérieuse nécessité de méthodologies rigoureuses, à l'instar de la méthodologie 5C, pour guider le développement des jumeaux numériques tout en maintenant leur adaptabilité à des applications spécifiques. En outre, nous avons mis en avant l'importance vitale de la gestion agile du cycle de vie des données, garantissant ainsi la qualité et la pertinence de ces dernières.

Le troisième chapitre a éclairci les mécanismes sous-jacents aux interactions entre le jumeau numérique et l'agent humain. Cependant, nous avons reconnu que l'extension du modèle 5A, bien qu'instructif, n'appréhende pas entièrement la dimension temporelle de ces échanges. De plus, nous avons souligné que le jumeau numérique entretient des relations complexes non seulement avec l'agent humain, mais également avec les environnements physique, virtuel et social, créant ainsi un réseau d'interconnexions complexe. Les travaux futurs se focaliseront sur l'acquisition d'une perspective détaillée à l'échelle microscopique de chaque étape cruciale du modèle 5A, en se penchant attentivement sur les données spécifiques. Cela englobe l'identification des formalismes appropriés pour chaque phase, y compris les normes, les modèles et les conventions, ainsi que la sélection des outils techniques adéquats pour mettre en œuvre ces formalismes.

Le quatrième chapitre a mis en lumière les complexités inhérentes à la modélisation des interactions du jumeau numérique avec les trois axes environnementaux, ainsi que son évolution tout au long de son cycle de vie. Nous avons constaté que les mises à jour du jumeau numérique peuvent découler de modifications d'usage ainsi que de l'amélioration de la précision des modèles, contribuant ainsi à l'élévation des compétences de l'opérateur humain. Les recherches à venir se concentreront sur l'élaboration d'une approche hautement adaptable en ce qui concerne la modélisation et la gestion des différentes versions du jumeau numérique. Cette démarche consistera à tenir compte simultanément des évolutions observées dans son utilisation, ainsi que des améliorations apportées à la précision de ses modèles. L'objectif ultime sera de garantir une adaptation efficace du jumeau numérique aux besoins évolutifs de l'opérateur humain et de l'objet physique. En parallèle, ces travaux se pencheront attentivement sur la problématique de la conversion des données. Cela englobera la gestion des données non structurées, structurées et semi-structurées, dans le cadre de leur transfert entre le jumeau numérique et l'environnement virtuel associé.

# REFERENCES

# REFERENCES

- AARON, Parrott et LANE, Warshaw. Industry 4.0 and the digital twin. *Deloitte Anjin Review*, 2017, vol. 9, p. 64-72.
- AFNOR, Maintenance. Concepts et définitions des activités de maintenance. Norme Nf X, 2010, p. 60-010.
- AKHTAR, Pervaiz, KHAN, Zaheer, TARBA, Shlomo, *et al.* The Internet of Things, dynamic data and information processing capabilities, and operational agility. *Technological Forecasting and Social Change*, 2018, vol. 136, p. 307-316.
- AKOUR, Mohammad et ALENEZI, Mamdouh. Higher Education Future in the Era of Digital Transformation. *Education Sciences*, 2022, vol. 12, no 11, p. 784.
- ALLEMAN, R. What is digital twin technology? 3 ways it's changing the world. Available Online in: <https://jive.com/resources/blog/whatis-digital-twin-technology>, 2016.
- BAHETI, Radhakisan et GILL, Helen. Cyber-physical systems. *The impact of control technology*, 2011, vol. 12, no 1, p. 161-166.
- BHRIN, Mohd Aiman Kamarul, OTHMAN, Mohd Fauzi, AZLI, Nor Hayati Nor, *et al.* Industry 4.0: A review on industrial automation and robotic. *Jurnal teknologi*, 2016, vol. 78, no 6-13.
- BLANCHET, Alexandre, JULIEN, Nathalie, et HAMZAOU, Mohammed Adel. Typology as a deployment tool for digital twins: application to maintenance in industry. In : *32nd European Safety and Reliability Conference (ESREL 2022)*. 2022.
- BOKOLO, Anthony, PETERSEN, Sobah Abbas, et HELFERT, Markus. Improving Digitization of Urban Mobility Services with Enterprise Architecture. *Digital Transformation in Norwegian Enterprises*, 2022, p. 135.
- BOLTON, A., ENZER, M., SCHOOLING, J., *et al.* The Gemini Principles: Guiding values for the national digital twin and information management framework. *Centre for digital built britain and digital framework task group*, 2018.
- BOSCHERT, Stefan et ROSEN, Roland. Digital twin—the simulation aspect. *Mechatronic futures: Challenges and solutions for mechatronic systems and their designers*, 2016, p. 59-74.
- BOUSAADA, S. et D. FELIACHI. *Maintenance industrielle*. Alger : OPU, 2015. ISBN 978.9961.0.0565.1.
- CHO, Hyo Sung et WOO, Tae Ho. Cyber security in nuclear industry—Analytic study from the terror incident in nuclear power plants (NPPs). *Annals of Nuclear Energy*, 2017, vol. 99, p. 47-53.
- CONNER, Brett P., MANOGHARAN, Guha P., MARTOF, Ashley N., *et al.* Making sense of 3-D printing: Creating a map of additive manufacturing products and services. *Additive manufacturing*, 2014, vol. 1, p. 64-76.
- CUNHA, Henrique, LOUREIRO, Dália, SOUSA, Gonçalo, *et al.* A comprehensive water balance methodology for collective irrigation systems. *Agricultural Water Management*, 2019, vol. 223, p. 105660.

- DALENOGARE, Lucas Santos, BENITEZ, Guilherme Brittes, AYALA, Néstor Fabián, *et al.* The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance. *International Journal of production economics*, 2018, vol. 204, p. 383-394.
- DEBBAH Y., *Cours de gestion de la maintenance industrielle*, ISTA, Université de constantine-1, 2020
- DEMBSKI, Fabian, WÖSSNER, Uwe, LETZGUS, Mike, *et al.* Urban digital twins for smart cities and citizens: The case study of Herrenberg, Germany. *Sustainability*, 2020, vol. 12, no 6, p. 2307.
- FRAMLING, Kary, *et al.* *Product agents for handling information about physical objects*: Report of Laboratory of Information Processing Science Series B, TKO-B 153.03 (2003).
- FRAZIER, William E. Metal additive manufacturing: a review. *Journal of Materials Engineering and performance*, 2014, vol. 23, p. 1917-1928.
- GABRIEL, Marc. *Maintenance assistée par ordinateur*. Masson, 1985.
- GALLALA, Abir, KUMAR, Atal Anil, HICHRI, Bassem, *et al.* Digital Twin for human–robot interactions by means of Industry 4.0 Enabling Technologies. *Sensors*, 2022, vol. 22, no 13, p. 4950.
- GELERNTER, David. *Mirror worlds: Or the day software puts the universe in a shoebox... How it will happen and what it will mean*. Oxford University Press, 1993.
- GELY, Corentin, TRENTESAUX, Damien, PACAUX-LEMOINE, Marie-Pierre, *et al.* Human-machine cooperation with autonomous CPS in the context of industry 4.0: a literature review. *Service Oriented, Holonic and Multi-Agent Manufacturing Systems for Industry of the Future: Proceedings of SOHOMA 2020*, 2021, p. 327-342.
- GLAESSGEN, Edward et STARGEL, David. The digital twin paradigm for future NASA and US Air Force vehicles. In : *53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC structures, structural dynamics and materials conference 20th AIAA/ASME/AHS adaptive structures conference 14th AIAA*. 2012. p. 1818.
- GLAESSGEN, Edward et STARGEL, David. The digital twin paradigm for future NASA and US Air Force vehicles. In : *53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC structures, structural dynamics and materials conference 20th AIAA/ASME/AHS adaptive structures conference 14th AIAA*. 2012. p. 1818.
- GOCKEL, Brian, TUDOR, Andrew, BRANDYBERRY, Mark, *et al.* Challenges with structural life forecasting using realistic mission profiles. In : *53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC structures, structural dynamics and materials conference 20th AIAA/ASME/AHS adaptive structures conference 14th AIAA*. 2012. p. 1813.
- GRIEVES, Michael et VICKERS, John. Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. *Transdisciplinary perspectives on complex systems: New findings and approaches*, 2017, p. 85-113.
- GRIEVES, Michael. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication. *White paper*, 2014, vol. 1, no 2014, p. 1-7.
- GUISAN, Antoine et ZIMMERMANN, Niklaus E. Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological modelling*, 2000, vol. 135, no 2-3, p. 147-186.

- HADDAD, Etienne. *Création d'un jumeau numérique d'un système de réfrigération et validation expérimentale: application à la détection de fuites*. 2021. Thèse de doctorat. Université Paris sciences et lettres.
- HAMZAoui, Mohammed Adel et JULIEN, Nathalie. Social Cyber-Physical Systems and Digital Twins Networks: A perspective about the future digital twin ecosystems. *IFAC-PapersOnLine*, 2022, vol. 55, no 8, p. 31-36.
- HAMZAoui, Mohammed Adel, JULIEN, Nathalie, “Chapter A generic deployment methodology for Digital Twins – First building blocks” in *Digital Twin Handbook*, CRC Press, forthcoming 2023.
- HAUG, Katharina Candel, KRETSCHMER, Tobias, et STROBEL, Thomas. Cloud adaptiveness within industry sectors—Measurement and observations. *Telecommunications policy*, 2016, vol. 40, no 4, p. 291-306.
- HE, Zhimin, CHANG, Tao, LU, Siyu, *et al.* Research on human-computer interaction technology of wearable devices such as augmented reality supporting grid work. *Procedia Computer Science*, 2017, vol. 107, p. 170-175.
- HEDELIND, Mikael et JACKSON, Mats. How to improve the use of industrial robots in lean manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 2011, vol. 22, no 7, p. 891-905.
- HEINEMANN, Gerrit, GEHRCKENS, H. Mathias, WOLTERS, Uly J., *et al.* (ed.). *Digitale transformation oder digitale disruption im handel: Vom point-of-sale zum point-of-decision im digital commerce*. Springer-Verlag, 2016.
- <https://www.spie.com/fr/a-propos-de-spie> (consulté le 26/05/2023)
- ISO/DIS 23247-1. Automation systems and integration—digital twin framework for manufacturing—Part 1: overview and general principles. 2020.
- JASIULEWICZ-KACZMAREK, Małgorzata et GOLA, Arkadiusz. Maintenance 4.0 technologies for sustainable manufacturing-an overview. *IFAC-PapersOnLine*, 2019, vol. 52, no 10, p. 91-96.
- JI, Wei et WANG, Lihui. Big data analytics based fault prediction for shop floor scheduling. *Journal of Manufacturing Systems*, 2017, vol. 43, p. 187-194.
- JULIEN, Nathalie et HAMZAoui, Mohammed Adel. Integrating Lean Data and Digital Sobriety in Digital Twins Through Dynamic Accuracy Management. In : *International Workshop on Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing*. Cham : Springer International Publishing, 2022. p. 107-117.
- JULIEN, Nathalie et MARTIN, Eric. How to characterize a digital twin: a usage-driven classification. *IFAC-PapersOnLine*, 2021, vol. 54, no 1, p. 894-899.
- JULIEN, Nathalie et MARTIN, Eric. Typology of manufacturing Digital Twins: a first step towards a deployment methodology. In : *International Workshop on Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing*. Cham : Springer International Publishing, 2021. p. 161-172.
- K. Panetta, Top 10 strategic technology trends for 2018: digital twins, Available from: <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartner-top-10-strategic-technology-trends-for-2018/>.

- KAGERMANN, Henning, LUKAS, Wolf-Dieter, et WAHLSTER, Wolfgang. Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution. *VDI nachrichten*, 2011, vol. 13, no 1, p. 2-3.
- KAGERMANN, Henning, WAHLSTER, Wolfgang, et HELBIG, Johannes. Deutschlands zukunft als produktionsstandort sichern. *Umsetzungsempfehlungen für das zukunftsprojekt industrie*, 2013, vol. 4.
- KAMOISE, Naomi, JULIEN, Nathalie, et GUÉRIN, Clément. Jumeau numérique collaboratif pour la planification des Ordres de Travail préventifs. In : *Doctoriales 2023*. 2023.
- KOZAK, L. M., KOVALENKO, A. S., KRYVOVA, O. A., *et al.* Digital transformation in medicine: from formalized medical documents to information technologies of digital medicine. *Кибернетика и вычислительная техника*, 2018.
- LEE, Edward A. Cyber physical systems: Design challenges. In : *2008 11th IEEE international symposium on object and component-oriented real-time distributed computing (ISORC)*. IEEE, 2008. p. 363-369.
- LEE, Jay, LAPIRA, Edzel, BAGHERI, Behrad, *et al.* Recent advances and trends in predictive manufacturing systems in big data environment. *Manufacturing letters*, 2013, vol. 1, no 1, p. 38-41.
- LEVINS, Richard. The strategy of model building in population biology. *American scientist*, 1966, vol. 54, no 4, p. 421-431.
- LI, Jialong, HUANG, Xiaoling, WU, Chanwen, *et al.* How can blockchain shape digital transformation: a scientometric analysis and review for financial services. In : *2020 Management Science Informatization and Economic Innovation Development Conference (MSIED)*. IEEE, 2020. p. 264-267.
- LIU, Qiang, ZHANG, Hao, LENG, Jiewu, *et al.* Digital twin-driven rapid individualised designing of automated flow-shop manufacturing system. *International Journal of Production Research*, 2019, vol. 57, no 12, p. 3903-3919.
- LIU, Xin, JIANG, Du, TAO, Bo, *et al.* A systematic review of digital twin about physical entities, virtual models, twin data, and applications. *Advanced Engineering Informatics*, 2023, vol. 55, p. 101876.
- LIU, Yang, PENG, Yu, WANG, Bailing, *et al.* Review on cyber-physical systems. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2017, vol. 4, no 1, p. 27-40.
- MARTIN, Genevieve, MARTY, Christophe, BORNOFF, Robin, *et al.* Luminaire digital design flow with multi-domain digital twins of LEDs. *Energies*, 2019, vol. 12, no 12, p. 2389.
- MOREIRA, Madalena, MOURATO, Sandra, RODRIGUES, Carlos, *et al.* Building a Digital Twin for the Management of Pressurised Collective Irrigation Systems. In : *International Conference on Water Energy Food and Sustainability*. Cham : Springer International Publishing, 2021. p. 785-795.
- NEFTI, Doha, HAMZAOUI, Mohammed Adel, JULIEN, Nathalie, *et al.* Aide à la conception de l'architecture d'un jumeau numérique par la modélisation des données. In : *CIGI QUALITA MOSIM 2023 Propulser la performance*. 2023.

- PACAUX-LEMOINE, M. P. et DEBERNARD, S. Common work space for human–machine cooperation in air traffic control. *Control Engineering Practice*, 2002, vol. 10, no 5, p. 571-576.
- PESANTEZ, Jorge E., ALGHAMDI, Faisal, SABU, Shreya, *et al.* Using a digital twin to explore water infrastructure impacts during the COVID-19 pandemic. *Sustainable Cities and Society*, 2022, vol. 77, p. 103520.
- PFEIFFER, Sabine. The vision of “Industrie 4.0” in the making—a case of future told, tamed, and traded. *Nanoethics*, 2017, vol. 11, no 1, p. 107-121.
- PIETER, van S. Digital Twin Capabilities Periodic Table: A Digital Twin Consortium User Guide. *Digital Twin Consortium*, 2022.
- ROQUES, Pascal. *Modélisation de systèmes complexes avec SysML*. Editions Eyrolles, 2013.
- RÜBMANN, Michael, LORENZ, Markus, GERBERT, Philipp, *et al.* Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries. *Boston consulting group*, 2015, vol. 9, no 1, p. 54-89.
- SEELE, Peter. Predictive Sustainability Control: A review assessing the potential to transfer big data driven ‘predictive policing’ to corporate sustainability management. *Journal of cleaner production*, 2017, vol. 153, p. 673-686.
- SHAFITO, Mike, CONROY, Mike, DOYLE, Rich, *et al.* Modeling, simulation, information technology & processing roadmap. *National Aeronautics and Space Administration*, 2012, vol. 32, no 2012, p. 1-38.
- SHARPE, Peter JH, *et al.* Forest modeling approaches: compromises between generality and precision. *Process Modeling of Forest Growth Responses to Environmental Stress*. Timber Press, Portland, OR, 1990, p. 180-190.
- Smart Manufacturing Association of China Association for Science and Technology, Smart Manufacturing Association of China Association for Science and Technology releases ‘the top ten scientific and technological advances for smart manufacturing in the world’ and ‘the top ten scientific and technological advances for smart manufacturing in China’, Available from: <http://www.cast.org.cn/n200705/n202961/n202993/c57776269/content.html>.
- STARK, John. *Digital transformation of industry*. Springer International Publishing, 2020.
- SU, Kehua, LI, Jie, et FU, Hongbo. Smart city and the applications. In : *2011 international conference on electronics, communications and control (ICECC)*. IEEE, 2011. p. 1028-1031.
- TAO, Fei, QI, Qinglin, WANG, Lihui, *et al.* Digital twins and cyber–physical systems toward smart manufacturing and industry 4.0: Correlation and comparison. *Engineering*, 2019, vol. 5, no 4, p. 653-661.
- TOYMENTSEVA, I. A., CHICHKINA, V. D., et SHAFIEVA, M. A. Digital Transformation of Transport Logistics Under Current Conditions. In : *Digital Technologies in the New Socio-Economic Reality*. Springer International Publishing, 2022. p. 355-362.

- TUEGEL, Eric. The airframe digital twin: some challenges to realization. In : *53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC structures, structural dynamics and materials conference 20th AIAA/ASME/AHS adaptive structures conference 14th AIAA*. 2012. p. 1812.
- UHLEMANN, Thomas H.-J., LEHMANN, Christian, et STEINHILPER, Rolf. The digital twin: Realizing the cyber-physical production system for industry 4.0. *Procedia Cirp*, 2017, vol. 61, p. 335-340.
- VERDOUW, C. N., KRUIZE, J. W., WOLFERT, J., *et al.* Digital twins in farm management: Illustrated by cases from FIWARE accelerators SmartAgriFood and fractals. In : *11th International European Forum (Iglis-Forum)(161st EAAE Seminar) on System Dynamics and Innovation in Food Networks*. 2017.
- WANG, Shiyong, WAN, Jiafu, ZHANG, Daqiang, *et al.* Towards smart factory for industry 4.0: a self-organized multi-agent system with big data based feedback and coordination. *Computer networks*, 2016, vol. 101, p. 158-168.
- WELLSANDT, Stefan, KLEIN, Konstantin, HRIBERNIK, Karl, *et al.* Towards Using Digital Intelligent Assistants to Put Humans in the Loop of Predictive Maintenance Systems. *IFAC-PapersOnLine*, 2021, vol. 54, no 1, p. 49-54.
- uWEYER, Stephan, MEYER, Torben, OHMER, Moritz, *et al.* Future modeling and simulation of CPS-based factories: an example from the automotive industry. *Ifac-Papersonline*, 2016, vol. 49, no 31, p. 97-102.
- XIANG, Feng, ZHANG, Zhi, ZUO, Ying, *et al.* Digital twin driven green material optimal-selection towards sustainable manufacturing. *Procedia Cirp*, 2019, vol. 81, p. 1290-1294.
- XU, Li Da, XU, Eric L., et LI, Ling. Industry 4.0: state of the art and future trends. *International journal of production research*, 2018, vol. 56, no 8, p. 2941-2962.
- YAN, Jun, ZHOU, Jianzhong, LI, Yuxin, *et al.* Research on intelligent pumped storage power station based on digital twins technology. In : *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publiswhing, 2022. p. 012022.
- YIN, Shen et KAYNAK, Okyay. Big data for modern industry: challenges and trends [point of view]. *Proceedings of the IEEE*, 2015, vol. 103, no 2, p. 143-146.
- ZHANG, Chao, ZHOU, Guanghui, HE, Jun, *et al.* A data-and knowledge-driven framework for digital twin manufacturing cell. *Procedia CIRP*, 2019, vol. 83, p. 345-350.
- ZHANG, Chenyuan, XU, Wenjun, LIU, Jiayi, *et al.* A reconfigurable modeling approach for digital twin-based manufacturing system. *Procedia Cirp*, 2019, vol. 83, p. 118-125.

## Résumé

À l'ère de la révolution numérique, les progrès technologiques continus réforment profondément les interactions de la société avec son écosystème, englobant les aspects matériels, logiciels, produits, processus et interactions humaines. Au cœur de cette mutation trône l'Industrie 4.0. Les jumeaux numériques, nés de cet environnement, incarnent des représentations virtuelles d'entités réelles, propices à la modélisation et à l'optimisation en temps réel. Cette étude sonde en profondeur les facettes essentielles des jumeaux numériques, éclairant leur rôle dans la métamorphose organisationnelle et la culture numérique. Elle dissèque également les approches méthodologiques, nécessité de posséder des formalismes rigoureux et une méthodologie générique pour assurer un déploiement efficace des jumeaux numériques à grande échelle. L'accent est mis sur la crucialité de modéliser le cycle de vie des données pour assurer la qualité des informations et une interaction fluide entre les jumeaux numériques et les acteurs humains. Enfin, elle scrute les interactions complexes des jumeaux numériques avec les domaines physique, virtuel et social, démontrant leur capacité à s'adapter aux défis en mutation perpétuelle.

**Mots clés : Jumeau numérique collaboratif, Modèles de données, Modèles et architectures, Méthodologie de déploiement.**

## Abstract

In the age of the digital revolution, continuous technological advancements are profoundly reshaping society's interactions with its ecosystem, encompassing hardware, software, products, processes, and human interactions. At the heart of this transformation lies Industry 4.0. Digital twins, born from this environment, embody virtual representations of real entities, conducive to real-time modeling and optimization. This study delves deep into the essential facets of digital twins, shedding light on their role in organizational transformation and digital culture. It dissects methodological approaches, emphasizing the necessity of rigorous formalisms and a generic methodology to ensure the efficient deployment of digital twins on a large scale. The emphasis is on the criticality of modeling the data lifecycle to ensure information quality and seamless interaction between digital twins and human actors. Lastly, it scrutinizes the complex interactions of digital twins with the physical, virtual, and social domains, demonstrating their ability to adapt to ever-evolving challenges.

**Keywords: Collaborative Digital Twin, Data Models, Models and Architectures, Deployment Methodology.**

## المخلص

في عصر الثورة الرقمية، تعيد التطورات التكنولوجية المتواصلة تشكيل تفاعلات المجتمع مع بيئته بشكل عميق، بما في ذلك الجوانب المادية والبرمجية والمنتجات والعمليات والتفاعلات البشرية. في قلب هذا التحول يقع صناعة 4.0. التوائم الرقمية، الناتجة من هذا البيئة، تجسد التمثيلات الافتراضية للكيانات الحقيقية، وتسهل عمليات النمذجة والتحسين في الوقت الحقيقي. تستقصي هذه الدراسة بعمق جوانب التوائم الرقمية الأساسية، وتسلط الضوء على دورها في التحول التنظيمي والثقافة الرقمية. وتحلل أيضاً النهج المنهجي، مع التأكيد على ضرورة وجود أساليب صارمة ومنهجية عامة لضمان نشر فعال للتوائم الرقمية على نطاق واسع. ويركز الاهتمام على أهمية نمذجة دورة حياة البيانات لضمان جودة المعلومات والتفاعل السلس بين التوائم الرقمية والعناصر البشرية. وأخيراً، يتناول البحث التفاعلات المعقدة للتوائم الرقمية مع المجالات الفعلية والافتراضية والاجتماعية، مظهرًا قدرتها على التكيف مع التحديات المتغيرة باستمرار.

**الكلمات المفتاحية: التوائم الرقمية التعاونية، نماذج البيانات، النماذج والهندسات، منهجية النشر.**