

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRY OF HIGHER EDUCATION
AND SCIENTIFIC RESEARCH

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



المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
École Supérieure en
Sciences Appliquées

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
-تلمسان-



Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie Industriel
Spécialité : Management Industriel et Logistique

Présenté par : YELLES CHAUCHE Safia Nassima

Thème

**Jumeau numérique logistique et
approche ontologique : Amélioration de
la traçabilité en industrie 4.0**

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

M. Mohammed BENNEKROUF	MCA	ESSA Tlemcen	Président
M. Fouad MALIKI	MCA	ESSA Tlemcen	Encadrant
M. Mohammed Adel HAMZAOUI	MC	ENSIBS	Co. Encadrant
Mme. Nathalie JULIEN	Prof	ENSIBS	Co. Encadrant
M. Mehdi SOUIER	Prof	Univ. Tlemcen	Examinateur
M. Luka LE ROUX	Postdoc	Univ. Bretagne Sud	Examinateur
Mme. Nourelhouda SEKKAL	MCB	ESSA Tlemcen	Examinateur
M. Salim KAZI AOUL	Ingénieur	ENSIBS	Invité

Année universitaire : 2023 / 2024

Remerciements

Ce projet n'aurait pas vu le jour sans l'intervention déterminante et bienveillante de nombreuses personnes, chacune apportant une contribution précieuse à sa réalisation.

En premier lieu, je souhaite exprimer toute ma gratitude envers Monsieur Fouad MALIKI, mon encadrant, dont l'expertise, la disponibilité et les conseils avisés ont été essentiels à chaque étape de ce travail. Son soutien infaillible a été une source d'inspiration et de confiance, sans laquelle ce projet n'aurait pas pu aboutir de la même manière.

À Madame Nathalie JULIEN, je suis infiniment reconnaissant pour m'avoir accordé cette opportunité précieuse. Sa confiance initiale et son soutien constant ont été des moteurs essentiels qui ont alimenté ma motivation tout au long de cette expérience captivante.

À Monsieur Mohammed Adel HAMZAOU, je souhaite adresser mes remerciements les plus sincères pour ses conseils éclairés, sa patience infinie et son soutien indéfectible. Sa présence bienveillante a été un véritable soutien moral dans les moments où les défis semblaient insurmontables.

Enfin, à Monsieur KAZI AOUL Salim, je suis profondément reconnaissant pour son appui inconditionnel et son dévouement à assurer mon intégration harmonieuse au sein de l'équipe à l'ENSIBS. Sa générosité et son engagement à faciliter mon chemin ont joué un rôle crucial dans la réussite de ce projet.

Chacun d'entre eux a non seulement enrichi mon parcours académique mais a également contribué de manière significative à mon développement personnel. Leur soutien précieux restera gravé dans ma mémoire comme une pierre angulaire de cette expérience transformative à l'ENSIBS.

Je témoigne aussi de ma reconnaissance et ma gratitude à tous les enseignants qui ont apporté leur aide, ont guidé mes réflexions et ont contribué à la réussite de ce parcours universitaire ainsi qu'à ce projet, par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques.

À mes amis qui méritent une mention spéciale pour avoir marqué positivement ces années universitaires. Leurs encouragements, leur amitié et leurs précieux moments partagés ont enrichi mon expérience étudiante et ont été une source constante de motivation.

Je souhaite exprimer ma reconnaissance profonde envers mes parents, dont le soutien indéfectible, tant moral que financier, a été un pilier essentiel tout au long de mes études. Leur dévouement constant, leurs conseils avisés et leur croyance inébranlable en mes capacités ont été d'un soutien inestimable. À mes grands frères, je suis reconnaissante pour leur guidance bienveillante qui m'a aidé à garder le cap lorsque cela était nécessaire.

Je tiens également à remercier toutes les personnes rencontrées au fil de cette aventure, dont le soutien désintéressé et la disponibilité ont été précieux. Leur contribution a été significative et a renforcé mon parcours académique de manière indélébile.

Je tiens à rendre hommage à un être cher qui nous a quittés, une personne qui a marqué profondément mon parcours depuis la maternelle jusqu'à ce jour. Mon grand-père, El Hachemi BABAHMED, restera à jamais dans mon cœur pour sa joie de vivre contagieuse, sa gaité, son humour bienveillant, sa gentillesse sans limites et son dévouement constant. Il a été une source inépuisable d'enseignements et de soutien jusqu'à son dernier souffle.

Je suis reconnaissante envers chacune de ces personnes, qui ont toutes joué un rôle crucial dans la réalisation de ce mémoire et dans mon parcours personnel. Leurs contributions ont été au-delà de mes attentes et ont rendu cette expérience non seulement enrichissante, mais aussi inoubliable.

Sommaire

1	L'industrie 4.0 et le jumeau numérique	8
1.1	Introduction :	8
1.2	L'industrie 4.0 :	8
1.2.1	Les principales caractéristiques de l'industrie 4.0 :	9
1.3	Le Jumeau numérique :	11
1.3.1	Historique :	11
1.3.2	Les descriptions du jumeau numérique dans la littérature :	14
1.3.3	Les domaines d'applications du jumeau numérique :	18
1.3.4	les caractéristiques du jumeau numérique :	21
1.3.5	Méthodologie de développement et de déploiement du jumeau numérique :	22
1.4	Conclusion :	24
2	Le jumeau numérique logistique dans l'agroalimentaire	26
2.1	Introduction :	26
2.2	La chaîne logistique agroalimentaire :	26
2.3	Jumeau numérique logistique :	27
2.3.1	Les caractéristiques du jumeau numérique logistique agro-alimentaire :	28
2.3.2	Les applications du jumeau numérique logistique agro-alimentaire :	28
2.3.3	Facteurs de mise en oeuvre du jumeau numérique logistique agro-alimentaire :	29
2.3.4	Les barrières de mise en oeuvre du jumeau numérique :	29
2.3.5	Les défis de la chaîne logistique alimentaire :	30
2.4	Mise en oeuvre des jumeaux numérique au sein des chaîne logistique alimentaire :	31
2.4.1	La phase de pré-adoption :	33
2.4.2	La phase d'adoption :	34
2.4.3	La phase de post-adoption :	34
2.5	Conclusion :	34
3	La traçabilité de la chaîne logistique alimentaire	36
3.1	Introduction :	36
3.2	Ontologie de la traçabilité de la chaîne logistique :	36
3.3	Méthodologie de développement de l'ontologie :	37
3.4	Exemples d'ontologie de traçabilité dans la chaîne logistique agro-alimentaire :	39
3.4.1	Exemple 1 : La traçabilité des grains de la moissonneuse-batteuse au chariot à grains, au camion, à l'élévateur, au transformateur de produits alimentaires. l'élévateur, jusqu'à l'entreprise de transformation [7] :	39
3.4.2	Exemple 2 : Développement d'une ontologie formelle pour la traçabilité de la chaîne logistique en utilisant des cas d'utilisation et des données provenant de partenaires dans le domaine des céréales en vrac [7] :	44
3.5	Conclusion :	48

Liste des figures

1.1	Les piliers sur lesquels repose l'Industrie 4.0	10
1.2	Conceptual ideal for PLM	12
1.3	Modèle de concept jumeau numérique à cinq dimensions selon (Tao, et al., 2019)	14
1.4	Évolution du concept de jumeau numérique	14
1.5	Les éléments d'un modèle de jumeau numérique [20]	18
1.6	Jumeau numérique d'un scanner à rayons X [19]	19
1.7	Évolution des usages	22
1.8	Méthodologie de déploiement basée sur l'architecture 5C CPS	23
1.9	Le jumeau numérique dans son système cyber-physique social	24
2.1	schéma de la chaîne logistique agroalimentaire en circuits courts	27
2.2	Typologies pour l'analyse thématique	31
2.3	La relation entre les caractéristiques des jumeaux numériques et les défis des chaînes logistiques alimentaire [30]	32
2.4	Cadre conceptuel pour la mise en œuvre des jumeaux numériques dans les chaînes logistiques alimentaire [30]	33
3.1	La chaîne d'évènements pour le cas d'utilisation d'un silo à grains à un transformateur	40
3.2	Les classes principales de l'ontologie de la traçabilité de la chaîne logistique en rapport avec l'évènement de transfert [8]	41
3.3	Le changement de propriétaire et ses relations temporelles [8]	41
3.4	Le modèle de représentation des résultats de la mesure de la teneur en eau d'une portion de grain [8]	42
3.5	Le modèle de représentation des résultats de la détection de la contamination d'une portion de grain[8]	43
3.6	Le modèle de représentation de l'identification de l'emplacement d'un silo à grains [8]	44
3.7	Graphe de traçabilité : en parcourant le graphe, l'historique des unités traçables peut être reconstitué. [7]	45
3.8	Instance de la classe "Load" d'une portion de maïs [7]	45
3.9	Instantiation des Charges Source et Cible [7]	46
3.10	Différents types de participants dans un évènement de transfert [7]	46
3.11	Marquage temporel de l'évènement de transfert [7]	47
3.12	Le conteneur et sa relation avec le chargement et son intérieur [7]	47
3.13	Représentation générale d'un évènement de transfert [7]	48

Liste des tableaux

1.1	Les définitions existantes du jumeau numérique [3]	17
-----	--	----

Introduction générale

L'âge industriel équivaut en importance à l'avènement de l'agriculture au Néolithique : il marque une rupture fondamentale avec le passé, caractérisée par une croissance soutenue et irréversible de la production industrielle, accompagnée de transformations profondes dans l'organisation de la production et dans les sociétés. Dès la préhistoire, les premières activités humaines qualifiables d'industrielles apparaissent, attestées par des outils et armes en pierre, d'abord taillée, puis polie. Au Moyen Âge, de nouvelles techniques émergent, inaugurant de nouvelles formes d'industrialisation. Au XIII^{ème} siècle, l'utilisation du charbon comme combustible se répand, répondant aux besoins de production liés aux nombreux conflits.

La première révolution industrielle, vers 1790, jusqu'aux prémices de la seconde, est portée par les innovations liées à la vapeur et au charbon, centrée principalement au Royaume-Uni avant de s'étendre à d'autres régions d'Europe. La deuxième révolution industrielle, vers 1850, jusqu'à la fin de la Seconde Guerre mondiale, est caractérisée par l'exploitation des découvertes en électricité. La troisième révolution industrielle, ou révolution technologique, voit l'apparition d'inventions essentiellement européennes, marquant l'avènement de nouveaux modes de production et l'automatisation de tâches précédemment humaines.

Aujourd'hui, face à l'évolution rapide des technologies et aux nouvelles exigences des clients, l'entreprise doit s'adapter pour devenir plus innovante, compétitive et créatrice d'emplois, tout en produisant de manière économe et en accélérant la mise sur le marché de ses produits. C'est dans ce contexte que l'Industrie 4.0 émerge, représentant une évolution majeure où l'entreprise manufacturière doit répondre aux exigences de qualité, de réduction des délais et d'innovation. Cette révolution s'appuie sur les nouvelles technologies telles que l'Internet des objets, la fabrication additive et les systèmes de production avancés, transformant l'entreprise en une "usine du futur".

Ce qui caractérise cette révolution, c'est la fusion entre le monde réel et virtuel, incarnée par le concept de jumeau numérique. Conçu comme une réplique virtuelle fidèle d'un produit, d'un processus ou d'un système physique, le jumeau numérique permet une représentation en temps réel et en haute fidélité de l'objet ou du processus qu'il reflète. Cette réplique virtuelle est alimentée en continu par des données provenant de capteurs installés dans le monde réel, permettant une simulation précise du comportement et des performances de l'objet ou du processus. Cette modélisation informatique avancée offre une multitude d'avantages. Elle permet notamment de prévoir et d'optimiser les performances avant même que des changements ne soient apportés dans le monde physique, réduisant ainsi les risques et les coûts associés à l'expérimentation en direct. De plus, le jumeau numérique facilite la détection précoce des anomalies et des défaillances, permettant une maintenance préventive et une gestion proactive des équipements et des processus industriels. Enfin, en offrant une plateforme virtuelle pour tester de nouvelles idées et stratégies, le jumeau numérique favorise l'innovation et l'amélioration continue, permettant aux entreprises de rester compétitives dans un environnement en constante évolution. En somme, le jumeau numérique représente une avancée majeure dans le domaine de l'industrie 4.0, transformant fondamentalement la manière dont les entreprises conçoivent, produisent et gèrent leurs produits et leurs processus.

En tant que stagiaire, j'ai la chance d'être pleinement impliqué dans le projet TERRA (Pour la Transformation Numérique des Producteurs et Transformateurs LAitiers). Ce projet, soutenu par la région Bretagne, réunit divers organismes de recherche (Lab-STICC, CNRS, ENSIBS, The Land)

ainsi que des partenaires industriels (Alma Food, DnR'Sys). Mon implication au sein de l'équipe Jumeau Numérique à l'ENSIBS à Lorient me permet de contribuer activement au développement de méthodes génériques pour la conception et le déploiement de jumeaux numériques. Ces efforts visent à accompagner les objets physiques tout au long de leur cycle de vie, apportant ainsi une contribution significative à la transition numérique dans le secteur agroalimentaire, en rendant ces outils accessibles aux petites structures et en assurant leur compatibilité avec les systèmes déjà en place et largement utilisés.

Dans le cadre de ce rapport, nous proposons une analyse approfondie de l'application du jumeau numérique dans le domaine de la logistique. Bien que cette technologie ait déjà démontré son efficacité dans divers secteurs de l'industrie, son potentiel spécifique dans le domaine de la logistique demeure largement sous-exploré. Ainsi, ce document est structuré en trois chapitres distincts, chacun mettant en lumière un aspect spécifique de cette exploration.

Dans le premier chapitre de ce rapport, nous entreprendrons une exploration approfondie de l'Industrie 4.0, mettant en lumière les tenants et aboutissants de cette révolution industrielle. Nous définirons les fondements théoriques de l'Industrie 4.0, en mettant en évidence ses principaux piliers tels que l'Internet des Objets (IoT), la fabrication additive, l'intelligence artificielle (IA) et les systèmes cyber-physiques. Ensuite, nous nous concentrerons sur le concept de jumeau numérique, pivot central de l'Industrie 4.0, en explorant sa définition, ses caractéristiques et ses applications dans divers secteurs industriels. Nous aborderons également une méthodologie clé pour le déploiement et le développement du jumeau numérique. Cette approche méthodique repose sur des architectures telles que les systèmes 5C CPS (Commande, Contrôle, Communication, Calcul, Cyber), fournissant un cadre structuré pour la conception et l'implémentation efficaces des jumeaux numériques. Elle intègre les avancées technologiques tout en tenant compte des défis humains et organisationnels, facilitant ainsi une adoption harmonieuse dans différents secteurs industriels.

Dans le deuxième chapitre, nous examinerons en profondeur les caractéristiques du jumeau numérique appliqué à la logistique, ainsi que ses divers domaines d'application et sa mise en œuvre pratique. Nous passerons en revue la littérature existante, en explorant les travaux antérieurs, les études de cas et les projets de recherche qui se sont penchés sur cette thématique spécifique. Cette analyse nous permettra de mieux comprendre les défis et les opportunités liés à l'utilisation du jumeau numérique dans le domaine de la logistique, tout en identifiant les tendances émergentes. Nous aborderons également les barrières et les défis spécifiques rencontrés lors de la mise en œuvre du jumeau numérique dans le contexte de la chaîne logistique, en mettant en lumière les implications pratiques de cette technologie sur les opérations logistiques.

Enfin, le troisième chapitre se penchera sur un aspect crucial de la logistique moderne : la traçabilité au sein de la chaîne logistique. Nous analyserons comment le jumeau numérique peut être utilisé pour garantir une traçabilité complète et transparente des produits et des marchandises tout au long de leur cycle de vie. En nous appuyant sur des exemples concrets de modélisation, nous illustrerons comment le jumeau numérique peut faciliter la gestion des flux de marchandises, la surveillance des conditions de transport et la prise de décision en temps réel au sein de la chaîne logistique.

En adoptant cette approche, nous visons à offrir une vision holistique de l'Industrie 4.0, en mettant en évidence le rôle crucial du jumeau numérique comme un outil central dans cette révolution industrielle. Cette analyse approfondie jettera les bases nécessaires pour comprendre les implications et les applications spécifiques du jumeau numérique dans le domaine de la logistique, telles que nous les explorerons dans les chapitres suivants.

Chapitre 1

L'industrie 4.0 et le jumeau numérique

1.1 Introduction :

L'objectif de ce projet est de concevoir et de modéliser un jumeau numérique logistique dans le cadre du projet TERRA. Ce premier chapitre commence par une brève exploration de l'historique marquant l'évolution du jumeau numérique, suivi par une présentation des différentes définitions et caractéristiques de ce concept. En outre, nous aborderons la méthodologie de développement et de déploiement du jumeau numérique.

1.2 L'industrie 4.0 :

Dans un contexte où les avancées scientifiques et technologiques progressent de manière exponentielle, et dans une ère de mondialisation omniprésente, l'industrie se voit contrainte de repenser ses approches et ses stratégies pour répondre à ces évolutions, tout en satisfaisant les exigences croissantes des clients et en prenant en compte les enjeux environnementaux. Cette conjoncture a conduit certains pays à réévaluer leurs stratégies industrielles, donnant ainsi naissance à divers projets visant à améliorer et à développer le secteur. Parmi ces initiatives, on trouve l'"Industrie 4.0" en Allemagne et le plan "Made in China 2025" en Chine, partageant un objectif commun : moderniser l'industrie en la rendant plus intelligente. Ces efforts convergents semblent annoncer l'avènement d'une quatrième révolution industrielle.

C'est lors de la foire de Hanovre (Hannover Messe) en Allemagne, en 2011, que le concept d'"Industrie 4.0" est officiellement présenté. Il s'agissait d'un projet initié par le gouvernement fédéral allemand, visant à numériser et à renforcer la compétitivité de l'industrie allemande.

Selon Germany Trade and Invest (GTAI), l'Industrie 4.0 représente un changement de paradigme de la production "centralisée" à la production "décentralisée", rendu possible par les avancées technologiques qui bouleversent la logique traditionnelle du processus de production. Concrètement, cela implique que les machines industrielles ne se contentent plus simplement de "traiter" le produit, mais que le produit interagit avec la machine pour lui indiquer précisément quoi faire, créant ainsi ce qu'on appelle un "smart Product". [1]

Selon GTAI, l'Industrie 4.0 représente "l'évolution technologique des systèmes embarqués vers les systèmes de cyber-physique", une approche qui "relie les technologies de production intégrées aux processus de production intelligents" [1]

De manière globale, l'Industrie 4.0, considérée comme la quatrième révolution industrielle, favorisera l'interaction entre le monde physique et le monde virtuel en exploitant des technologies telles que l'Internet des objets, les systèmes cyber-physiques, et bien d'autres encore. Cette convergence technologique donne naissance à ce que l'on appelle la "smart factory" ou l'usine intelligente. [29]

Contrairement aux révolutions industrielles précédentes, l'Industrie 4.0 est unique en ce sens qu'elle a été anticipée avant même de se produire. Cette anticipation permet aux chercheurs et aux indus-

triels de façonner cette révolution selon leurs besoins et leurs visions. Cependant, ces visions diffèrent entre les chercheurs et les praticiens de l'industrie, ce qui explique le manque de définition claire de l'Industrie 4.0 à ce jour. Bien que les différentes définitions convergent, elles ne se rejoignent pas nécessairement [29]. De plus, chaque pays et chaque acteur insiste sur des priorités différentes concernant l'exploitation de cette nouvelle technologie. [13]

Dans ce qui suit, voici quelques définitions de l'Industrie 4.0 telles qu'elles ont été trouvées dans la littérature :

- "L'industrie 4.0 est l'intégration de machines et de dispositifs physiques complexes avec des capteurs et des logiciels en réseau, utilisés pour prédire, contrôler et planifier de meilleurs résultats commerciaux et sociétaux." [29]
- "L'industrie 4.0 combine les méthodes de production avec les technologies de l'information et de la communication. Dans le monde de l'industrie 4.0, hommes, machines, équipements, systèmes logistiques et produits communiquent et interagissent entre eux directement." [31]
- "L'industrie 4.0 décrit l'Organisation des processus de production basés sur la technologie et les dispositifs communiquant de façon autonome les uns avec les autres le long de la chaîne de valeur." [53]

Le cœur de l'Industrie 4.0 réside dans le concept du système cyber-physique (CPS). Ce terme désigne la fusion de systèmes logiciels et matériels au sein d'un réseau complexe et intelligent, où chaque objet physique possède une identité distincte. Un CPS se compose des approches technologiques de trois éléments essentiels : l'informatique omniprésente, l'Internet des objets et des services, ainsi que le Cloud Computing, en plus d'autres technologies qui seront détaillées dans la suite.

1.2.1 Les principales caractéristiques de l'industrie 4.0 :

L'objectif de l'Industrie 4.0 est d'intégrer les avancées fulgurantes des nouvelles technologies de l'information, de la robotisation, de la virtualisation, etc., qui ont connu une croissance exponentielle au cours de la dernière décennie. Cette intégration va entraîner une transformation fondamentale du fonctionnement de l'industrie telle que nous la connaissons aujourd'hui. En effet, grâce à la connectivité entre capteurs, machines, produits et systèmes d'information tout au long de la chaîne de valeur, il sera désormais possible de collecter et d'analyser les données provenant de toutes les machines et de tous les systèmes. Cela permettra des processus de production plus rapides, plus flexibles et plus efficaces, conduisant ainsi à la fabrication de produits de meilleure qualité à des coûts réduits.

Il est important de souligner que chaque pays souhaite façonner la quatrième révolution industrielle selon ses propres besoins. Cependant, une caractéristique fondamentale de cette révolution est l'ensemble des technologies qui rendent cette transformation possible. Parmi celles-ci, nous retrouvons le BIG DATA, les Robots autonomes, la simulation, l'intégration verticale et horizontale, l'Internet des objets industriels (IIOT : Industrial Internet Of Things), la cyber-sécurité, le Cloud, la fabrication additive et la réalité augmentée comme montré dans la figure 1.1 :

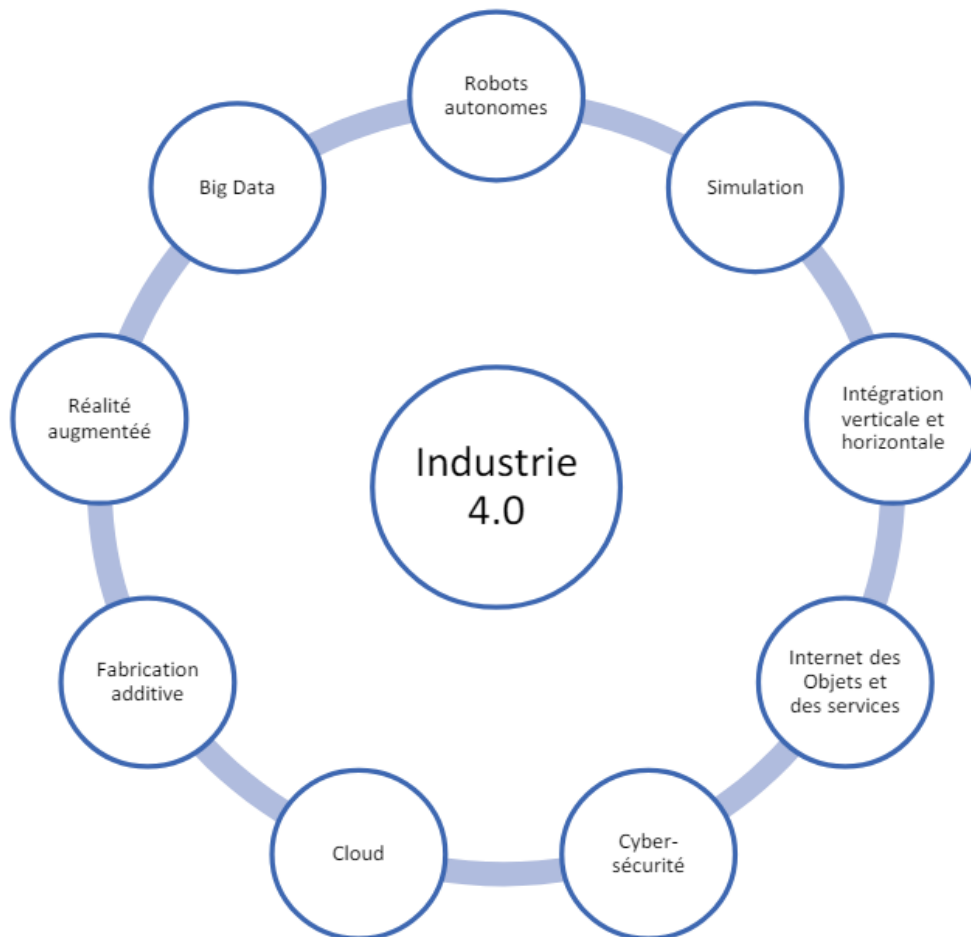


Figure 1.1: Les piliers sur lesquels repose l'Industrie 4.0 [45]

- **Big data** : Ce terme désigne des ensembles de données devenus si volumineux qu'ils dépassent les capacités humaines d'analyse, ainsi que celles des outils informatiques traditionnels. Cette "explosion des données" se manifeste dans de nombreux domaines, et les systèmes de production ne font pas exception à ce phénomène. Dans le cadre de l'industrie 4.0, la collecte et l'évaluation exhaustive des données provenant de diverses sources (équipements et systèmes de production, systèmes de gestion et interactions clients) joueront un rôle crucial dans l'optimisation de la production, en facilitant la prise de décision en temps réel. [45]
- **Robots autonomes** : Actuellement, les robots sont utilisés dans l'industrie pour réaliser des tâches complexes, mais ils sont généralement isolés pour des raisons de sécurité. Dans le cadre de l'industrie 4.0, nous voyons l'émergence de robots autonomes, flexibles et coopératifs, capables de travailler en toute sécurité aux côtés des humains. Ces robots sont appelés "cobots" (robots collaboratifs). [45]
- **Simulation** : Dans l'industrie 4.0, les simulations jouent un rôle crucial en utilisant des données en temps réel pour créer des représentations virtuelles du monde physique, connues sous le nom de jumeaux numériques (Digital Twins) ou systèmes cyber-physiques. Ces simulations permettent d'analyser le fonctionnement des systèmes, de prévoir des événements tels que des pannes ou des dysfonctionnements, et d'optimiser les performances, augmentant ainsi la productivité. [45]
- **Intégration verticale et horizontale** : Actuellement, les systèmes informatiques ne sont pas entièrement intégrés, ce qui limite les liens entre les entreprises, les fournisseurs et les clients, ainsi qu'entre les différents départements internes d'une entreprise. L'intégration verticale vise à optimiser la reconfiguration des processus de production en connectant tous les systèmes (capteurs, actionneurs, etc.) avec les divers outils de gestion de production (planification, stocks, etc.), permettant ainsi un transfert d'informations plus fluide et précis. En revanche, l'intégration

horizontale vise à optimiser la chaîne de valeur du produit en connectant l'entreprise avec les acteurs externes (fournisseurs, clients, etc.) grâce à des technologies telles que l'Internet des services. [1]

- **Internet des objets industriels** : L'Internet des objets industriels, également connu sous le nom d'Internet industriel, est un réseau composé de nombreux dispositifs interconnectés par des technologies de communication. Ces systèmes sont capables de surveiller, de collecter, d'échanger, d'analyser et de fournir des informations précieuses de manière inédite. Cela permet aux entreprises de prendre des décisions plus intelligentes et plus rapides, facilitant ainsi la fabrication intelligente (Smart Manufacturing). [40]
- **Internet des services** : Permet aux fournisseurs de services de les offrir via Internet. Ainsi, les entreprises cherchent à proposer des produits qu'elles transforment ensuite en services. [1]
- **Cyber-sécurité** : Les technologies qui composent l'industrie 4.0 utilisent toutes des protocoles de communication standardisés, ce qui signifie qu'elles sont toutes, d'une manière ou d'une autre, connectées à un réseau. Cela a créé un besoin crucial de protéger ces informations contre les menaces potentielles, telles que les cyberattaques. Par conséquent, des communications sécurisées et fiables, ainsi qu'une gestion sophistiquée des identités, des accès des machines et des utilisateurs, sont devenues essentielles. [45]
- **Cloud** : Les entreprises utilisent déjà des logiciels basés sur le cloud pour certaines de leurs applications de gestion. Cependant, avec l'avènement de l'Industrie 4.0, un plus grand nombre d'entreprises dans le secteur de la production nécessiteront un partage accru des données, tant en interne qu'avec des partenaires externes. [45]
- **Fabrication additive** : Les entreprises commencent tout juste à adopter la fabrication additive, comme l'impression 3D, principalement pour la création de prototypes et la production de composants individuels. Avec l'Industrie 4.0, ces méthodes de fabrication additive seront largement utilisées pour produire de petits lots de produits personnalisés, offrant des avantages tels que des conceptions complexes et légères. Des systèmes de fabrication additive haute performance et décentralisés permettront de réduire les distances de transport et les stocks, optimisant ainsi l'efficacité logistique et la flexibilité de production. [45]
- **Réalité augmentée** : La réalité augmentée (RA) se définit comme une vision en temps réel, directe ou indirecte, d'un environnement physique réel, dans lequel les éléments sont enrichis par des données sensorielles générées par ordinateur, telles que des données sonores, graphiques ou GPS. Par exemple, les travailleurs peuvent recevoir des instructions de réparation spécifiques sur la manière de remplacer une pièce donnée tout en inspectant le système à réparer. Ces informations peuvent être affichées directement dans le champ de vision des travailleurs à l'aide de dispositifs tels que des lunettes à réalité augmentée. [45]

1.3 Le Jumeau numérique :

1.3.1 Historique :

- **1970**

Bien que l'intérêt croissant pour le jumeau numérique soit une tendance relativement récente, il convient de souligner que le concept lui-même est ancien. Les origines du jumeau numérique remontent aux années 1970, période durant laquelle la NASA a développé une "technologie de mise en miroir" visant à simuler des systèmes spatiaux au moyen de répliques physiques complexes sur Terre. Ces simulateurs ont joué un rôle crucial lors de la célèbre mission Apollo 13, un événement qui demeure parmi les plus mémorables de l'histoire américaine. Pendant cette opération de secours particulièrement épique, quinze modèles contrôlés par ordinateur ont permis aux ingénieurs d'analyser et de reproduire les conditions à bord du vaisseau spatial endommagé, situé à plus de 320 000 km de la Terre, afin d'utiliser ces données pour assurer le retour en sécurité de l'équipage. [33] [22]

- **2003**

Le terme Digital Twin (jumeau numérique) a été introduit la toute première fois en 2002 à l'université de Michigan par le docteur Michael Grieves dans sa présentation à l'industrie pour la création d'un centre de gestion du cycle de vie d'un produit PLM (Product Lifecycle Management) L'une des diapositives de la présentation, comme le montre la Figure 1.2, avait comme titre "Conceptual Ideal for PLM" ce qui deviendra par la suite "Digital Twin". Ce concept reflète en effet une représentation dynamique d'un système composé de deux systèmes, l'un réel et l'autre virtuel et que ces deux derniers sont liés tout au long du cycle de vie du système [25]. Comme le montre la Figure 1.2, ce concept est composé de trois parties : Le produit physique dans l'environnement réel, le produit virtuel dans un environnement virtuel et la connexion des données et de l'information qui relie les deux environnements [25].

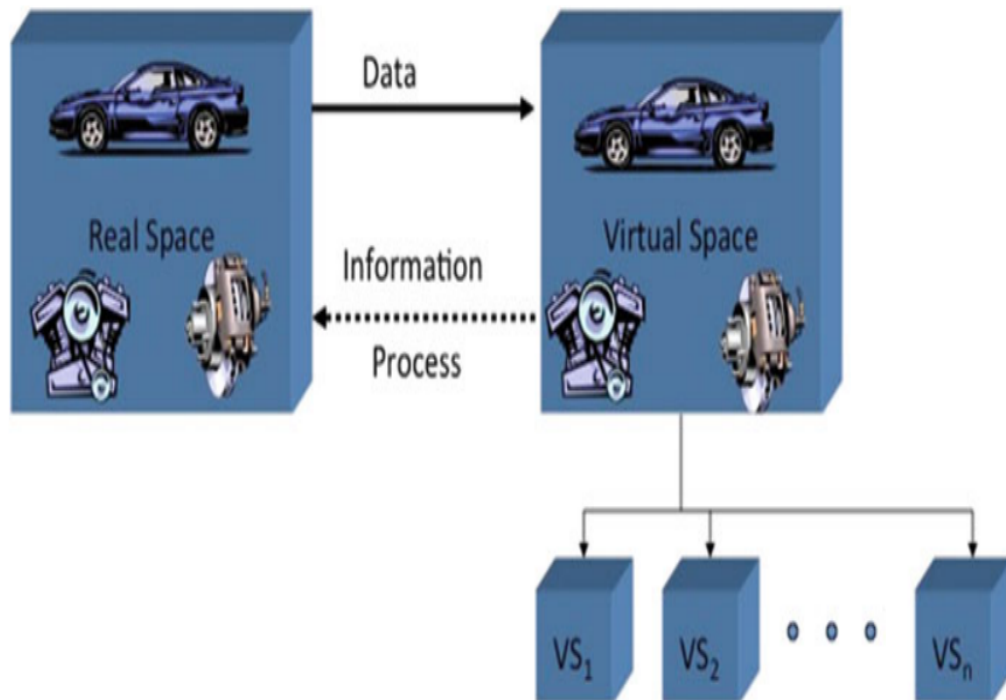


Figure 1.2: Conceptual ideal for PLM [25]

- **2010**

Après une relative absence d'informations jusqu'en 2010, le concept de jumeau numérique se précise avec une première définition de la NASA le décrivant comme "une simulation intégrée multi physique multi-échelle d'un véhicule ou d'un système qui utilise les meilleurs modèles physiques, données de capteurs et historiques de la flotte pour être un miroir de la vie du jumeau volant lui correspondant". En 2011, un article de la NASA et de l'US Air Force le positionne comme une technologie clé. Les avancées technologiques telles que l'IoT et l'IA rendent sa mise en œuvre possible. Avec l'émergence d'Industrie 4.0 en 2011, le jumeau numérique s'étend à l'industrie à partir de 2013, élargissant son champ d'application de la simulation à l'optimisation et à la prédiction en temps réel. En 2013 également, Eric Tuegel, de l'US Air Force Research Laboratory, étend la définition du jumeau numérique en le concevant comme une architecture intégrée pour l'aide à la décision. [33]

- **2014**

En 2014, le Dr. Michael Grieves publie un livre blanc qui approfondit le concept du jumeau numérique en le décrivant comme un modèle virtuel dynamique. Il élargit également son application à divers secteurs industriels, notamment l'automobile, le pétrole et le gaz, ainsi que le domaine de la santé. [33]

- **2017**

En 2017 et 2018, l'entreprise américaine Gartner a classé le jumeau numérique parmi les 10 technologies les plus prometteuses pour les 10 prochaines années. Le concept a ainsi gagné en traction et s'est traduit par un afflux de publications scientifiques, qui ont triplé chaque année, ainsi que par une augmentation du nombre d'entreprises s'engageant dans ce domaine.

- **2019**

Dans leur livre en 2019, Tao et al. ont présenté un nouveau modèle pour expliquer la technologie du jumeau numérique. Ce modèle se compose de cinq parties principales, chacune représentant une caractéristique clé du jumeau numérique. Il s'agit d'une évolution du modèle jumeau numérique tridimensionnel initialement proposé par Grieves en 2003 dans son cours sur la gestion du cycle de vie des produits (PLM) à l'Université du Michigan (qui a été mentionné pour la première fois dans la littérature dans son livre de 2014). En plus des trois dimensions du modèle de Grieves - l'élément physique, l'élément virtuel et les données et informations, Tao et al. (2019) ont ajouté deux dimensions supplémentaires [27], comme indiqué dans l'expression :

$$M_{DT} = (PE, VE, SS, DD, CN)[27]$$

Sachant que :

- **PE** : représente l'entité physique présente dans le monde réel. [27]
- **VE** : l'entité virtuelle constituée d'une collection de modèles. [27]
- **SS** : les services fournis à la fois à PE et à VE. [27]
- **DD** : les données qui composent le jumeau numérique. [27]
- **CN** : les connexions entre les différents composants du jumeau numérique. [27]

"Pour clarifier la façon dont ils conceptualisent le jumeau numérique, Tao et al. (2019) ont utilisé une analogie avec le corps humain dans leur livre. Selon leur description, l'EP agit comme le "squelette" qui soutient la jumeau numérique. VE est le "cœur" du système, "pompe" les résultats et les méthodes de simulation vers d'autres parties. SS est l'"organe sensoriel" qui communique directement avec les utilisateurs. Le DD est le "sang" qui alimente en permanence le jumeau numérique en données importantes. Par conséquent, le CN agit comme un "conduit sanguin", délivrant des informations aux différentes parties du jumeau numérique." [27]

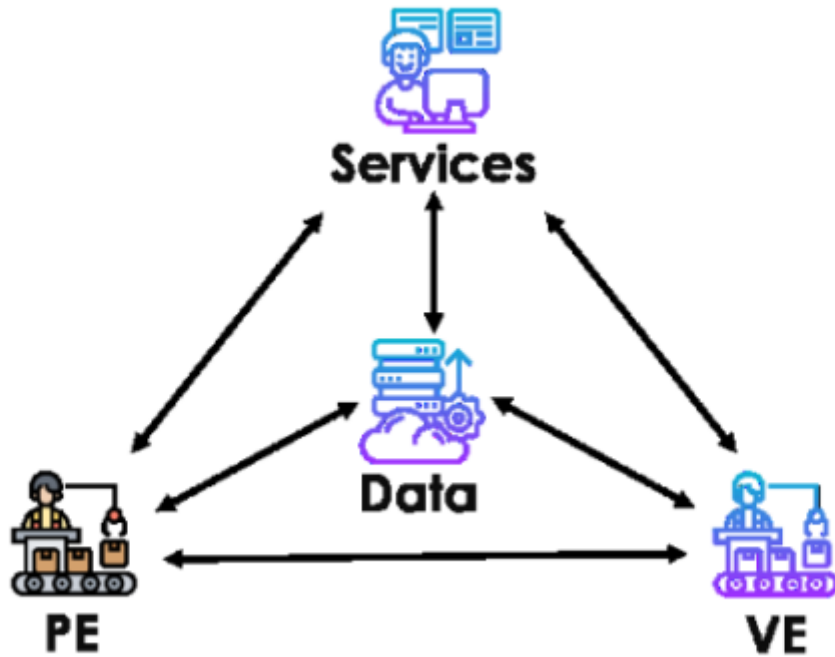


Figure 1.3: Modèle de concept jumeau numérique à cinq dimensions selon (Tao, et al., 2019) [27]

La Figure 1.4 offre une synthèse de l'évolution récente du concept de jumeau numérique. Initialement, les jumeaux numériques étaient confinés à des secteurs tels que l'aérospatial et la défense en raison de leur coût élevé et de leur complexité. Cependant, au fil du temps, ils ont évolué pour devenir plus accessibles, suscitant désormais un intérêt croissant dans une variété de domaines d'activité [33]

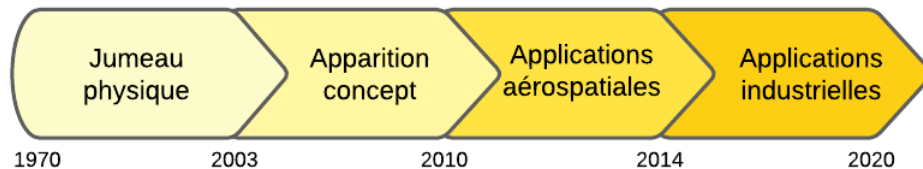


Figure 1.4: Évolution du concept de jumeau numérique [33]

1.3.2 Les descriptions du jumeau numérique dans la littérature :

Depuis la toute première définition publiée par la NASA, différents auteurs ont décrit le jumeau numérique selon leurs propres termes et en fonction de son application [52]. Les définitions données dans la littérature font référence à le jumeau numérique comme étant un modèle virtuel ou numérique, une présentation, une contrepartie, un sosie, un clone, une empreinte, un logiciel analogue, une représentation, des constructions d'information ou une simulation de son homologue physique. [52]. La manière dont le concept de JN est abordé et défini par différentes communautés professionnelles peut être comparée selon Farah ABDOUNE dans sa thèse de doctorat [3] à la métaphore d'un groupe de personnes aveugles n'ayant jamais rencontré d'éléphant auparavant. Elles apprennent ce qu'est un éléphant en le touchant chacune à leur tour. Chaque personne touche une partie différente du corps de l'éléphant et le décrit selon son expérience limitée, aboutissant à des descriptions variées et souvent divergentes. Chacun perçoit une partie de la réalité de l'éléphant, mais aucune ne détient la vérité complète. Chacune possède seulement une part de cette vérité. [3]

Nous présentons dans le Tableau 1.1 ci-dessous les différentes définitions du jumeau numérique proposées dans la littérature. Bien que cette liste ne soit pas exhaustive, elle regroupe les définitions les plus couramment utilisées depuis l'émergence du jumeau numérique. On peut y observer une diversité de perspectives et de points de vue sur le jumeau numérique.

Auteur	Définition du JN
(Grievess,2014) [24]	Un ensemble de constructions d'informations virtuelles qui décrivent entièrement un produit manufacturé physique potentiel ou réel, du niveau micro atomique au niveau macro géométrique. À son optimum, toute information pouvant être obtenue à partir de l'inspection d'un produit manufacturé physique peut être obtenue à partir de son JN. Le modèle conceptuel du JN contient trois parties principales : a) les produits physiques dans l'espace réel, b) les produits virtuels dans l'espace virtuel, et c) les connexions de données et d'informations qui relient les produits virtuels et réels.
(Glaessgen et Stargel, 2012) [23]	Une simulation intégrée multi physique, multi-échelle et probabiliste d'un produit complexe et utilise les meilleurs modèles physiques disponibles, mises à jour de capteurs, etc., pour refléter la vie de son jumeau correspondant.
(Lee et al., 2013) [36]	Un modèle couplé permet un JN de la machine réelle qui fonctionne dans la plateforme cloud en parallèle avec le processus réel et simule l'état de santé avec une connaissance intégrée à la fois des algorithmes analytiques basés sur les données ainsi que d'autres connaissances physiques disponibles. L'approche du modèle couplé construit d'abord une image numérique d'une machine dès le stade de la conception.
Rosen et al., 2015) [44]	Un modèle très réaliste de l'état actuel du processus et de leur propre comportement en interaction avec leur environnement dans le monde réel.
(Brenner et Hummel, 2017) [14]	Une copie numérique d'une usine, d'une machine, d'un ouvrier, etc., qui est créée et peut être développée indépendamment, mise à jour automatiquement et disponible dans le monde entier en temps réel.
(Schleich et al.,2017) [47]	Une relation bidirectionnelle entre un artefact physique et l'ensemble de ses modèles virtuels, permettant l'exécution efficace de la conception, de la production, de l'entretien et de diverses autres activités du produit tout au long du cycle de vie du produit.
(Schluse et al., 2017) [48]	Une réplique virtuelle un à un d'un actif technique (par exemple, une machine, un composant et une partie de l'environnement). Un JN contient des modèles de ces données (géométrie, structure, . . .), de ses fonctionnalités (traitement des données, comportement, . . .) et de ses interfaces de communication. Il intègre toutes les connaissances issues des activités de modélisation en ingénierie (modèle numérique) et des données de travail capturées lors de l'exploitation réelle (ombre numérique). Un JN contient des modèles de ses données (géométrie, structure, . . .), de ses fonctionnalités (traitement des données, comportement, . . .) et de ses interfaces de communication.

(H. Zhang et al., 2017) [60]	Un ensemble de modèles réalistes de produits et de processus de production reliant d'énormes quantités de données à une simulation rapide et permettant une évaluation précoce et efficace des conséquences, des performances et de la qualité des décisions de conception sur les produits et la chaîne de production.
(Negri et al., 2017) [38]	Une contrepartie virtuelle et informatisée d'un système physique qui peut exploiter une synchronisation en temps réel des données captées provenant du terrain et est profondément liée à l'Industrie 4.0.
(Asimov et al., 2018) [10]	Une réplique virtuelle d'une installation physique réelle, qui peut vérifier la cohérence des données de surveillance, effectuer une exploration de données pour détecter les problèmes existants et prévoir les problèmes à venir, et qui utilise un moteur de connaissances IA pour prendre des décisions commerciales efficaces.
(Tao et al., 2018) [55]	Un ensemble de modèles virtuels. Ces images miroir et le mappage des produits physiques dans l'espace virtuel. Ils pourraient refléter l'ensemble du processus du cycle de vie, ainsi que simuler, surveiller, diagnostiquer, prédire et contrôler l'état et les comportements des entités physiques correspondantes. Les modèles virtuels incluent non seulement les modèles géométriques, mais également toutes les règles et tous les comportements, tels que les propriétés des matériaux, l'analyse mécanique, la surveillance de la santé.
(Z. Liu et al., 2018) [37]	Un modèle vivant qui s'adapte en permanence aux changements de l'environnement ou de l'exploitation à l'aide de données sensorielles en temps réel et peut prévoir l'avenir des actifs physiques correspondants pour la maintenance prédictive.
(Zhuang et al., 2018) [62]	Un modèle dynamique dans le monde virtuel qui est entièrement cohérent avec son entité physique correspondante dans le monde réel et peut simuler les caractéristiques, le comportement, la vie et les performances de son homologue physique en temps opportun.
(Nathalie JULIEN et Eric Martin., 2020) [33]	Le jumeau numérique est donc une représentation virtuelle dynamique d'un objet, physique ou non. Cet objet peut être un produit, un processus ou un service. Cette représentation unique de l'objet est enrichie et évolue dans le temps de manière synchrone avec l'objet observé. Elle peut être située à différents endroits et avoir de multiples états, sans être jamais complètement visible. Le jumeau numérique est la partie du système qui exclut la partie physique de l'objet. Il comprend donc : - L'ensemble des capteurs et objets connectés positionnés sur l'objet pour recueillir les données. - Les communications en temps réel entre les espaces physique et virtuel. - L'ombre numérique de l'objet qui représente toute la trace digitale de son activité. - L'architecture des données, des modèles et des usages (comprenant les algorithmes de traitement des données et d'intelligence artificielle) qui organise les flux d'information. - Les interfaces homme-machine.

(Semeraro et al.,2021)[49]	et	Un ensemble de modèles adaptatifs qui émulent le comportement d'un système physique dans un système virtuel en obtenant des données en temps réel pour se mettre à jour tout au long de son cycle de vie. Le JN réplique le système physique pour prévoir les défaillances et les opportunités de changement, prescrire des actions en temps réel pour optimiser et/ou atténuer les événements inattendus, observer et évaluer le système de profil de fonctionnement
----------------------------	----	---

Table 1.1: Les définitions existantes du jumeau numérique [3]

Le concept de jumeau numérique consiste à analyser en continu les flux de données collectés par des capteurs situés tout au long du processus matériel. Ces capteurs recueillent des informations sur l'évolution des produits, lesquelles sont transmises en temps réel à une plateforme numérique. Cette plateforme effectue alors une analyse quasi instantanée pour optimiser le processus de manière transparente et continue. Cela permet non seulement d'analyser les données et de contrôler le système, mais aussi de prédire d'éventuelles défaillances, facilitant ainsi des interventions proactives et des réparations anticipées.

Le jumeau numérique permet également de faire fonctionner les machines et de planifier les ressources, ce qui augmente l'efficacité opérationnelle et améliore le développement des produits. La figure 1.5 met en évidence la circulation des flux de données entre la partie réelle (PHYSIQUE), composée de capteurs et d'actionneurs, et la partie numérique ou virtuelle (DIGITALE), constamment mise à jour. Les éléments mentionnés ci-dessus sont détaillés ci-après [1] [2]:

- **Les capteurs** : qui permettent au jumeau numérique de récolter les données en temps réel afin de reproduire le même comportement que le processus de fabrication.
- **Les données** : récoltées en temps réel ainsi que les données opérationnelles de l'entreprise, on peut retrouver même les dessins techniques, les données externes sont combinées.
- **Intégration des données** : communiquées par les capteurs au monde numérique grâce à la périphérie, les interfaces de communication et la sécurité.
- **Analyse des données** : au moyen de simulation et de visualisation par le jumeau numérique.
- **Actionneurs** : Le jumeau numérique va produire la même action que le modèle réel au moyen des informations transmises par les actionneurs.

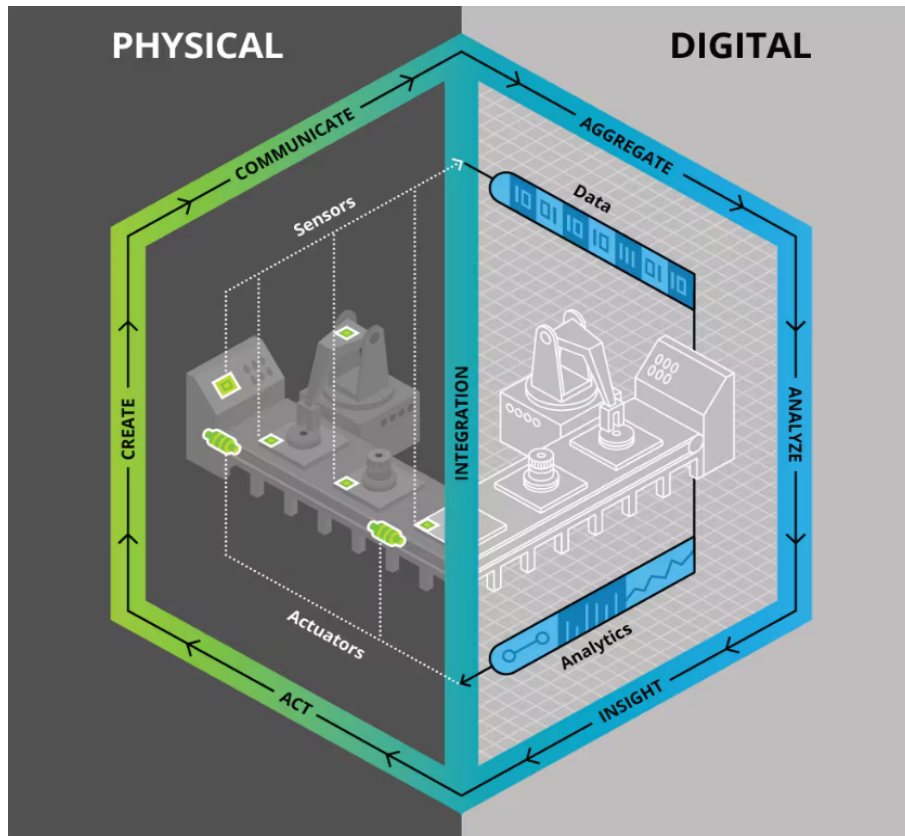


Figure 1.5: Les éléments d'un modèle de jumeau numérique [20]

1.3.3 Les domaines d'applications du jumeau numérique :

Les jumeaux numériques peuvent modéliser toute entité physique, allant des nanomatériaux aux villes entières. Dans certains cas, ils ont même été utilisés pour représenter des êtres humains et leurs comportements. De nombreuses organisations, à travers divers secteurs, conçoivent, testent et intègrent les jumeaux numériques dans leurs opérations. Les exemples suivants démontrent le potentiel des jumeaux numériques à résoudre une multitude de défis commerciaux et à dévoiler de nombreuses sources de valeur.

Les jumeaux numériques dans les sciences de la vie et la santé :

L'intégration des technologies de l'Industrie 4.0 dans les systèmes de santé a donné naissance au concept de Santé 4.0 (H4.0), permettant de personnaliser les soins en temps réel pour les patients, les professionnels et les aidants. Les jumeaux numériques, technologie clé de cette révolution, sont particulièrement recherchés pour résoudre les problèmes de santé [28]. Erol et al. (2020) ont étudié les pratiques des jumeaux numériques dans quatre domaines principaux : les patients numériques, l'industrie pharmaceutique, les hôpitaux et les technologies portables. [21]

Les chercheurs et cliniciens explorent le potentiel des jumeaux numériques pour modéliser les aspects du corps humain, aidant les médecins à mieux comprendre la structure et le comportement du corps sans tests invasifs. Ces modèles permettent de répéter des opérations complexes en toute sécurité et d'accélérer le développement de médicaments en évaluant de nouvelles thérapies virtuellement. [19]

Par exemple, Siemens Healthineers a développé des modèles numériques du cœur humain, simulant son comportement mécanique et électrique, pour créer des modèles uniques et spécifiques aux patients à partir d'images médicales et de données d'électrocardiogramme [19]. Philips, de son côté, travaille sur un projet similaire pour créer un jumeau numérique du cœur et utilise des techniques d'intelligence artificielle pour le support à distance des équipements complexes comme les scanners IRM, comme montré sur la figure 1.6 . [?]

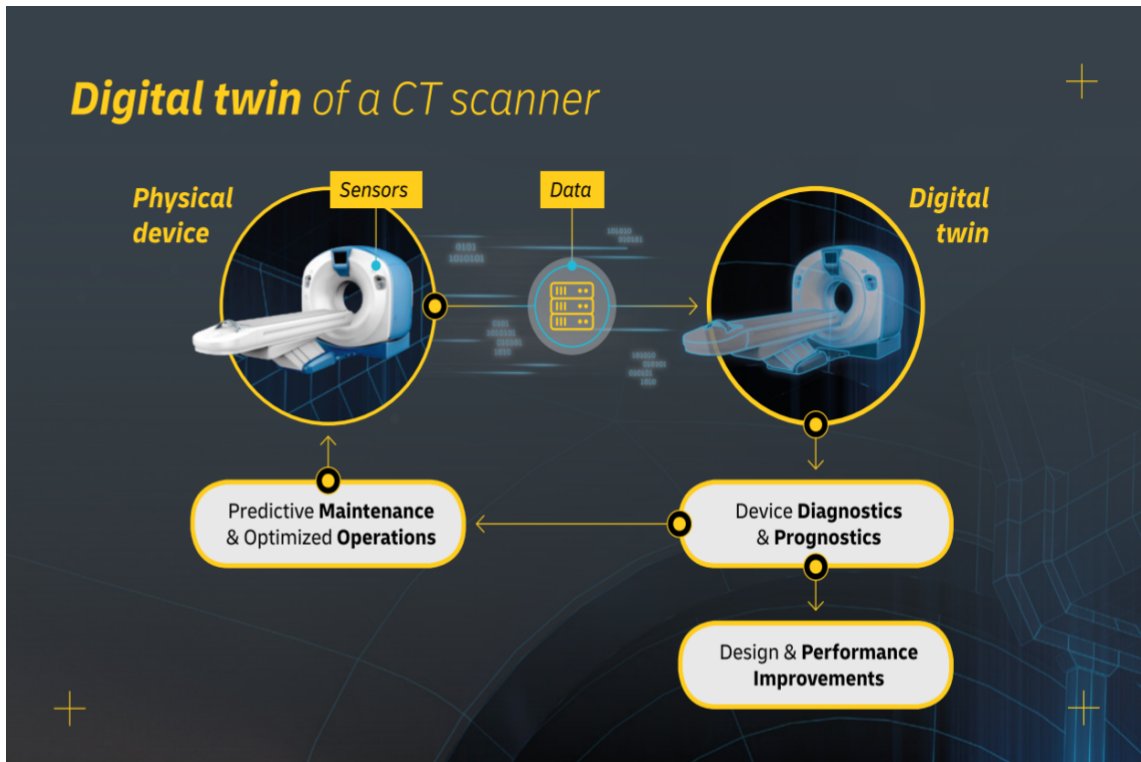


Figure 1.6: Jumeau numérique d'un scanner à rayons X [19]

Des approches de jumeaux numériques, initialement développées pour la fabrication, sont également appliquées pour améliorer l'efficacité des hôpitaux. L'hôpital Mater Private à Dublin a créé un jumeau numérique de son service de radiologie pour modéliser les flux de travail et tester des modifications d'agencement et de demande. De même, GE Healthcare utilise cette technologie pour modéliser et simuler les flux de travail hospitaliers dans sa plateforme Hospital of the Future Analytics. [19]

Enfin, le projet DigiTwins, un consortium de 118 entreprises et institutions académiques, vise à créer un jumeau numérique personnel pour chaque citoyen européen, afin d'améliorer significativement la capacité des médecins à diagnostiquer et traiter les maladies, avec un potentiel d'économies de 280 milliards d'euros par an pour les systèmes de santé européens. [19]

Les villes intelligentes :

Les villes sont devenues de plus en plus intelligentes au cours des deux dernières décennies, utilisant les technologies de l'information et de la communication (TIC) pour surveiller les opérations municipales. Les données sont générées à partir de diverses activités urbaines telles que le trafic et les transports, la production d'électricité, la distribution des services publics, l'approvisionnement en eau et la gestion des déchets.

White et al. (2021) ont démontré comment un jumeau numérique public et ouvert de la zone des Docklands à Dublin peut être utilisé pour la planification urbaine des horizons et des espaces verts, permettant aux utilisateurs d'interagir et de commenter les changements prévus [59]. "Virtual Singapore", une initiative de la nation intelligente de Singapour, est le premier jumeau numérique au monde d'une cité-état existante, permettant aux Singapouriens de participer efficacement à l'économie numérique et à l'urbanisation [46]. Le jumeau numérique de Zurich, l'un des plus avancés au monde, fait partie intégrante de la stratégie de ville intelligente de Zurich, facilitant la prise de décision grâce à une image spatiale numérique [50].

En résumé, les villes intelligentes exploitent les TIC pour améliorer la gestion urbaine, avec des exemples notables à Dublin, Singapour et Zurich, où les jumeaux numériques jouent un rôle crucial dans la planification et la prise de décision urbaines.

Les bâtiments :

L'émergence des bâtiments intelligents permet un contrôle avancé des aspects opérationnels et structurels, tels que l'efficacité énergétique, la surveillance en temps réel de l'état des structures et la résistance aux catastrophes naturelles. Le développement et l'intégration des jumeaux numériques deviennent indispensables. [28]

Shu et al. (2019) ont introduit le concept de jumeau numérique pour surveiller la santé structurelle en temps réel en utilisant des données 3D [51]. Kaewunruen et al. (2018) ont utilisé des modèles d'information du bâtiment (BIM) pour visualiser, collaborer et estimer les coûts de bâtiments à énergie nette zéro [34].

En résumé, les jumeaux numériques sont essentiels pour améliorer l'efficacité, la surveillance et la résilience des bâtiments intelligents, avec des avancées significatives dans la capture de données et le support décisionnel. [28]

le transport :

En plus des jumeaux numériques orientés produits et processus, les jumeaux numériques logistiques ont également suscité l'intérêt de plusieurs études. Pour traiter les préoccupations logistiques internes, Martínez-Gutiérrez et al. (2021) ont proposé un nouveau concept de jumeau numérique basé sur des services externes pour le transport de véhicules guidés automatiquement (AGV) [28]. Yan et al. (2021) ont mis en place un équipement virtuel pour résoudre un problème de planification de processus lié au transport [28]. Brenner et Hummel (2017) ont implémenté un système de gestion numérique des ateliers au sein de l'ESB Logistics Learning Factory, qui comprenait la majorité des composants d'infrastructure nécessaires [28].

D'autres applications de jumeau numérique dans le domaine des transports incluent les ascenseurs et les systèmes de transport vertical (Gonzalez et al., 2020), les jumeaux numériques pour pipelines (Sleiti et al., 2022), le système de gestion du trafic routier (Wang et al., 2021), les véhicules électriques intelligents (Bhatti et al., 2021) et le contrôle adaptatif du trafic [28].

En résumé, les jumeaux numériques logistiques sont utilisés pour améliorer la gestion des transports internes et externes, avec des applications allant des AGV et pipelines aux véhicules électriques intelligents et systèmes de contrôle du trafic [28].

L'énergie :

Les chercheurs se sont intéressés à la façon dont les jumeaux numériques peuvent offrir un avantage disruptif aux niveaux de contrôle, d'optimisation et de conception lorsqu'il s'agit de production, de transit ou de stockage d'énergie, voire même de consommation. Certaines études ont été menées dans un environnement industriel, telles que les systèmes de fabrication écoénergétiques, malgré le fait que l'application des jumeaux numériques pour la gestion de la consommation d'énergie des équipements (EECM) ne se limite pas à cela. Zhang et al. (2018) ont identifié trois grandes classes : l'optimisation de la consommation d'énergie, l'analyse de la consommation d'énergie et la surveillance de la consommation d'énergie. Une stratégie basée sur les jumeaux numériques combinée à une prise de décision basée sur des agents pour l'optimisation en temps réel de la planification des mouvements dans les cellules robotisées a été mise en place par Vatankhah Barenji et al. (2021), incluant l'optimisation des couches physique et virtuelle de l'usine de production pour réduire la consommation d'énergie [28].

La production d'énergie, qu'elle soit d'origine fossile ou renouvelable, implique de gros actifs complexes, souvent dans des endroits éloignés. Ces caractéristiques stimulent l'exploration et l'adoption des jumeaux numériques comme moyen d'améliorer la fiabilité et la sécurité tout en maîtrisant les coûts d'exploitation. Dans le secteur pétrolier et gazier offshore, par exemple, Aker BP a utilisé la technologie d'analyse de Siemens dans son projet Ivar Aasen au large de la côte norvégienne. Le succès du projet, qui réduit les besoins en main-d'œuvre sur la plateforme et optimise les calendriers

de maintenance de l'équipement, a conduit à un accord stratégique entre les deux entreprises. Ailleurs dans la mer du Nord, Royal Dutch Shell est impliqué dans un projet de deux ans pour développer un jumeau numérique d'une plateforme de production offshore existante. Dans le secteur de l'énergie éolienne, les solutions de jumeaux numériques aident les entreprises à gérer des turbines plus grandes et à atteindre des objectifs de fiabilité et de réduction des coûts agressifs. Par exemple, le groupe de conseil en ingénierie norvégien DNV GL a développé WindGEMINI, un ensemble de jumeaux numériques comprenant des modèles basés sur la physique pour surveiller l'intégrité structurelle et prédire la durée de vie résiduelle des turbines et des composants. GE explore également le potentiel des jumeaux numériques dans son propre secteur des éoliennes. Dans un projet pilote, la société a construit un modèle thermique des composants clés des éoliennes, permettant aux ingénieurs de créer des capteurs virtuels estimant la température des composants inaccessibles en fonction des données des capteurs physiques installés à proximité. [19]

Industrie 4.0 et fabrication intelligente :

Les jumeaux numériques sont devenus cruciaux dans l'industrie, facilitant la fabrication intelligente. Les chercheurs ont identifié quatre phases de durée de vie des jumeaux numériques pour les applications industrielles : conception, fabrication, service et retraite. Dans la phase de conception, les jumeaux numériques sont utilisés pour l'optimisation itérative et l'évaluation virtuelle, offrant ainsi des avantages significatifs en termes de conception et de validation de produits. En fabrication, ils permettent la surveillance en temps réel et l'optimisation des processus, contribuant ainsi à l'amélioration de l'efficacité opérationnelle et à la réduction des coûts. La maintenance prédictive et le diagnostic des pannes sont des applications courantes dans la phase de service, assurant une fiabilité accrue des équipements et des processus. Enfin, la phase de retraite bénéficie de la préservation des connaissances pour éviter les erreurs récurrentes, démontrant ainsi l'importance croissante des jumeaux numériques dans l'ensemble du cycle de vie industriel et leur rôle essentiel dans la transformation numérique de l'industrie. [28]

1.3.4 les caractéristiques du jumeau numérique :

Le jumeau numérique sera donc composé de trois principales parties :

Les données et les modèles :

Les données sont des informations brutes qui peuvent être collectées, stockées et traitées. Elles proviennent du monde physique par le biais de capteurs ou du monde virtuel par le biais de bases de données, de systèmes d'information...[33]. Les modèles sont des représentations simplifiées ou abstraites de systèmes, de processus ou de phénomènes réels. Ils sont employés pour saisir, anticiper ou reproduire le comportement de ces éléments. Les données sont nécessaires pour alimenter le jumeau numérique en informations en temps réel sur l'objet ou le système réel, tandis que les modèles permettent de simuler, prédire et analyser le comportement de l'objet ou du système basé sur ces données, offrant ainsi une représentation virtuelle précise et utile.

Les usages :

Les jumeaux numériques ont de multiples usages. Ils permettent d'optimiser les performances en simulant différentes configurations et en identifiant les améliorations possibles. Ils facilitent la prévision et la planification en permettant de simuler le comportement futur d'un objet ou d'un système. Les jumeaux numériques sont également utiles pour la détection des anomalies et la maintenance prédictive, en comparant les données réelles aux prédictions du jumeau numérique. Ils peuvent également être utilisés pour la formation, la visualisation et la collaboration en fournissant une représentation virtuelle précise et interactive de l'objet ou du système réel.

L'évolution des usages du jumeaux numérique peuvent être représenter dans la figure 1.7

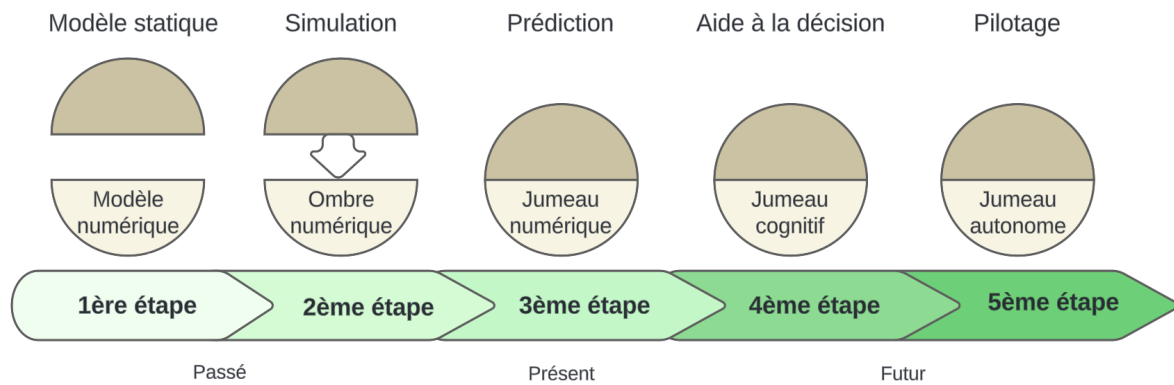


Figure 1.7: Évolution des usages [33]

Dans la première étape, un modèle statique est utilisé pour surveiller passivement l'objet et détecter tout écart par rapport à son état normal. [33]

La deuxième étape implique la collecte automatique de données en temps réel, permettant ainsi la simulation de différents scénarios pour optimiser les activités. [33]

La troisième étape combine les espaces physique et virtuel pour créer un jumeau interactif, utilisant des techniques d'intelligence artificielle pour analyser les données et prédire les dysfonctionnements potentiels. [33]

La quatrième étape vise à créer un jumeau cognitif capable d'apprendre des données physiques et virtuelles pour fournir des aides à la décision avancées à l'utilisateur. [33] Enfin, la cinquième étape aboutit à un jumeau autonome capable de prendre des décisions et d'appliquer des contrôles à l'objet de manière autonome, s'adaptant aux nouveaux usages. [33]

Il est également crucial de considérer l'interface homme-machine pour une interaction efficace. Le jumeau numérique doit être transparent dans son utilisation, avec des représentations en 2D ou en 3D pour une visualisation efficace des informations. Chaque instance de jumeau numérique doit être intelligente, collaborative, interactive, immersive et entièrement contextuelle à chaque étape du processus. [33]

Les applications :

Les applications jouent un rôle crucial dans l'exploitation du jumeau numérique. Leur déploiement permet de faire évoluer le jumeau numérique en fonction des connaissances extraites. Les algorithmes d'intelligence artificielle peuvent également alimenter le jumeau numérique, qui sera ainsi en mesure de prendre des décisions pour se reconfigurer, s'adapter, se corriger et s'améliorer. Les résultats peuvent être visualisés grâce à des interfaces homme-machine pour faciliter la collaboration et fournir des éléments d'aide à la décision. Le jumeau numérique peut également collaborer avec d'autres jumeaux numériques. [33]

1.3.5 Méthodologie de développement et de déploiement du jumeau numérique :

Avant de commencer à développer notre jumeau numérique, il est essentiel de bien comprendre le concept ainsi que ses caractéristiques, afin de pouvoir ensuite passer à sa mise en œuvre. Pour mettre en pratique notre approche de déploiement, nous nous basons sur l'architecture 5C CPS largement reconnue suggéré dans (Lee, Bagheri et Kao 2015) [35]. Nous avons donc cinq processus de déploiement qui sont comme représentés dans la figure 1.8 :

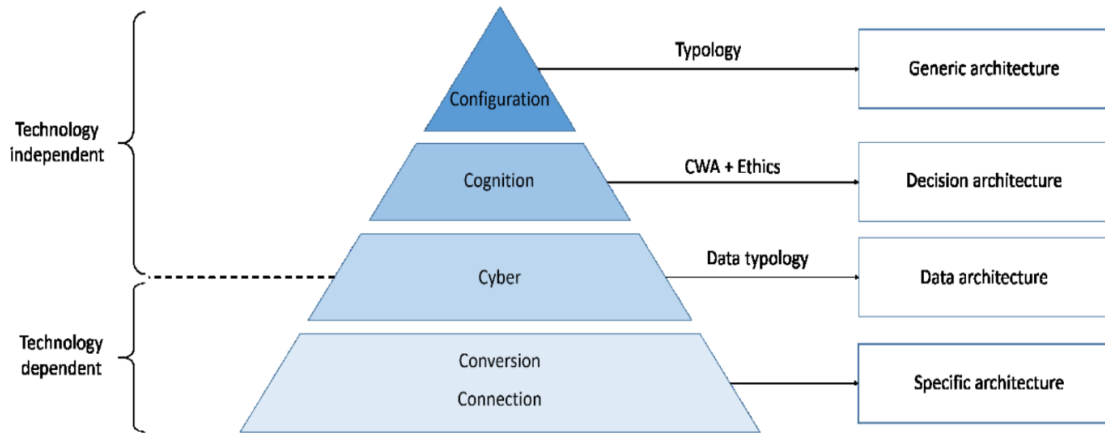


Figure 1.8: Méthodologie de déploiement basée sur l'architecture 5C CPS [27]

- **Configuration :**

La première étape au sommet de la pyramide consiste à configurer le jumeau numérique en définissant ses besoins, ses utilisations et sa typologie. On détaille dans son cas les attributs clés de son architecture pour l'application spécifique envisagée, en proposant une "Typologie" de 13 critères pour guider efficacement les concepteurs qui sont : l'entité du jumeau numérique, le type, le niveau, la maturité, la topologie, la synchronisation, la boucle de décision, les utilisateurs, les usages, les applications, La version à développer, le modèle et enfin la fidélité du jumeau numérique. [27]

- **Cognition :**

Le jumeau numérique évolue vers des systèmes plus autonomes, soulevant des questions sur le rôle de l'agent humain. Cette intégration humaine a conduit au développement d'un système cyber-physique-social, où l'opérateur humain est considéré comme une entité active agissant sur le système. Une coopération entre le jumeau humain et le jumeau numérique est nécessaire, impliquant l'étude des modalités d'interaction et de collaboration sociotechnique, y compris la répartition des tâches, l'attribution des niveaux de décision et l'identification des questions éthiques. Pour analyser cette dynamique, il est proposé d'utiliser l'analyse cognitive du travail (CWA), un cadre basé sur les contraintes pour la construction de systèmes sociotechniques complexes, comprenant cinq étapes : analyse du domaine de travail (WDA), analyse des tâches de contrôle (ConTA), analyse de la stratégie (StrA), analyse de la coopération au sein de l'organisation sociale (SOCA) et analyse des compétences des travailleurs. [27]

- **Cyber :**

À ce stade du déploiement, il est crucial d'ébaucher l'architecture des données pour le jumeau numérique et d'identifier le cycle de vie des données à l'intérieur de celui-ci. C'est à ce moment que les premiers choix technologiques sont faits, ce qui peut inclure la décentralisation, la cybersécurité, et la réactivité du système, entre autres. Pour faciliter ce processus, des schémas de flux de données sont élaborés pour représenter le cycle de vie des données, aidant ainsi à ajuster l'architecture du jumeau numérique en fonction du volume de données nécessaire pour répondre aux besoins spécifiques. [27]

- **Conversion et connexion :**

À ces niveaux, l'architecture précédemment définie sera progressivement affinée en spécifiant les interconnexions et les protocoles de communication, favorisant l'utilisation d'outils standards tels que OPC-UA, MTConnect et MQTT. Ces choix influenceront la sélection des capteurs et des méthodes de collecte de données, qui seront adaptés en fonction du contexte de l'application. De nombreux choix technologiques dépendent souvent des technologies déjà en place dans l'entreprise. L'objectif de ces étapes est de produire des métriques permettant de comparer les différents choix technologiques afin de sélectionner l'architecture la plus adaptée en termes de coût, de performance, d'agilité, de sécurité, etc. [27]

Le cercle vertueux de l'interaction-évolution :

L'interaction continue avec différents intervenants (physiques, numériques et humains) permet au jumeau numérique de se développer et de s'adapter à de nouveaux besoins comme montré dans la figure 1.9 . Cependant, cette évolution dépend du niveau de liberté que nous lui accordons. Plus le jumeau numérique interagit avec son environnement, plus il se développe et élargit ses possibilités : dans les tâches qui lui sont attribuées, dans la précision et l'efficacité avec lesquelles il les exécute, dans la confiance qu'on lui accorde et dans le degré d'autonomie qui lui est octroyé. [28]

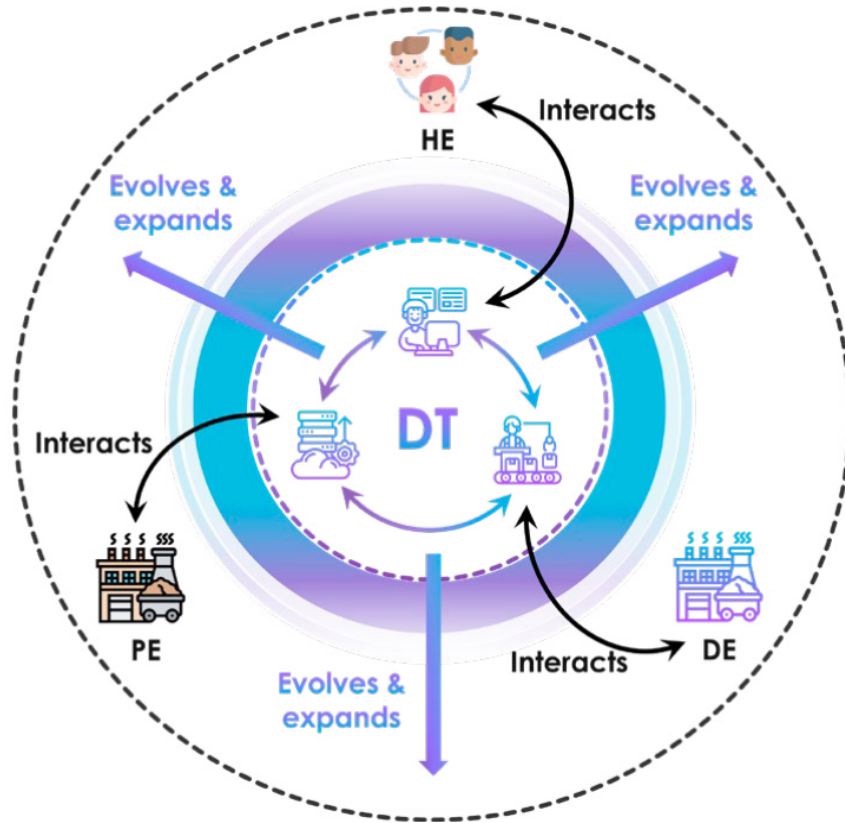


Figure 1.9: Le jumeau numérique dans son système cyber-physique social [28]

1.4 Conclusion :

Dans ce premier chapitre, nous avons plongé dans l'univers fascinant de l'industrie 4.0, explorant ses fondements, son évolution historique et ses principales caractéristiques. Nous avons débuté par retracer son parcours depuis ses débuts dans les années 1970 jusqu'à son statut actuel de révolution majeure dans divers secteurs industriels.

Au cœur de cette révolution se trouve le concept novateur du jumeau numérique, que nous avons scruté en détail. Cette réplique virtuelle et dynamique d'un système physique s'est révélée être un pilier essentiel de cette transformation. Nous avons examiné les différentes définitions du jumeau numérique, révélant sa complexité grandissante, allant des simples modèles virtuels aux entités autonomes.

Dans cette optique, nous avons exploré les multiples domaines d'application du jumeau numérique, allant de la santé à l'industrie en passant par l'énergie. Nous avons analysé ses composants et ses caractéristiques, soulignant son rôle crucial dans l'optimisation des performances, la détection des anomalies et la promotion de la collaboration.

Enfin, nous avons abordé une méthodologie fondamentale pour le développement et le déploiement du jumeau numérique, en mettant en avant l'approche basée sur l'architecture 5C CPS. Cette méthodologie

offre un cadre structuré, prenant en compte les aspects technologiques, humains et sociotechniques nécessaires à la conception et à la mise en œuvre efficaces de ces systèmes complexes.

En conclusion, ce premier chapitre nous a permis de saisir l'importance cruciale du jumeau numérique dans le contexte de l'industrie 4.0. En exploitant les avancées technologiques modernes et en adoptant une approche holistique, nous sommes mieux équipés pour maximiser les avantages de cette révolution industrielle, anticiper les défis futurs et favoriser l'innovation dans divers domaines. Dans cette démarche, le projet TERRA (Pour la Transformation Numérique des Producteurs et Transformateurs Laitiers) joue un rôle essentiel en facilitant la transition numérique dans le secteur agroalimentaire, tout en contribuant activement au développement et à l'application des jumeaux numériques pour une efficacité opérationnelle accrue et une meilleure compétitivité.

Chapitre 2

Le jumeau numérique logistique dans l'agroalimentaire

2.1 Introduction :

De nos jours, la chaîne logistique agroalimentaire est confrontée à des défis complexes, nécessitant une approche intelligente pour répondre aux exigences de connectivité, de visibilité et d'agilité. C'est dans ce contexte que le concept de jumeau numérique émerge comme une solution innovante. Bien que les jumeaux numériques ne soient pas encore largement adoptés dans la logistique, de nombreuses technologies clés sont déjà en place pour les rendre possibles. Ces technologies comprennent l'utilisation de capteurs pour le suivi des expéditions, des stratégies d'API ouvertes, l'adoption de systèmes basés sur le cloud, ainsi que l'application de l'apprentissage automatique et de l'analyse avancée. Dans le secteur agroalimentaire, confronté à des défis uniques tels que la sécurité alimentaire et la gestion des produits périssables, le potentiel du jumeau numérique est particulièrement prometteur. Ce chapitre explorera en détail comment le jumeau numérique peut répondre aux besoins spécifiques de la chaîne logistique agroalimentaire, offrant une visibilité accrue, améliorant la sécurité alimentaire et optimisant les opérations logistiques pour relever les défis du secteur. Le projet TERRA, en collaboration avec divers partenaires de recherche et industriels, s'inscrit comme une initiative clé visant à concrétiser le potentiel du jumeau numérique dans la chaîne logistique agroalimentaire.

2.2 La chaîne logistique agroalimentaire :

La chaîne logistique, ou supply chain, désigne l'ensemble des étapes nécessaires pour acheminer un produit depuis sa conception jusqu'à sa livraison finale au consommateur. Elle englobe la gestion des flux de matières premières, la production, la transformation, le stockage, le transport, et la distribution des produits finis. La performance d'une chaîne logistique repose sur sa capacité à assurer une coordination efficace entre ces différentes étapes, en minimisant les coûts et les délais tout en maximisant la satisfaction du client [58].

L'industrie agroalimentaire, quant à elle, se réfère à l'ensemble des activités liées à la production, la transformation et la commercialisation des produits alimentaires. Cette industrie est caractérisée par la diversité et la complexité des produits, souvent périssables, qui nécessitent des conditions de stockage et de transport spécifiques. De plus, elle doit répondre à des exigences strictes en matière de sécurité alimentaire et de traçabilité, afin de garantir la qualité et la sécurité des aliments consommés [56].

Combiner ces deux concepts donne naissance à la chaîne logistique agroalimentaire, qui intègre les spécificités de la gestion logistique avec les particularités de l'industrie agroalimentaire. Cette chaîne logistique doit non seulement gérer les flux de produits alimentaires depuis les fermes jusqu'aux consommateurs, mais aussi assurer la fraîcheur et la sécurité des produits à chaque étape. Elle inclut des opérations telles que la récolte, la transformation, l'emballage, le stockage à température contrôlée, le transport sous chaîne du froid, et la distribution aux points de vente ou directement aux consommateurs [11] [4]. La chaîne logistique agroalimentaire est ainsi un système complexe et interconnecté,

où l'efficacité opérationnelle et la gestion rigoureuse de la qualité sont essentielles pour répondre aux attentes des consommateurs et aux réglementations en vigueur [32].

Dans notre étude, nous allons nous concentrer sur cette notion de chaîne logistique agroalimentaire mais en nous limitant aux circuits courts. Les circuits courts se caractérisent par un nombre réduit d'intermédiaires entre le producteur et le consommateur final comme montré sur la figure 2.1, souvent favorisés pour leurs avantages en termes de durabilité, de réduction de l'empreinte carbone, et de soutien aux producteurs locaux. En nous basant sur cette approche, nous viserons à optimiser la logistique des circuits courts en intégrant les concepts de jumeaux numériques pour améliorer la traçabilité, l'efficacité et la réactivité des systèmes de distribution locaux.

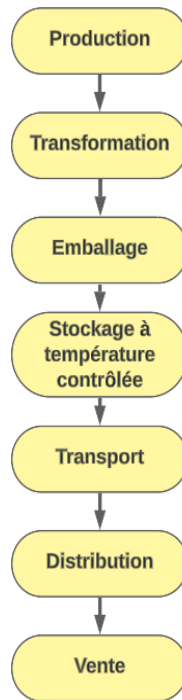


Figure 2.1: schéma de la chaîne logistique agroalimentaire en circuits courts

Ce projet s'inscrit parfaitement dans le cadre de la région Bretagne, réputée pour son dynamisme et son importance dans l'industrie agroalimentaire. La Bretagne est l'une des principales régions françaises pour la production agricole et alimentaire, contribuant significativement à l'économie nationale dans ce secteur. En tirant parti de son riche patrimoine agroalimentaire et de son engagement en faveur de l'innovation, le projet TERRA (Transformation Numérique des Producteurs et Transformateurs Laitiers) vise à renforcer la compétitivité des acteurs locaux. En collaboration avec divers organismes de recherche et partenaires industriels, nous avons l'opportunité de développer des méthodes innovantes pour optimiser la chaîne logistique des circuits courts en Bretagne, tout en soutenant la transition numérique et en améliorant la durabilité et l'efficacité des processus logistiques.

2.3 Jumeau numérique logistique :

Pour mieux appréhender le concept du jumeau numérique logistique, nous pouvons commencer par définir le jumeau numérique en lui-même, tel que mentionné précédemment, comme une représentation virtuelle et dynamique d'un objet physique ou immatériel. Ce peut être un produit, un processus ou un service, unique en son genre, évoluant dans le temps de manière synchrone avec l'objet observé.

Quant à la logistique, elle peut être définie comme l'ensemble des étapes impliquées dans la chaîne d'approvisionnement, depuis l'acquisition des matières premières jusqu'à la livraison d'un produit ou d'un service au client.

Alors que le concept de jumeau numérique logistique n'est pas encore clairement défini, différentes entreprises et chercheurs commencent à proposer des définitions. Par exemple, AnyLogistix décrit le jumeau numérique logistique comme "un modèle de simulation détaillé d'une chaîne logistique qui utilise des données en temps réel pour prédire la dynamique de la chaîne logistique. À partir de là, les analystes peuvent comprendre le comportement de la chaîne logistique, anticiper les situations anormales et élaborer un plan d'action." [9] de plus de Ivanov et Dolgui qui le définissent comme étant "un modèle numérique informatisé de la SC qui représente l'état du réseau à tout moment et en temps réel, permettant une visibilité complète de la SC de bout en bout afin d'améliorer la résilience et de tester les plans d'urgence. Un jumeau numérique représente la SC physique sur la base des données réelles de transport, d'inventaire, de demande et de capacité et peut donc être utilisé pour la planification et les décisions de contrôle en temps réel." [32]

Afin d'aboutir à cette vision intégrée du jumeau numérique, il sera nécessaire d'avoir :

- Un échange de données continu entre les deux espaces réel et virtuel.
- Une capacité à générer de la donnée pertinente, fiable et sécurisée au bon niveau de précision.
- Une stratégie de construction du jumeau numérique permettant d'enrichir les modèles par les données de façon continue à la fois en ligne et hors ligne.
- La capacité du jumeau numérique à intervenir sur l'objet.
- Une capacité d'apprentissage du jumeau numérique.

2.3.1 Les caractéristiques du jumeau numérique logistique agro-alimentaire :

- **La surveillance :** La surveillance constitue une caractéristique essentielle du jumeau numérique. Grâce à l'Internet des objets (IoT), il est possible d'obtenir des données en temps réel dans la chaîne logistique alimentaire, permettant ainsi aux gestionnaires de prendre des décisions éclairées. De plus, le jumeau numérique a le potentiel d'atténuer les risques et les perturbations en fournissant un retour d'informations précis et en permettant une prise de décision rapide et opportune. [30]
- **La simulation en temps réel :** Il s'agit là d'une des caractéristiques fondamentales du jumeau numérique, qui consiste à créer un modèle numérique d'un système permettant de prendre des décisions en se basant sur l'état actuel de l'entité physique. Pour assurer l'efficacité de ce processus, l'entité physique et son modèle numérique doivent être synchronisés et connectés à l'aide de capteurs et d'actionneurs. [30]
- **Analyse des scénarios :** En logistique, les jumeaux numériques visent à accroître l'efficacité opérationnelle et à permettre une planification et un contrôle efficaces des opérations logistiques. Ils représentent le monde réel en prévoyant et en proposant des solutions basées sur l'analyse de divers scénarios. Grâce à des expérimentations avec le jumeau numérique, il deviendra possible d'évaluer la qualité des aliments dans la chaîne logistique alimentaire et de prendre en compte les éventuels changements. [30]
- **Intégration de données et technologie :** Les jumeaux numériques sont réputés pour leur capacité à intégrer différentes technologies et données provenant de sources diverses telles que l'Internet des objets, l'intelligence artificielle, la blockchain, entre autres. [30]
- **La visibilité :** La visibilité des sources d'informations hétérogènes revêt une importance capitale pour améliorer la traçabilité et identifier les éventuels problèmes de sécurité alimentaire et de contamination à différents stades de la chaîne logistique alimentaire. [30]

2.3.2 Les applications du jumeau numérique logistique agro-alimentaire :

Parmi les applications du jumeau numérique logistique agro-alimentaire on trouve :

- L'agriculture alimentaire. [30]
- La transformation des aliments. [30]
- La logistique alimentaire. [30]
- L'emballage alimentaire. [30]
- Le commerce de détail alimentaire. [30]

2.3.3 Facteurs de mise en oeuvre du jumeau numérique logistique agro-alimentaire

:

On distingue plusieurs facteurs impliqués dans la mise en œuvre du jumeau numérique logistique, à la fois externes et internes, notamment :

- **Les facteurs internes :**
 - **Amélioration de l'efficacité opérationnelle :** Les jumeaux numériques renforcent la communication entre les systèmes cybernétiques et physiques, ce qui facilite l'identification des goulots d'étranglement potentiels, la recherche de solutions et l'atteinte d'une plus grande efficacité. [30]
 - **Amélioration de la visibilité et la transparence des chaîne logistique alimentaire :** Les jumeaux numériques fournissent aux fabricants de produits alimentaires, aux distributeurs et aux détaillants une visibilité complète des conditions des aliments tout au long de la chaîne logistique. Ils ont le potentiel de renforcer la sécurité alimentaire en traçant, en suivant et en contrôlant les facteurs de qualité essentiels. [30]
- **Les facteurs externes :**
 - **La pression concurrentielle :** En d'autres termes, l'exploitation du jumeau numérique vise à réduire les coûts et à améliorer la productivité ainsi que la qualité. Cela englobe divers aspects tels que la détection des défauts de qualité, la prédiction des défaillances, la simulation de différents scénarios, l'amélioration de la qualité, la réduction des risques, ainsi que l'atténuation des pertes financières résultant de prises de décision erronées. [30]
 - **Un soutien technologique plus large :** Les technologies de l'industrie 4.0, telles que l'IoT, le cloud computing et les systèmes de réalité virtuelle, facilitent la détection et la surveillance à distance des systèmes de la chaîne d'logistique. Cela favorise un contrôle efficace des dispositifs et une synchronisation entre les mondes virtuel et réel. [30]

2.3.4 Les barrières de mise en oeuvre du jumeau numérique :

- **La sécurité des données et les problèmes de stockage :** Les données jouent le rôle de pont entre le système virtuel et physique. Le jumeau numérique peut ainsi transmettre en temps réel les données des produits alimentaires générées à partir de multiples sources. Cependant, le stockage et la sécurité des données demeurent des obstacles majeurs, rendant difficile la garantie de leur sécurité. [30]
- **Les problèmes de traitement de données :** Les problèmes de traitement des données sont intimement liés aux limitations des ressources matérielles et logicielles, qui conditionnent un flux efficace de données entre le système physique et numérique. De plus, la capacité à gérer de grandes quantités de données (Big Data) est cruciale pour garantir une communication en temps réel, ce qui revêt une importance capitale pour le bon fonctionnement du jumeau numérique. [30]
- **Le manque de collaboration :** Assurer une collaboration efficace entre les différentes parties prenantes (agriculteurs, transformateurs, détaillants, etc.) est souvent un défi majeur. Ces acteurs ont des intérêts divergents et il est essentiel de trouver des mécanismes pour les réunir autour d'objectifs communs. [30]
- **Le manque de synchronisation et d'intégration des systèmes :** La modélisation des jumeaux numériques se confronte à des défis de synchronisation entre les objets physiques et les entités de l'environnement virtuel. Pour résoudre ces problèmes, plusieurs mesures sont nécessaires :
 - Des technologies de détection efficaces et fiables pour capturer des informations sur les objets physiques, ainsi qu'une communication rapide entre les capteurs et le jumeau numérique.
 - L'intégration de nouveaux systèmes ou plateformes dans le système existant.

- Le développement d'une plateforme de jumeau numérique intégrée, qui relie différents systèmes existants, est difficile en raison de l'hétérogénéité des formats de données, de la qualité des données et de la fréquence de collecte dans les différents systèmes d'informations.
- **Le coût de mise en oeuvre élevé :** L'investissement initial est souvent élevé, car le retour sur investissement de l'entreprise et les avantages de l'intégration des jumeaux numériques ne sont pas toujours garantis.

2.3.5 Les défis de la chaîne logistique alimentaire :

La chaîne logistique alimentaire représente un maillon essentiel de notre société moderne, assurant la distribution efficace et sécurisée des produits alimentaires de la ferme à la table. Toutefois, cette chaîne complexe est confrontée à une multitude de défis, on retrouve :

- **Complexité et incertitude de la chaîne logistique alimentaire :** Chaque partie prenante de la chaîne logistique alimentaire est confrontée à des défis uniques, d'autant plus que la complexité croît, l'incertitude augmente également. Cette incertitude découle de la fragmentation des entreprises alimentaires et des chaînes d'logistique, ce qui se traduit par un contrôle insuffisant des opérations de stockage et de transport. De plus, les conditions climatiques changeantes et les comportements des consommateurs influent sur la géographie des chaînes logistiques alimentaires, alimentant ainsi l'incertitude. [30]
 - * **Chaîne logistique alimentaire en amont :** L'incertitude est exacerbée par une série de facteurs saisonniers, des conditions météorologiques imprévisibles, la variabilité de la qualité des sols et les disparités inter régionales en matière de climat et de disponibilité des ressources financières. [30]
 - * **Chaîne logistique alimentaire en aval :** a chaîne d'logistique alimentaire est sensible aux fluctuations financières et économiques, caractérisées par leur hétérogénéité et leur volatilité. [30]

Ces incertitudes se manifestent par une diminution de la production et de la commercialisation pour les agriculteurs, ce qui peut entraîner des pénuries alimentaires et des problèmes de sécurité alimentaire pour les consommateurs. [30]
- **La sécurité et la sûreté alimentaire :** La sécurité alimentaire est une préoccupation centrale, constamment menacée par les incertitudes liées à la distribution, telles que les conditions météorologiques défavorables le long de l'itinéraire et les retards d'expédition imprévus. De plus, une mauvaise manipulation post-récolte peut entraîner la détérioration de la qualité des aliments, rendant ces derniers inacceptables pour les consommateurs. Les conditions de stockage inappropriées peuvent également être à l'origine de maladies d'origine alimentaire. Par ailleurs, le suivi de la contamination ou de la détérioration des aliments pendant le transport est entravé par un manque d'informations fiables. [30]
- **Les pertes et déchets alimentaire :** Il s'agit d'un problème significatif, qui constitue un tiers de la production alimentaire totale. Les principales causes du gaspillage incluent :
 - L'inefficacité de la manutention ou du stockage. [30]
 - Le manque d'infrastructures pour la transformation des aliments, le transport ou l'entreposage frigorifique...[30]
- **L'asymétrie d'informations :** Les entreprises rencontrent souvent une asymétrie dans leurs informations et une gestion insuffisante de celles-ci, ce qui rend la gestion de la chaîne logistique alimentaire complexe. Le partage d'informations et la transparence au sein de la chaîne logistique alimentaire sont essentiels pour lutter contre ce problème et améliorer sa gestion. [30]
- **La traçabilité de la chaîne logistique alimentaire :** La traçabilité consiste à suivre les aliments à chaque étape de la chaîne logistique, garantissant ainsi la sécurité et le contrôle qualité à chaque niveau requis. Le manque de transparence entraîne une insuffisance d'informations sur les produits lors de leur transition d'un état à un autre. L'efficacité est compromise en présence de lacunes dans la chaîne logistique alimentaire. Il est crucial d'établir une collaboration efficace entre les parties prenantes pour parvenir à une traçabilité optimale de la chaîne logistique alimentaire. [30]

Toutes ces informations peuvent être résumées par un schéma proposé par Dr Abhijeet Ghadge et Nicky M Yates 2.2 [30] :

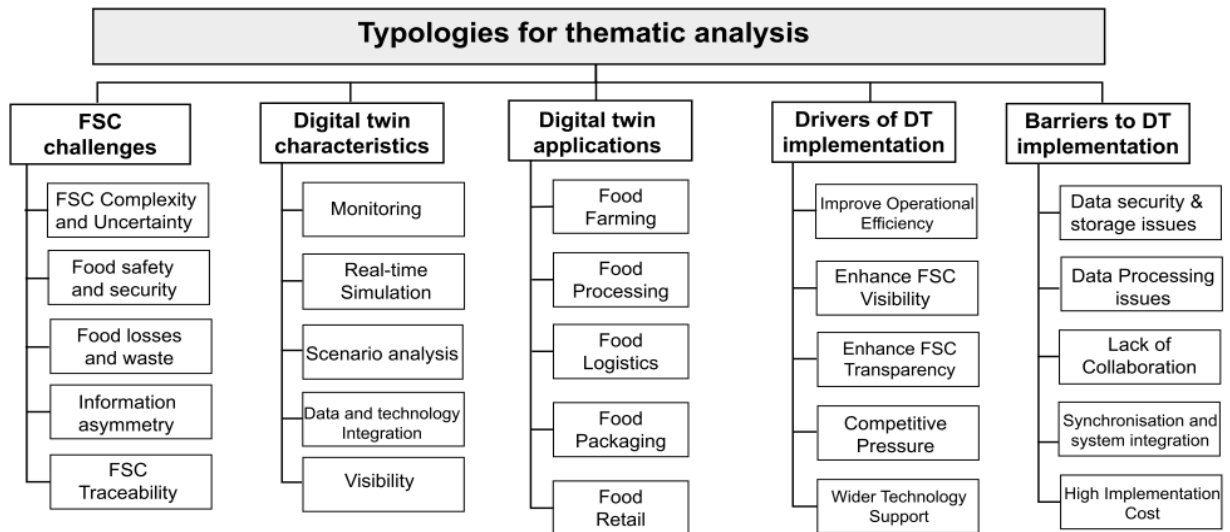


Figure 2.2: Typologies pour l'analyse thématique [30]

Après avoir établi toutes les caractéristiques pertinentes à notre problématique, Dr. Abhijeet Ghadge et Nicky M. Yates ont posé deux questions essentielles :

- 1- Comment le jumeau numérique peut-il relever les défis de la chaîne logistique alimentaire ? [30]
- 2- Quel est le processus de mise en œuvre des jumeaux numériques dans la chaîne logistique alimentaire ? [30]

Pour répondre à chacune de ces questions, des schémas explicatifs ont été élaborés.

2.4 Mise en œuvre des jumeaux numériques au sein des chaînes logistiques alimentaires :

Pour répondre à la question 1 : **Comment le jumeau numérique peut-il relever les défis de la chaîne logistique alimentaire ?**

À la suite de l'analyse thématique, il est évident que les caractéristiques des jumeaux numériques offrent la possibilité de surmonter de nombreux défis et problèmes auxquels la chaîne logistique alimentaire est confrontée, tels que la traçabilité des aliments, l'incertitude et l'asymétrie de l'information. La figure 3.1 illustre les relations entre ces défis de la chaîne logistique alimentaire et les caractéristiques des jumeaux numériques, comme le démontre l'analyse. [30]

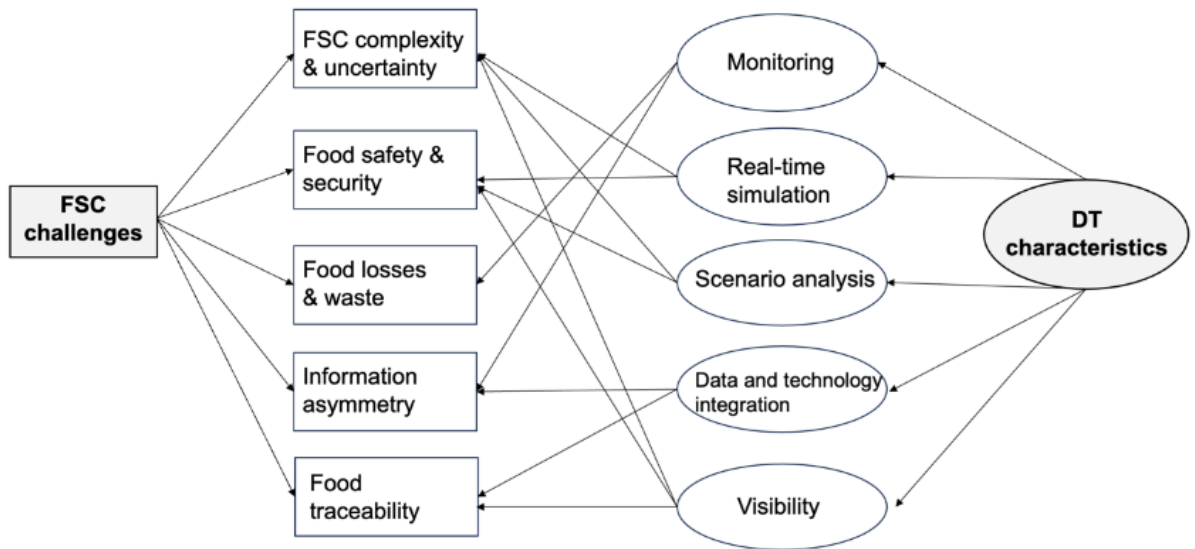


Figure 2.3: La relation entre les caractéristiques des jumeaux numériques et les défis des chaînes logistiques alimentaire [30]

Les jumeaux numériques peuvent aider à réduire la complexité et l'incertitude des chaînes logistiques alimentaires. En permettant aux parties prenantes des chaînes logistiques alimentaires, telles que les agriculteurs, les fabricants de produits alimentaires, les logisticiens et les distributeurs, d'identifier leurs défis et risques actuels grâce à l'analyse de scénarios [30]. Les jumeaux numériques peuvent également réduire l'incertitude en intégrant des données à chaque étape de la chaîne d'logistique alimentaire, offrant ainsi la visibilité nécessaire pour gérer des réseaux complexes et distribués. La simulation en temps réel et le partage de données entre les jumeaux numériques permettent de réagir de manière flexible aux événements imprévus, tels que les perturbations météorologiques. [18] [15]

Les jumeaux numériques peuvent améliorer la sécurité et la sûreté alimentaires grâce à des fonctionnalités telles que la simulation en temps réel, la surveillance, l'analyse de scénarios et la visibilité. Par exemple, les jumeaux numériques peuvent utiliser l'Internet des objets (IOT) pour accroître la transparence et la visibilité des processus de fabrication et d'exploitation des aliments. De plus, le suivi et la surveillance des flux de denrées alimentaires à l'aide de l'IOT permettent d'identifier rapidement les sources de contamination lors de rappels ou d'épidémies [5] [11] [42]

Les jumeaux numériques peuvent atténuer l'asymétrie de l'information dans les chaînes d'logistique alimentaire (FSC) en assurant l'intégration et la visibilité des différentes sources de données et d'informations [12]. Grâce à leur capacité d'intégration, les jumeaux numériques consolident les données fragmentées provenant des producteurs, agriculteurs, transformateurs, distributeurs et détaillants dans un modèle virtuel unifié. Cela remplace les informations cloisonnées par une visibilité et une transparence de bout en bout.[30]

En ce qui concerne la seconde question : **Quel est le processus de mise en oeuvre des jumeaux numériques dans la chaîne logistique alimentaire ?** Il nous faudra l'élaboration d'un processus détaillé de mise en oeuvre du jumeau numérique dans la chaîne logistique alimentaire en utilisant l'analyse thématique, combinées à la théorie de l'adoption de l'innovation et au cadre Technologie-Organisation-Environnement (TOE), comme montré sur la figure 3.2

Ce schéma suit le processus d'adoption de l'innovation et identifie trois phases principales de mise en oeuvre : la pré adoption, l'adoption et la post adoption. Chacune de ces phases est subdivisée en cinq étapes : l'initiation, l'évaluation de la technologie, la décision d'adoption, la mise en oeuvre et

l'évaluation des performances. L'incorporation d'une innovation au sein d'une organisation peut être considérée comme un processus graduel, s'étalant de la prise de décision à son intégration effective dans l'organisation [26] [17]

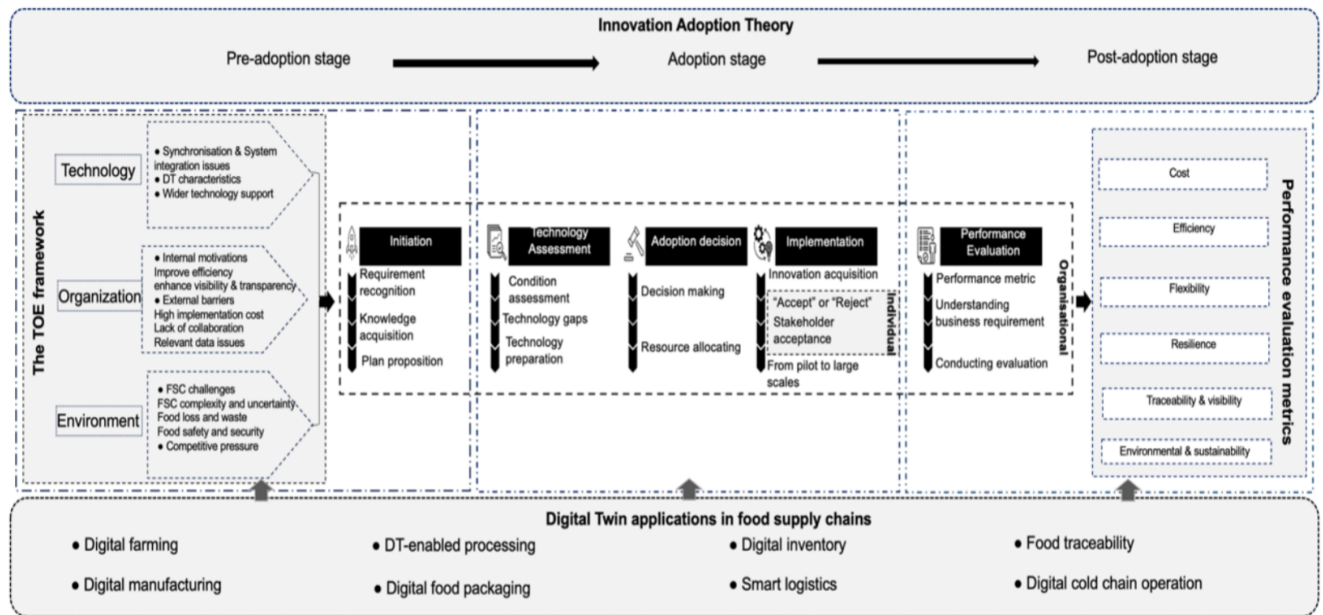


Figure 2.4: Cadre conceptuel pour la mise en œuvre des jumeaux numériques dans les chaînes logistiques alimentaire [30]

2.4.1 La phase de pré-adoption :

Initiation Démarche TOE (Technologie, Organisation, Environnement) :

Dans la phase d'initiation, les entreprises alimentaires évaluent la demande et les besoins potentiels en identifiant des défis spécifiques dans la chaîne logistique alimentaire auxquelles elles sont confrontées. Elles élaborent ensuite un plan approprié pour relever ces défis. Ainsi, elles peuvent vérifier leurs conditions commerciales et opérationnelles d'un point de vue technologique, organisationnel et environnemental **TOE**.

- **Technologique** : Un soutien technologique est un moteur essentiel dans la mise en œuvre des jumeaux numériques. De plus, la synchronisation des données entre les différentes technologies et l'intégration des systèmes favorisent cette mise en œuvre, permettant ainsi de surmonter les défis précédemment identifiés.[30]
- **Organisationnel** : Dans cette étude, les moteurs organisationnels, tels que l'optimisation de l'efficacité opérationnelle et le renforcement de la visibilité et de la transparence, sont identifiés comme des facteurs clés. Par ailleurs, les défis de mise en œuvre, tels que la sécurité et le stockage des données ainsi que le traitement des informations, sont considérés comme des aspects intrinsèques à toute organisation.[30]
- **Environnemental** : Les caractéristiques environnementales incluent des attributs tels que les marchés, l'incertitude et la disponibilité des ressources [41]. Les chaînes logistiques alimentaires font face à des défis tels que la complexité et l'incertitude, la sécurité alimentaire, le gaspillage alimentaire et l'asymétrie de l'information entre les parties prenantes, considérés comme des obstacles environnementaux externes à la mise en œuvre des jumeaux numériques. En revanche, la pression concurrentielle en termes de coûts, de productivité et de qualité constitue un moteur environnemental pour l'adoption des jumeaux numériques [30]

2.4.2 La phase d'adoption :

- **Évaluation de la technologie :** Avant de mettre en œuvre les jumeaux numériques, l'entreprise évalue la suffisance de ses technologies de l'information actuelles et détermine si elles peuvent être combinées avec les applications des jumeaux numériques. [30]
- **Décision d'adoption :** Elle comporte deux parties : la prise de décision et l'affectation des ressources. Une fois que les organisations ont décidé d'adopter une technologie, l'étape suivante consiste à déterminer l'affectation des ressources nécessaires pour cette adoption. [30]
- **Mise en œuvre :** Pour la mise en œuvre, il est essentiel que les parties prenantes acceptent les innovations technologiques. Cela implique de passer de la phase pilote à une application à grande échelle. [30]

2.4.3 La phase de post-adoption :

Cette étape consiste à évaluer les performances pour mesurer l'efficacité et l'adéquation de la technologie. L'objectif est de déterminer si le jumeau numérique répond aux exigences des entreprises. [30]

En résumé, le cadre conceptuel pour la mise en œuvre des jumeaux numériques aide les entreprises alimentaires à surmonter les défis des chaînes logistiques. Ce processus structuré comprend trois phases et cinq étapes critiques. Lors de la phase de pré-adoption, les entreprises évaluent leurs conditions commerciales et opérationnelles sous les angles technologique, organisationnel et environnemental. Les praticiens de la chaîne logistique alimentaire peuvent ensuite évaluer la performance des DT avec des mesures appropriées. Ce cadre devrait améliorer la traçabilité, l'efficacité, réduire les coûts et renforcer la durabilité, augmentant ainsi la compétitivité des chaînes logistiques alimentaires.

2.5 Conclusion :

En conclusion, le jumeau numérique logistique se présente comme une innovation transformative pour la chaîne logistique agroalimentaire, en particulier dans le contexte des circuits courts et des défis spécifiques de ce secteur. En intégrant des technologies avancées telles que l'Internet des objets (IoT), l'intelligence artificielle, et les systèmes basés sur le cloud, le jumeau numérique offre une visibilité accrue, une traçabilité améliorée, et une gestion optimisée des opérations logistiques.

Le projet TERRA, centré sur la région Bretagne, illustre parfaitement comment une approche collaborative entre les chercheurs, les industriels et les producteurs locaux peut concrétiser le potentiel des jumeaux numériques. En se concentrant sur les circuits courts, TERRA vise à renforcer la durabilité, réduire l'empreinte carbone, et soutenir les producteurs locaux tout en répondant aux exigences strictes de sécurité alimentaire et de gestion des produits périssables.

Les caractéristiques du jumeau numérique, telles que la surveillance en temps réel, la simulation, l'analyse des scénarios, et l'intégration des données, sont essentielles pour relever les défis complexes de la chaîne logistique agroalimentaire. Toutefois, la mise en œuvre de cette technologie n'est pas sans obstacles. La sécurité des données, les problèmes de traitement et de stockage, le coût élevé, et la nécessité d'une collaboration efficace entre les différentes parties prenantes sont autant de défis à surmonter.

Le cadre conceptuel pour la mise en œuvre des jumeaux numériques, détaillé à travers les phases de pré-adoption, d'adoption, et de post-adoption, fournit une feuille de route claire pour les entreprises souhaitant adopter cette technologie. En suivant ce processus, elles peuvent graduellement intégrer le jumeau numérique dans leurs opérations, maximisant ainsi les bénéfices tout en minimisant les risques.

En résumé, l'adoption du jumeau numérique dans la chaîne logistique agroalimentaire représente une avancée majeure vers une gestion plus intelligente, plus efficace et plus durable des opérations logistiques. Le projet TERRA, avec son approche innovante et collaborative, pave la voie à une transformation numérique réussie, renforçant ainsi la compétitivité et la résilience de l'industrie agroalimentaire bretonne et au-delà. L'importance cruciale de la traçabilité dans cette transformation sera examinée de manière approfondie dans le chapitre suivant, soulignant ainsi la nécessité d'une gestion transparente et sécurisée des produits tout au long de la chaîne.

Chapitre 3

La traçabilité de la chaîne logistique alimentaire

3.1 Introduction :

La traçabilité des produits alimentaires jusqu'à leur source est devenue un impératif dans le paysage alimentaire contemporain, essentielle pour réagir rapidement en cas d'urgence alimentaire. Cependant, cette tâche cruciale est souvent entravée par divers obstacles qui rendent difficile et coûteux le recueil d'informations complètes et cohérentes nécessaires pour enquêter rapidement sur les sources et identifier les produits concernés. Ces défis multiples complexifient la traçabilité alimentaire, notamment en raison de la diversité des parties prenantes avec leurs lexiques, normes, outils et méthodes variés. De plus, la réticence à divulguer des informations sur les opérations internes, l'absence de compréhension commune des étapes de la chaîne logistique, et l'incomplétude des données ajoutent des complexités supplémentaires.

Face à cette complexité croissante, les ontologies émergent comme une solution prometteuse pour relever ces défis et améliorer la traçabilité alimentaire. Les ontologies offrent la possibilité de créer une compréhension commune du modèle de traçabilité parmi les différentes parties prenantes de la chaîne logistique alimentaire. Elles facilitent également la médiation sémantique en permettant une interprétation harmonisée des données, l'intégration des informations provenant de sources diverses et l'exploration des données pour en extraire des insights significatifs.

Dans cette perspective, cette étude explorera en profondeur le rôle crucial des ontologies dans l'amélioration de la traçabilité alimentaire. En examinant leur potentiel pour surmonter les défis actuels et faciliter une gestion plus efficace et transparente de la chaîne logistique alimentaire, cette recherche vise à contribuer à l'avancement des pratiques et des technologies dans le domaine de la traçabilité alimentaire.

3.2 Ontologie de la traçabilité de la chaîne logistique :

Selon Ferhad Ameri, Evan Wallace, Reid Yoder et Frank Riddick, la traçabilité se définit comme "la capacité d'un système à retracer et suivre l'histoire, l'application et l'emplacement d'un objet. Cela implique le suivi des produits alimentaires à travers les différentes étapes de leur cycle de vie, y compris la production, la transformation et la distribution." [8]

On a plusieurs types de traçabilité :

- **La traçabilité externe :** Tous les articles traçables doivent être identifiés de manière unique et l'information doit être partagée entre tous les participants aux circuits de distribution concernés. [61]
- **La traçabilité interne :** Des processus doivent être maintenus au sein d'une organisation pour relier les identités des matières premières à celles des produits finis. [61]

- **La traçabilité interne et externe** : Chaque partenaire de traçabilité doit être en mesure d'identifier la source directe et le destinataire direct des éléments traçables dans le cadre de son processus. Cela nécessite l'application du principe "un pas en avant, un pas en arrière". [61]

Quant à l'ontologie on pourrait la définir comme étant "Une ontologie est une spécification normalisée représentant les classes des objets reconnus comme existant dans un domaine. Construire une ontologie, c'est aussi décider d'une manière d'être et d'exister des objets de ce domaine." [16]

L'ontologie de la traçabilité de la chaîne logistique est basée sur le cadre **CTE/KDE**, proposé par l'Institut des Technologues de l'Alimentation (IFT), afin de relever les divers défis auxquels la chaîne logistique alimentaire est confrontée. [8]

Le concept **CTE/KDE** est une approche structurée qui définit les événements de suivi critiques (CTE) et les éléments de données clés (KDE) associés à ces événements. Il s'agit essentiellement d'une méthodologie permettant de collecter et de gérer les informations de traçabilité dans la chaîne logistique alimentaire. Il fournit des informations sur le quoi ?, le où ?, et le quand ? en ce qui concerne les produits alimentaires qui traversent la chaîne logistique. [8]

- **CTE (les événements de suivi critiques)** : Le cadre CTE (Critical Tracking Events) définit les principaux événements de suivi critiques dans le cycle de vie d'un produit alimentaire. Ces événements se produisent lorsque le produit est modifié, déplacé ou subit un changement d'identité, de garde ou de propriété. [8]
- **KDE (les éléments de données clés)** : Chaque événement de suivi critique est associé à des "Key Data Elements" (KDE), qui sont des éléments de données clés fournissant des informations sur les lieux probables de contamination des produits, les opérateurs impliqués, les équipements de transport, les fournisseurs de matériaux, etc. [8]

Nous avons également la notion **TRU (Traceable Resource Unit)** ou Unité de Ressources Traçable TRU, qui est une collection de matériaux partageant une histoire commune et pour laquelle un agent peut avoir besoin de récupérer des informations. Il s'agit d'une classe de rôle, ce qui signifie que toute entité matérielle peut être considérée comme une TRU si elle remplit cette fonction.[8]

3.3 Méthodologie de développement de l'ontologie :

L'ontologie de traçabilité de la chaîne logistique (SCT) est développée conformément aux principes techniques et aux lignes directrices de l'Industrial Ontologies Foundry (IOF) ou Fonderie d'ontologies industrielles. L'IOF est une communauté internationale regroupant des représentants du gouvernement, de l'industrie et du milieu universitaire, créée dans le but de promouvoir l'adoption des ontologies dans le secteur manufacturier. [54]

Les objectifs techniques de l'IOF sont les suivants [39]:

- Créer des ontologies ouvertes et basées sur des principes, permettant de dériver de manière modulaire d'autres ontologies spécifiques à un domaine ou à une application.
- S'assurer que les ontologies de l'IOF ne sont ni propriétaires ni spécifiques à une application, afin qu'elles puissent être réutilisées dans divers sous-domaines industriels et par différents organismes de normalisation.
- Fournir des principes et des bonnes pratiques pour que des ontologies de qualité favorisent l'interopérabilité.
- Instituer un mécanisme de gouvernance pour maintenir et promouvoir les objectifs et principes de l'IOF.

- Fournir un cadre organisationnel et des processus de gouvernance garantissant la conformité aux principes et meilleures pratiques de l'IOF.

Les ontologies de l'IOF utilisent BFO (Basic Formal Ontology) comme ontologie de haut niveau (TLO (Top Level Ontology)). BFO est largement utilisé pour développer des ontologies interopérables pour les applications biologiques. Le BFO divise les entités en deux catégories : les continuants et les occurrents. Les continuants sont des entités qui persistent dans le temps tout en conservant leur identité . Les occurrents, quant à eux, sont des processus, événements ou manifestations auxquels participent les entités continuantes. [6]

Les ontologies de l'IOF utilisent également une ontologie de niveau intermédiaire commune appelée IOF Core. Cette ontologie IOF Core comprend des constructions et des modèles génériques réutilisables dans les ontologies industrielles de niveau domaine. [8]

L'utilisation conjointe d'une ontologie de haut niveau (TLO) et d'une ontologie de niveau intermédiaire rationalise le processus de développement d'ontologies. Cela fournit des modèles de conception pré validés et permet de concevoir des ontologies plus réutilisables et conformes à des principes. [8]

L'ontologie de traçabilité de la chaîne logistique (SCT) est considérée comme une ontologie de niveau domaine qui importe le BFO, l'IOF Core et certaines constructions de l'ontologie de référence de la chaîne logistique (SCRO) [6]. Chaque classe de la SCT doit avoir une classe parentale BFO, IOF Core ou SCRO. [6]

Les exigences spécifiques pour la référence ontologique de la chaîne logistique (SCRO) sont :

- SCRO doit être petite et modulaire, c'est-à-dire conçue de manière à être compacte et à pouvoir être divisée en modules indépendants pour en faciliter la gestion et l'utilisation. [6]
- SCRO doit être suffisamment bien axiomatisée pour permettre l'interopérabilité et l'intégration des applications. [6]
- SCRO doit réutiliser les relations existantes dans les ontologies de niveau intermédiaire et supérieur, c'est-à-dire qu'il doit éviter de redéfinir des relations déjà établies. [6]
- SCRO doit fournir des classes génériques pour représenter divers processus, rôles, fonctions, ainsi que des entités matérielles ou informationnelles de la chaîne logistique. [6]
- SCRO doit fournir les éléments essentiels permettant de développer des ontologies spécifiques pour des applications de la chaîne logistique, couvrant les niveaux stratégique, tactique et opérationnel. [6]
- Toutes les classes de SCRO doivent être des sous-classes d'une classe de l'ontologie de niveau intermédiaire ou supérieur, afin d'établir une hiérarchie cohérente et d'assurer l'intégration avec d'autres ontologies. [6]

La méthodologie de développement de l'ontologie comprend plusieurs étapes clés, comme mentionné précédemment elle va utiliser une ontologie de haut niveau appelée Basic Formal Ontology (BFO) comme base pour développer l'ontologie de référence pour les chaînes logistique :

- **Analyse des exigences** : Consiste à comprendre les besoins et les objectifs du domaine d'application de l'ontologie. [6]
- **Collecte de données** : A partir de différentes sources pour l'élaboration de l'ontologie.[6]
- **Modélisation conceptuelle** : Pour représenter les concepts clés et les relations entre eux.[6]
- **Définition des classes et des propriétés** : Pour représenter les concepts du domaine.[6]

- **Définition des axiomes et des règles** : Pour décrire les contraintes et les comportements spécifiques du domaine.[6]
- **Validation et vérification** : Pour s’assurer de la cohérence et de la conformité (Questions de compétences).[6]

3.4 Exemples d’ontologie de traçabilité dans la chaîne logistique agro-alimentaire :

3.4.1 Exemple 1 : La traçabilité des grains de la moissonneuse-batteuse au chariot à grains, au camion, à l’élévateur, au transformateur de produits alimentaires. l’élévateur, jusqu’à l’entreprise de transformation [7] :

L’objectif de ce projet était de faciliter ”la traçabilité des céréales de la moissonneuse-batteuse au chariot à grains, au camion, au silo et à l’entreprise de transformation des aliments”. La recherche présentée porte sur les événements de transfert qui ont lieu dans l’exploitation agricole pour répondre à ces cas d’utilisation. [7]. Ce scénario a été choisi en raison des défis rencontrés par les fabricants d’aliments pour animaux avec les méthodes traditionnelles de test des toxines dans les céréales, qui prenaient beaucoup de temps. En l’absence de capacités de test sur site, les installations prélèvent des échantillons à la réception pour des tests ultérieurs à distance, mais acceptent et utilisent les cargaisons en production avant d’obtenir les résultats des tests. Cela a créé un besoin de déterminer quels matériaux d’alimentation ont utilisé des intrants contaminés dans leur production et où se trouvent les produits finis. Il a également été nécessaire de remonter à la source des intrants contaminés et de signaler d’autres sources susceptibles d’avoir subi les mêmes conditions ayant conduit à la contamination (comme une humidité élevée). [8]

Ce travail a exploré plusieurs nouvelles sous-classes d’Événements de Suivi Critique (CTE). Parmi celles-ci, on trouve l’Événement de Changement de Garde et l’Événement de Changement de Propriété, qui impliquent tous deux un changement d’organisation et/ou de personne ”contrôlant” une entité, telle qu’une portion de grain. Une autre sous-classe introduite dans nos études est l’Événement d’Observation, qui consiste à déterminer et enregistrer une qualité d’une entité. Enfin, un Événement d’Échantillonnage, sous-classe de l’Événement de Transfert, a été ajouté pour représenter la séparation d’une petite quantité de matériau à des fins de test (observation), cette quantité étant représentative de la portion de matériau d’où elle a été prélevée [8]. En complément de l’approche descendante guidée par l’architecture de l’IOF, une approche ascendante a également été adoptée. Cela signifie que la définition des exigences et le processus de validation de l’ontologie sont motivés et orientés par plusieurs cas d’utilisation. Dès le début du processus de développement, un ensemble de Questions de Compétence (CQ) a été élaboré pour valider le contenu ontologique par rapport aux exigences des cas d’utilisation. Cette pratique est courante dans le développement d’ontologies. Les notions clés ont été extraites des ensembles de données et des descriptions de cas d’utilisation, et leurs définitions ont été établies en consultant des experts du domaine et en étudiant les normes et documents techniques pertinents.

Dans la figure 3.1 les lignes de vie des entités clés dans ce scénario et les événements auxquels elles participent sont décrites. Des instantanés des entités clés, comme les TRU, sont présentés sur une période donnée entre les événements. [8]

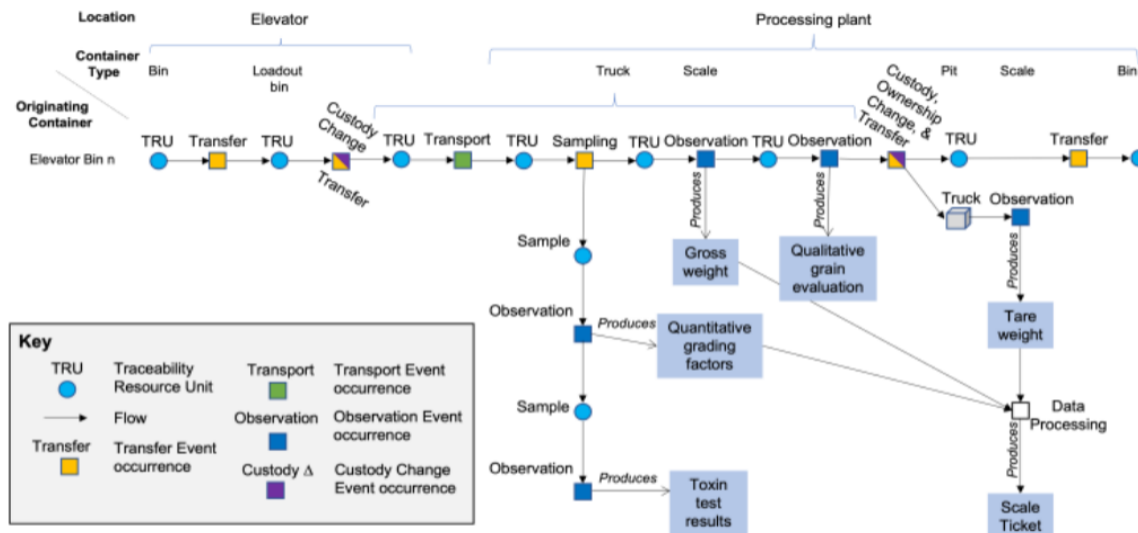


Figure 3.1: La chaîne d'évènements pour le cas d'utilisation d'un silo à grains à un transformateur [8]

es constructions de l'ontologie de la traçabilité de la chaîne logistique sont annotées conformément au guide de vocabulaire d'annotation de l'IOF. Ainsi, chaque construction (classe ou propriété) doit posséder une étiquette et une définition en langage naturel. Ces définitions doivent respecter les règles et exigences de la norme ISO 704 en matière de terminologie. [8]

L'ontologie de traçabilité de la chaîne logistique (SCT) vise à établir un modèle standard pour les données de traçabilité dans les chaînes logistiques agro-alimentaires. Basée sur le cadre CTE/KDE mentionné précédemment qui facilite la reconstitution de l'historique des matériaux. Les graphes de connaissances alignés sur SCT peuvent être interrogés pour retracer la séquence des événements. Différentes ontologies ont été établies pour représenter les divers événements de suivi critique, les résultats de l'observation ainsi que les identifiants associés au cas d'étude. [8]

- **L'évènement de transfert :**

Publiée en 2020, la première version était focalisée sur les événements de transfert et de transport, en particulier dans le contexte de la récolte et du stockage à la ferme. Les TRU sont l'expédition, le lot et le chargement. Comme mentionné précédemment il s'agit d'une classe de rôle, ce qui signifie que toute entité matérielle peut être considérée comme une TRU si elle remplit cette fonction. Par exemple, la figure 3.2 montre une partie des céréales qui peut devenir une charge lorsqu'elle porte un rôle de charge source ou cible. Elle montre également les classes principales de la traçabilité de la chaîne logistique en rapport avec l'évènement de transfert. [8]

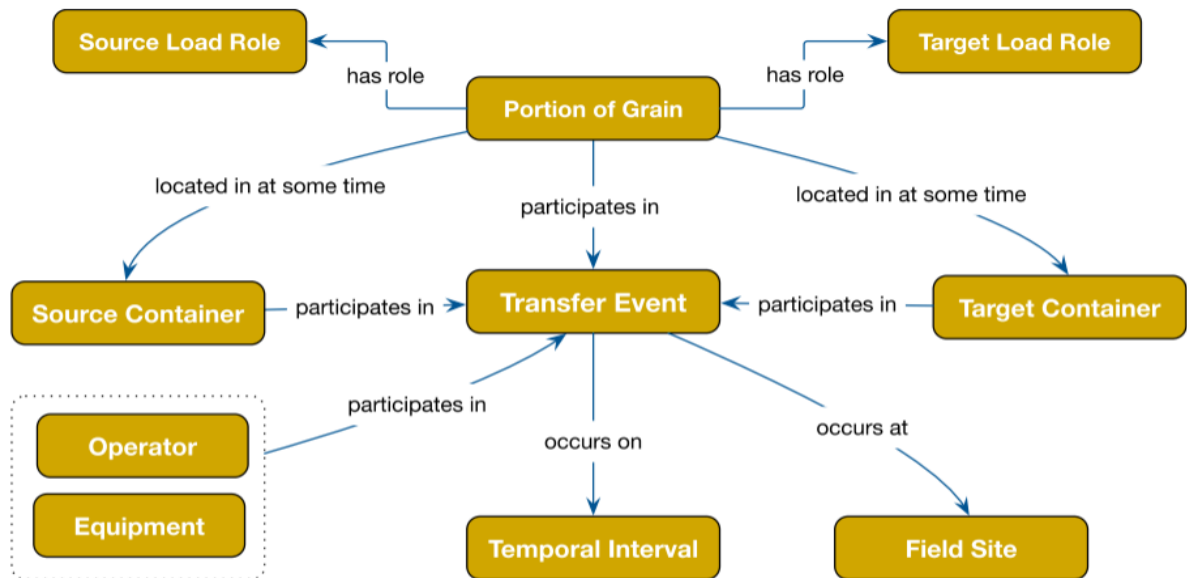


Figure 3.2: Les classes principales de l'ontologie de la traçabilité de la chaîne logistique en rapport avec l'événement de transfert [8]

- **Changement de propriété :**

L'événement de changement de propriété se produit lorsque le titre de propriété d'un objet passe d'un détenteur à un autre. La figure 3.3 illustre le modèle général de cet événement, qui se déroule sur un intervalle temporel (région temporelle unidimensionnelle) comprenant un premier et un dernier instant. Dans cette figure, les rectangles orange représentent les classes et les rectangles violets les instances. [8]

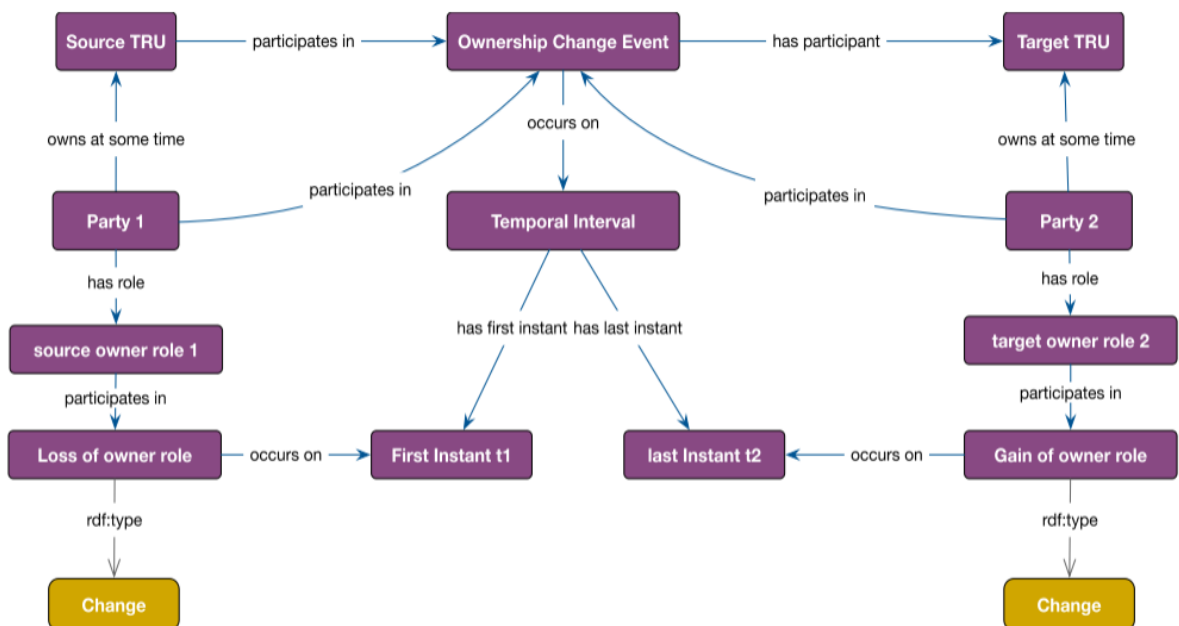


Figure 3.3: Le changement de propriétaire et ses relations temporelles [8]

- **Les résultats d'observation :**

Un événement d'observation génère des mesures sur l'entité observée. Le résultat de ce processus de mesure ou d'observation est une entité informationnelle. Ces résultats peuvent être soit quantitatifs soit qualitatifs. Par exemple, comme le montre la figure 3.4, le résultat du processus de mesure (observation) d'un échantillon de grain est la mesure de la teneur en eau, qui inclut la "valeur mesurée de la teneur en eau" (une expression de valeur mesurée). La valeur de la mesure du taux d'humidité est de 11,13 et l'unité utilisée est le pourcentage du taux d'humidité, C'est donc un résultat quantitatif. [8]

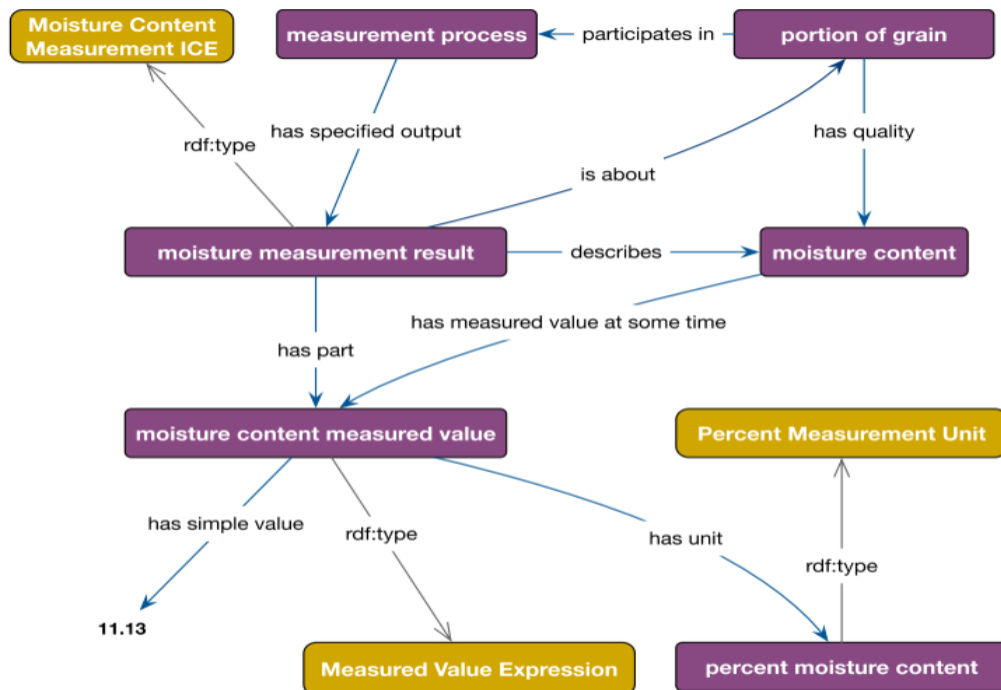


Figure 3.4: Le modèle de représentation des résultats de la mesure de la teneur en eau d'une portion de grain [8]

La figure 3.5 illustre un exemple contenant une valeur de mesure qualitative liée à la détection de la contamination d'une portion de grain. Si une contamination est détectée, l'expression de la valeur mesurée indique "vrai", sinon, elle indique "faux". [8]

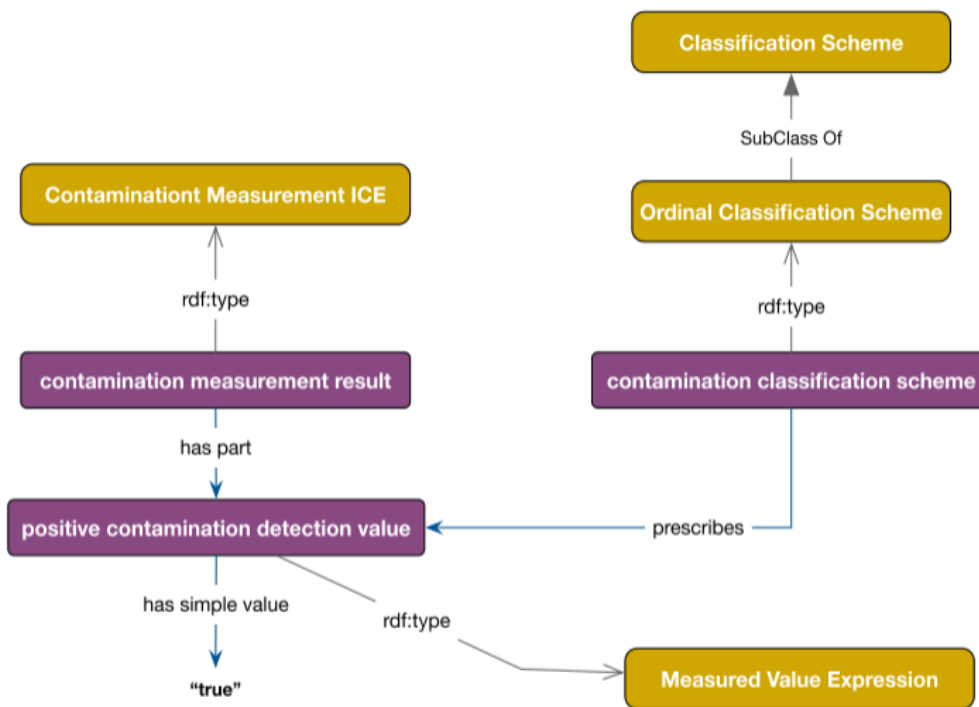


Figure 3.5: Le modèle de représentation des résultats de la détection de la contamination d’une portion de grain[8]

- **L’identifiant :**

L’identification est essentielle pour la traçabilité, permettant de référencer les entités (charges, événements, lieux, etc.) par leurs identifiants. Le SCT utilise la classe iof-core:Identifier pour identifier de manière unique une entité. L’ontologie SCT emploie divers identifiants, tels que ceux pour les événements, lots, charges, conteneurs, rôles et lieux. La figure 3.6 montre l’exemple de l’identification d’un silo à grains par son numéro d’emplacement global (GLN), une clé GS1 pour identifier les entités et lieux physiques dans les chaînes logistiques.

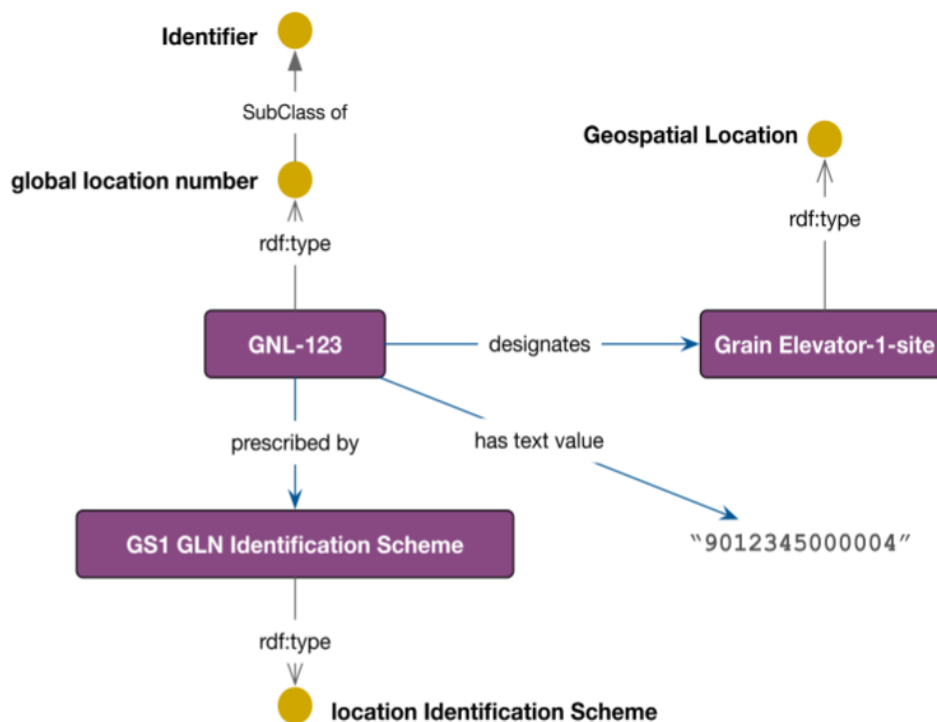


Figure 3.6: Le modèle de représentation de l'identification de l'emplacement d'un silo à grains [8]

3.4.2 Exemple 2 : Développement d'une ontologie formelle pour la traçabilité de la chaîne logistique en utilisant des cas d'utilisation et des données provenant de partenaires dans le domaine des céréales en vrac [7] :

Le cas d'utilisation présenté dans cet article provient d'un projet de preuve de concept (POC) mené par le consortium de commerce électronique agricole AgGateway, intitulé Commodity Automation for Rail and Truck (CART). L'objectif de ce projet était de faciliter la "traçabilité des céréales depuis la moissonneuse-batteuse jusqu'au camion, à l'élevateur à grains, et au transformateur alimentaire". En 2017, le POC du projet CART se concentrait sur le suivi des céréales en vrac, de la récolte jusqu'au stockage à la ferme ou à la livraison à un élevateur à grains. Cette étude porte sur les événements de transfert qui se déroulent à la ferme dans le cadre de ces cas d'utilisation [43] [7]

Le développement de l'ontologie SCT suit une approche à la fois descendante et ascendante. L'approche descendante est guidée par l'architecture de l'IOF, qui exige que les ontologies soient alignées sur des ontologies de haut niveau et de référence. Étant donné que l'ontologie de traçabilité est liée au domaine de la chaîne logistique, elle est alignée sur l'ontologie de référence de la chaîne logistique (SCRO) [6].

Par conséquent, le BFO et la SCRO ont été utilisés comme ontologies importées dès les premières étapes de son développement. Une approche ascendante est également adoptée en ce sens qu'un cas d'utilisation réel lié au domaine des céréales en vrac est sélectionné pour être utilisé pour la définition des exigences et la validation de l'ontologie. L'une des étapes préliminaires consiste à proposer un ensemble de questions de compétence (CQ) pour valider le contenu de l'ontologie par rapport aux exigences du cas d'utilisation. Il s'agit d'une pratique courante dans les efforts de développement d'ontologies [57]. L'ontologie SCT inclut aussi la datation des événements et leur lien avec les régions géospatiales. Cela permet de formaliser et de parcourir le graphe de traçabilité pour reconstruire l'historique des entités matérielles à travers différentes branches et intervalles temporels comme le montre la figure 3.7 :

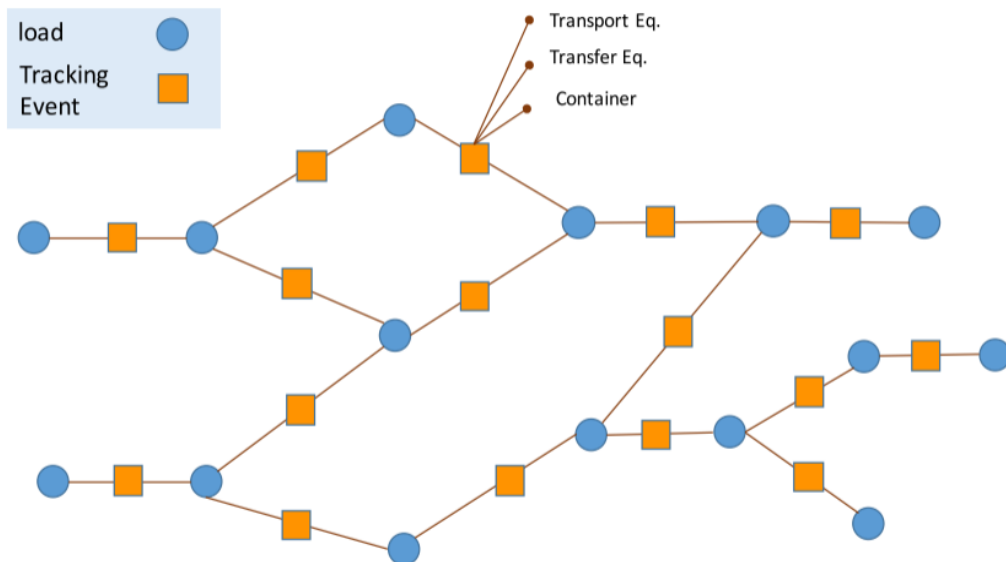


Figure 3.7: Graphe de traçabilité : en parcourant le graphe, l'historique des unités traçables peut être reconstitué. [7]

Une autre classe de BFO largement utilisée dans l'ontologie SCT est la classe de rôle. Un rôle est une entité qui se concrétise (se manifeste ou s'actualise) dans un processus. [7] Comme illustré dans la Figure 3.8, une portion de maïs, déclarée être une instance d'entité matérielle, peut également être inférée être une instance de la classe Load, car elle porte un rôle de Charge qui est réalisé dans un événement de transfert. [7] Dans les diagrammes de classes qui suivent, les boîtes vertes représentent les classes BFO, tandis que les boîtes bleues représentent les classes SCRO (Ontologie de Référence de la Chaîne logistique) ou SCT. [7]

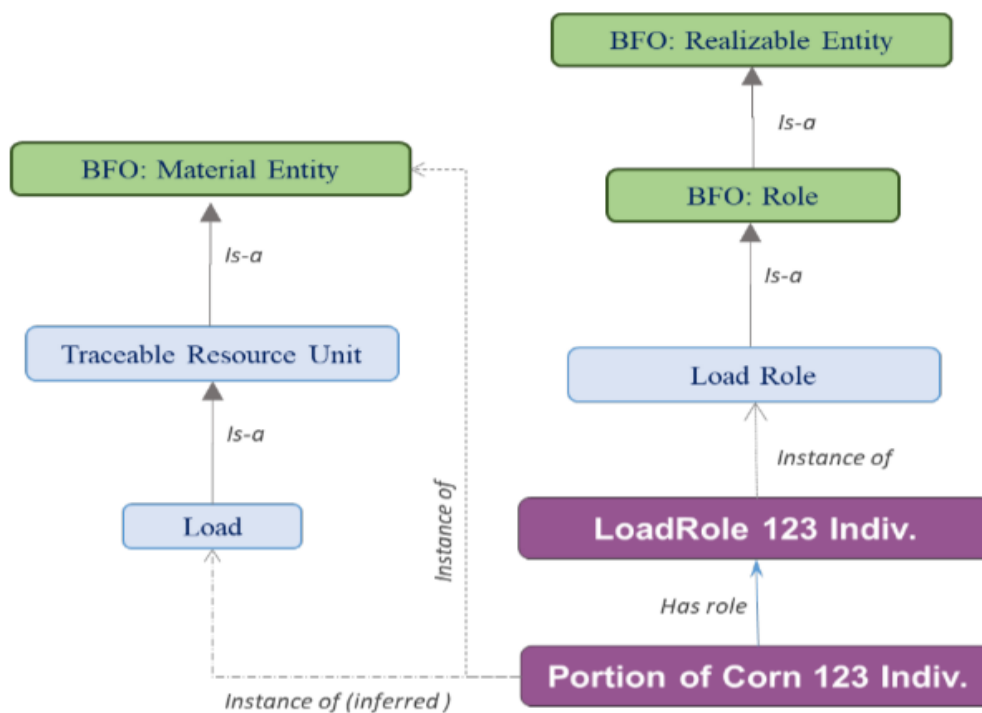


Figure 3.8: Instance de la classe "Load" d'une portion de maïs [7]

Les charges qui sont les entrées d'un événement de transfert sont inférées être des instances de Charge Source et la nouvelle charge créée à travers l'événement est une instance inférée de Charge Cible, comme illustré dans la Figure 3.9 [7] :

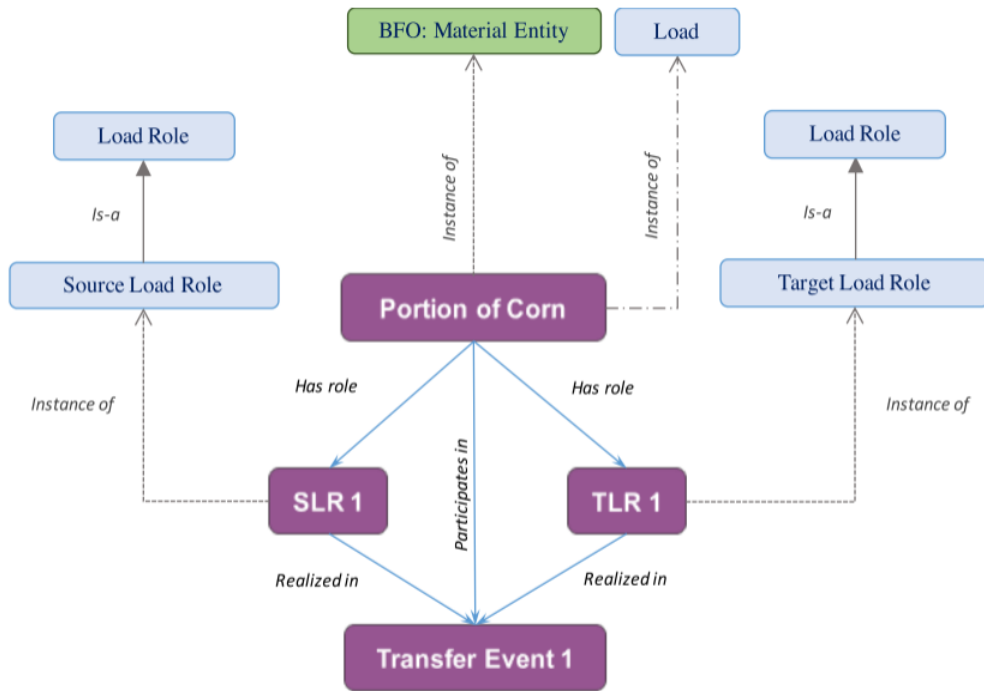


Figure 3.9: Instantiation des Charges Source et Cible [7]

Ce même évènement de transfert implique généralement différents participants tels que l'opérateur, le dispositif de transfert et le conteneur, comme le montre la Figure 3.10 [7] :

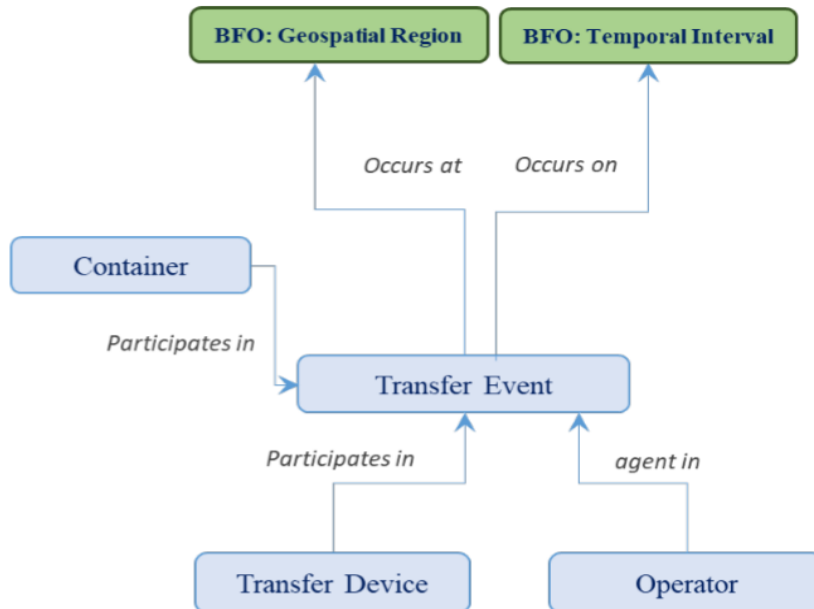


Figure 3.10: Différents types de participants dans un événement de transfert [7]

Le marquage temporel des événements de suivi dans l'ontologie SCT est effectué en utilisant le modèle présenté dans la Figure 3.11 . Un événement de transfert se produit sur un intervalle temporel (une région temporelle unidimensionnelle) qui est un type de région temporelle BFO. Un intervalle temporel a un instant de début et un instant de fin (BFO: Instant Temporel) qui sont désignés par des identifiants de temps de la journée avec des valeurs `xsd:dateTime`. [7]

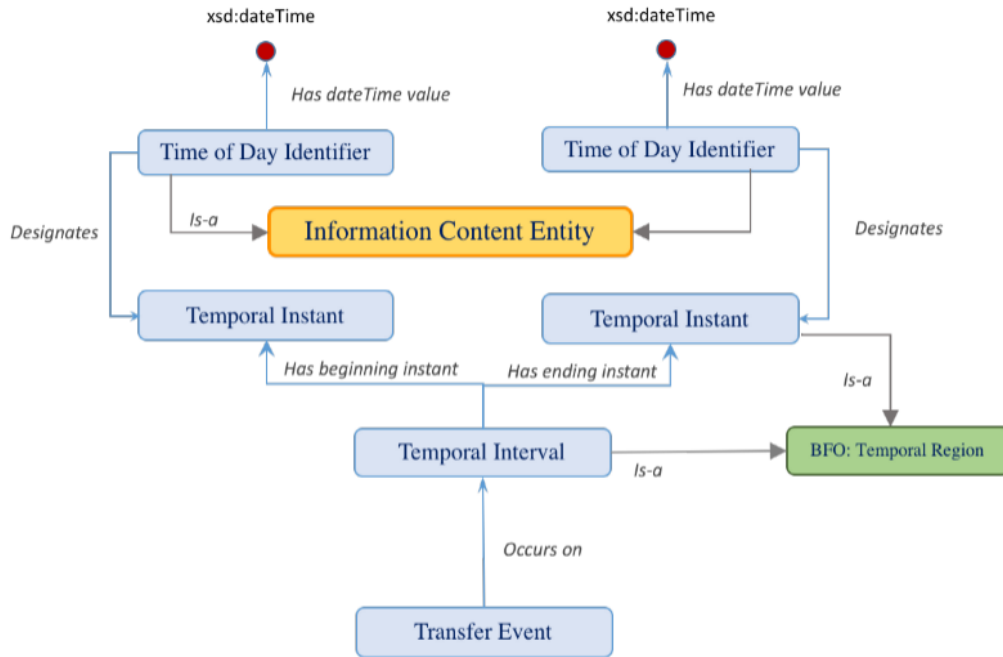


Figure 3.11: Marquage temporel de l'événement de transfert [7]

Dans l'ontologie SCT, le Conteneur est considéré comme une classe de rôle (classe définie). Les conteneurs peuvent avoir diverses propriétés physiques comme le poids, la taille ou le volume. Parfois, il est utile de distinguer l'intérieur du conteneur de sa structure externe, car l'intérieur peut avoir des caractéristiques différentes (humidité, température) qui doivent être enregistrées. C'est pourquoi l'ontologie inclut une classe "Intérieur du conteneur" (sous-classe de "Site" dans BFO), permettant une modélisation plus détaillée et flexible des conteneurs et de leurs attributs [7] comme le montre la figure 3.12:

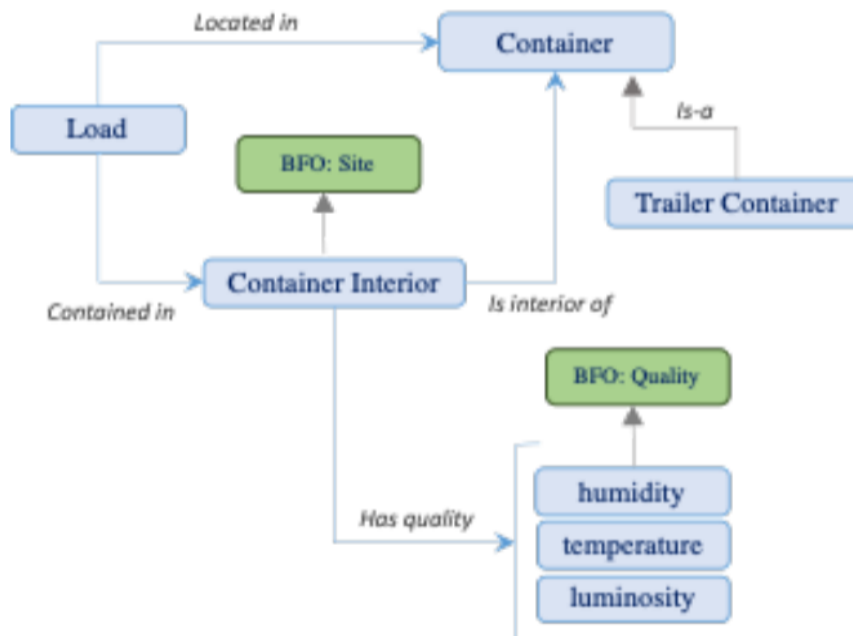


Figure 3.12: Le conteneur et sa relation avec le chargement et son intérieur [7]

Les différents éléments peuvent alors être aisément assemblés et intégrés dans une seule représentation d'ensemble d'un événement de transfert, comme illustré dans la figure 3.13 :

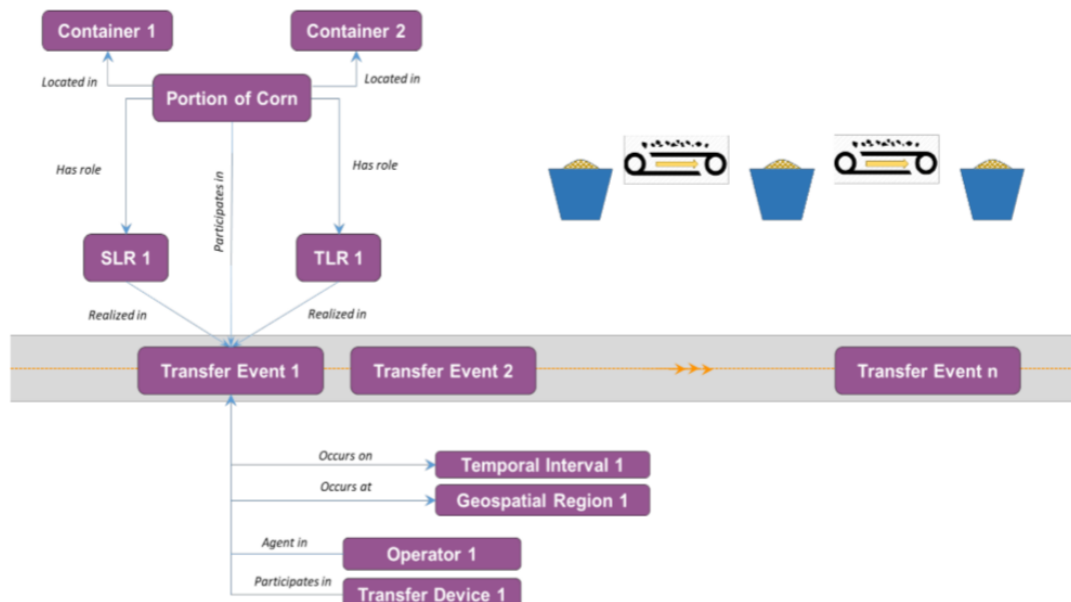


Figure 3.13: Représentation générale d'un évènement de transfert [7]

3.5 Conclusion :

À la fin de ce chapitre sur la traçabilité de la chaîne logistique alimentaire, il est clair que la mise en place d'une traçabilité efficace est cruciale pour garantir la sécurité alimentaire et répondre rapidement aux urgences alimentaires. Nous avons exploré les défis rencontrés dans la traçabilité alimentaire, notamment la diversité des parties prenantes, la réticence à divulguer des informations et l'incomplétude des données.

L'utilisation d'ontologies, telles que l'ontologie de la traçabilité de la chaîne logistique basée sur le cadre CTE/KDE, offre une solution prometteuse. Ces ontologies facilitent la création d'une compréhension commune du modèle de traçabilité, la médiation sémantique et l'intégration des données. De plus, elles permettent une exploration efficace des données, essentielle pour identifier les sources de contamination et réagir rapidement en cas de crise.

En suivant une méthodologie de développement rigoureuse, basée sur des principes techniques et des lignes directrices telles que celles de l'Industrial Ontologies Foundry (IOF), des ontologies ouvertes, modulaires et réutilisables ont été créées. Ces ontologies offrent un cadre standard pour la gestion, l'analyse et l'exploitation des informations de traçabilité dans différents contextes liés à l'alimentation.

Les exemples d'ontologie de traçabilité dans la chaîne logistique agro-alimentaire illustrent l'application concrète de ces concepts. Du suivi des grains depuis la moissonneuse-batteuse jusqu'au transformateur alimentaire à la modélisation des événements de transfert et des résultats d'observation, ces ontologies fournissent un moyen puissant de reconstruire l'historique des matériaux et de garantir la qualité et la sécurité des produits alimentaires.

En conclusion, la traçabilité de la chaîne logistique alimentaire est un domaine complexe mais crucial où les ontologies jouent un rôle central. En adoptant une approche systématique et en utilisant des ontologies bien conçues, nous pouvons améliorer la transparence, renforcer la confiance des consommateurs et garantir la sécurité et la qualité des produits alimentaires à chaque étape de la chaîne logistique.

Conclusion générale

En parcourant les chapitres de ce mémoire, nous avons exploré en profondeur les fondements, les applications et les défis liés à l'industrie 4.0 et plus particulièrement au concept de jumeau numérique, avec une attention particulière sur la chaîne logistique agroalimentaire.

Dans le premier chapitre, nous avons retracé l'évolution de l'industrie 4.0 depuis les années 1970, mettant en lumière son rôle transformateur dans divers secteurs industriels. Nous avons particulièrement approfondi le concept de jumeau numérique, une réplique virtuelle dynamique de systèmes physiques, en examinant ses multiples définitions et ses domaines d'application variés. La méthodologie basée sur l'architecture 5C CPS a été mise en avant pour le développement et le déploiement de jumeaux numériques, soulignant l'importance d'une approche holistique intégrant les aspects technologiques, humains et sociotechniques. Ce chapitre a établi les bases solides de la compréhension du jumeau numérique comme pilier central de l'industrie 4.0.

Le deuxième chapitre a mis en avant l'impact du jumeau numérique logistique dans la chaîne agroalimentaire, particulièrement dans le cadre des circuits courts. En intégrant des technologies avancées telles que l'Internet des objets (IoT), l'intelligence artificielle et les systèmes basés sur le cloud, le jumeau numérique améliore la visibilité, la traçabilité et la gestion des opérations logistiques. Le projet TERRA, centré sur la région Bretagne, a été étudié comme un exemple illustratif de la collaboration entre chercheurs, industriels et producteurs locaux pour exploiter le potentiel des jumeaux numériques. Ce projet vise à renforcer la durabilité, réduire l'empreinte carbone et soutenir les producteurs locaux, tout en répondant aux exigences de sécurité alimentaire et de gestion des produits périssables. Ce chapitre a mis en évidence les défis et les avantages de l'adoption des jumeaux numériques dans la chaîne logistique agroalimentaire.

Enfin, le troisième chapitre a approfondi la question cruciale de la traçabilité dans la chaîne logistique alimentaire. La traçabilité des produits jusqu'à leur source est essentielle pour garantir la sécurité alimentaire et réagir rapidement en cas d'urgence. Les défis de la traçabilité alimentaire, tels que la diversité des parties prenantes, la réticence à divulguer des informations et l'incomplétude des données, ont été examinés. Les ontologies, notamment celles basées sur le cadre CTE/KDE, ont été proposées comme solutions prometteuses pour créer une compréhension commune, faciliter la médiation sémantique et intégrer les données. Les exemples concrets d'application des ontologies dans la traçabilité agroalimentaire ont illustré leur potentiel pour reconstruire l'historique des matériaux et garantir la qualité et la sécurité des produits alimentaires.

En conclusion, ce mémoire a démontré que l'adoption des jumeaux numériques et des ontologies dans la chaîne logistique agroalimentaire constitue une avancée majeure vers une gestion plus intelligente, efficace et durable. Les concepts explorés, de l'industrie 4.0 au jumeau numérique en passant par la traçabilité et les ontologies, offrent des outils puissants pour améliorer la transparence, renforcer la confiance des consommateurs et garantir la sécurité et la qualité des produits alimentaires. Le projet TERRA incarne cette transformation numérique réussie, pavant la voie à une industrie agroalimentaire plus compétitive et résiliente. En exploitant ces innovations, nous pouvons anticiper les défis futurs et promouvoir l'innovation dans divers domaines, contribuant ainsi au développement durable et à l'amélioration continue des pratiques logistiques.

Bibliographie

- [1] Younes ELGHAZI Abdelkrim Ramzi YELLES CHAOUICHE. Implémentation d'un digital twin des stations commandées par automates de la mps500, 2018.
- [2] Farah ABDOUNE. Implémentation d'un digital twin des stations de la chaîne mps 500 sous flexsim, 2020.
- [3] Khadidja Abdoune. *Vers un jumeau numérique soutenable pour la surveillance et la détection robuste d'anomalies dans les systèmes de production*. PhD thesis, Nantes Université, 2023.
- [4] Renzo Akkerman, Poorya Farahani, and Martin Grunow. Quality, safety and sustainability in food distribution: a review of quantitative operations management approaches and challenges. *OR spectrum*, 32:863–904, 2010.
- [5] Ganjar Alfian, Muhammad Syafrudin, Umar Farooq, Muhammad Rifqi Ma'arif, M Alex Syaekhoni, Norma Latif Fitriyani, Jaeho Lee, and Jongtae Rhee. Improving efficiency of rfid-based traceability system for perishable food by utilizing iot sensors and machine learning model. *Food Control*, 110:107016, 2020.
- [6] Farhad Ameri and Boonserm Kulvatunyou. Modeling a supply chain reference ontology based on a top-level ontology. In *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, volume 59179, page V001T02A052. American Society of Mechanical Engineers, 2019.
- [7] Farhad Ameri, Evan Wallace, Reid Yoder, and Frank Riddick. Enabling traceability in agri-food supply chains using an ontological approach. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 22(5):051002, 2022.
- [8] Farhad Ameri, Evan Wallace, Reid Yoder, and Frank Riddick. Agri-food supply chain traceability supported by a formal ontology: A grain elevator to processor use case. In *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, volume 87295, page V002T02A051. American Society of Mechanical Engineers, 2023.
- [9] AnyLogistix. Supply chain digital twins definition, the problems they solve, and how to develop them. Retrieved February 02, 2024, from https://www.anylogistix.com/features/supply-chain-digital-twins/?_gl=1*wd8tud*_ga*MTM2NzIyNzY0LjE3MDIxMjY2MjA.*_ga_3W7KX9BX8K*MTcwMjEyNjYyMC4xLjAuMTcwMjEyNjYyNS41NS4wLjA.
- [10] RM Asimov, SV Chernoshey, I Kruse, and VS Osipovich. Digital twin in the analysis of a big data. 2018.
- [11] Myo Min Aung and Yoon Seok Chang. Traceability in a food supply chain: Safety and quality perspectives. *Food control*, 39:172–184, 2014.
- [12] Subhash Babu, Sanjay Singh Rathore, Raghavendra Singh, Sanjeev Kumar, Vinod K Singh, SK Yadav, Vivek Yadav, Rishi Raj, Devideen Yadav, Kapila Shekhawat, et al. Exploring agricultural waste biomass for energy, food and feed production and pollution mitigation: A review. *Bioresource Technology*, 360:127566, 2022.
- [13] Thibaut Bidet-Mayer. *L'industrie du futur: une compétition mondiale*, volume 14. Presses des MINES, 2016.

- [14] Beate Brenner and Vera Hummel. Digital twin as enabler for an innovative digital shopfloor management system in the esb logistics learning factory at reutlingen-university. *Procedia Manufacturing*, 9:198–205, 2017.
- [15] Diana Burgos and Dmitry Ivanov. Food retail supply chain resilience and the covid-19 pandemic: A digital twin-based impact analysis and improvement directions. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 152:102412, 2021.
- [16] Jean Charlet. *L'ingénierie des connaissances: développements, résultats et perspectives pour la gestion des connaissances médicales*. PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI, 2002.
- [17] Fariborz Damanpour and Marguerite Schneider. Phases of the adoption of innovation in organizations: effects of environment, organization and top managers 1. *British journal of Management*, 17(3):215–236, 2006.
- [18] Thijs Defraeye, Giorgia Tagliavini, Wentao Wu, Kevin Prawiranto, Seraina Schudel, Mekdim Assefa Kerisima, Pieter Verboven, and Andreas Bühlmann. Digital twins probe into food cooling and biochemical quality changes for reducing losses in refrigerated supply chains. *Resources, Conservation and Recycling*, 149:778–794, 2019.
- [19] K Dohrmann, B Gesing, and J Ward. Digital twins in logistics: a dhl perspective on the impact of digital twins on the logistics industry. *DHL Customer Solutions & Innovation, Troisdorf*, 2019.
- [20] Luiz Fernando CS Durão, Sebastian Haag, Reiner Anderl, Klaus Schützer, and Eduardo Zancul. Digital twin requirements in the context of industry 4.0. In *Product Lifecycle Management to Support Industry 4.0: 15th IFIP WG 5.1 International Conference, PLM 2018, Turin, Italy, July 2-4, 2018, Proceedings 15*, pages 204–214. Springer, 2018.
- [21] Tolga Erol, Arif Furkan Mendi, and Dilara Doğan. The digital twin revolution in healthcare. In *2020 4th international symposium on multidisciplinary studies and innovative technologies (ISMSIT)*, pages 1–7. IEEE, 2020.
- [22] Autodesk Video FR. Qu'est-ce qu'un jumeau numérique ? comment les modèles de données intelligents façonnent le btp. Septembre 2021. Retrieved April 17, 2024, from <https://www.autodesk.com/fr/design-make/articles/qu-est-ce-qu-un-jumeau-numerique>.
- [23] Edward Glaessgen and David Stargel. 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*, page 1818, 2012.
- [24] Michael Grieves. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication. *White paper*, 1(2014):1–7, 2014.
- [25] Michael Grieves and John Vickers. Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. *Transdisciplinary perspectives on complex systems: New findings and approaches*, pages 85–113, 2017.
- [26] Mumtaz Abdul Hameed, Steve Counsell, and Stephen Swift. A conceptual model for the process of it innovation adoption in organizations. *Journal of Engineering and Technology Management*, 29(3):358–390, 2012.
- [27] Mohammed Adel Hamzaoui and Nathalie Julien. A generic deployment methodology for digital twins—first building blocks. In *Handbook of Digital Twins*, pages 102–121. CRC Press.
- [28] Mohammed Adel Hamzaoui and Nathalie Julien. Social cyber-physical systems and digital twins networks: A perspective about the future digital twin ecosystems. *IFAC-PapersOnLine*, 55(8):31–36, 2022.
- [29] Mario Hermann, Tobias Pentek, and Boris Otto. Design principles for industrie 4.0 scenarios. In *2016 49th Hawaii international conference on system sciences (HICSS)*, pages 3928–3937. IEEE, 2016.

- [30] Ying Huang, Abhijeet Ghadge, and Nicky Yates. Implementation of digital twins in the food supply chain: a review and conceptual framework. *International Journal of Production Research*, pages 1–27, 2024.
- [31] Plattform industrie 4.0. What is industrie 4.0? 2019. 2024, from <https://www.plattform-i40.de/IP/Navigation/EN/Industrie40/WhatIsIndustrie40/what-is-industrie40.html>.
- [32] Dmitry Ivanov and Alexandre Dolgui. A digital supply chain twin for managing the disruption risks and resilience in the era of industry 4.0. *Production Planning & Control*, 32(9):775–788, 2021.
- [33] Nathalie Julien and Éric Martin. *Le jumeau numérique: de l'intelligence artificielle à l'industrie agile*. Dunod, 2020.
- [34] Sakdirat Kaewunruen, Panrawee Rungskunroch, and Joshua Welsh. A digital-twin evaluation of net zero energy building for existing buildings. *Sustainability*, 11(1):159, 2018.
- [35] Jay Lee, Behrad Bagheri, and Hung-An Kao. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing letters*, 3:18–23, 2015.
- [36] Jay Lee, Edzel Lapira, Shanhu Yang, and Ann Kao. Predictive manufacturing system-trends of next-generation production systems. *Ifac proceedings volumes*, 46(7):150–156, 2013.
- [37] Zheng Liu, Norbert Meyendorf, and Nezhir Mrad. The role of data fusion in predictive maintenance using digital twin. In *AIP conference proceedings*, volume 1949. AIP Publishing, 2018.
- [38] Elisa Negri, Luca Fumagalli, and Marco Macchi. A review of the roles of digital twin in cps-based production systems. *Procedia manufacturing*, 11:939–948, 2017.
- [39] Industrial Ontologies. Retrieved May 28, 2024, from <https://oagi.org/pages/industrial-ontologies>.
- [40] Colin Parris. What is the industrial internet of things (iiot) ? 2024, from <https://www.ge.com/digital/blog/what-industrial-internet-things-iiot>.
- [41] Magdalena Pichlak. The innovation adoption process: A multidimensional approach. *Journal of Management & Organization*, 22(4):476–494, 2016.
- [42] Selwyn Piramuthu, Poorya Farahani, and Martin Grunow. Rfid-generated traceability for contaminated product recall in perishable food supply networks. *European Journal of Operational Research*, 225(2):253–262, 2013.
- [43] Frank H Riddick, Evan K Wallace, Scott Nieman, Joe Tevis, and RA Ferreyra. Implementing grain traceability standards: Cart and simulation. In *Proc. 2018 American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE) Annual International Meeting*, 2018.
- [44] Roland Rosen, Georg Von Wichert, George Lo, and Kurt D Bettenhausen. About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing. *Ifac-papersonline*, 48(3):567–572, 2015.
- [45] Michael Rübmann, Markus Lorenz, Philipp Gerbert, Manuela Waldner, Jan Justus, Pascal Engel, and Michael Harnisch. Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries. *Boston consulting group*, 9(1):54–89, 2015.
- [46] Farid Saifutdinov, Ilya Jackson, Jurijs Tolujevs, and Tatjana Zmanovska. Digital twin as a decision support tool for airport traffic control. In *2020 61st International Scientific Conference on Information Technology and Management Science of Riga Technical University (ITMS)*, pages 1–5. IEEE, 2020.
- [47] Benjamin Schleich, Nabil Anwer, Luc Mathieu, and Sandro Wartzack. Shaping the digital twin for design and production engineering. *CIRP annals*, 66(1):141–144, 2017.

- [48] Michael Schluse, Linus Atorf, and Juergen Rossmann. Experimentable digital twins for model-based systems engineering and simulation-based development. In *2017 annual ieee international systems conference (syscon)*, pages 1–8. IEEE, 2017.
- [49] Concetta Semeraro, Mario Lezoche, Hervé Panetto, and Michele Dassisti. Digital twin paradigm: A systematic literature review. *Computers in Industry*, 130:103469, 2021.
- [50] Ehab Shahat, Chang T Hyun, and Chunho Yeom. City digital twin potentials: A review and research agenda. *Sustainability*, 13(6):3386, 2021.
- [51] JIANGPENG SHU, KAMYAB ZANDI, TANAY TOPAC, RUIQI CHEN, and CHUN FAN. Automated generation of fe model for digital twin of concrete structures from segmented 3d point cloud. *Structural Health Monitoring 2019*, 2019.
- [52] Maulshree Singh, Evert Fuenmayor, Eoin P Hinchy, Yuansong Qiao, Niall Murray, and Declan Devine. Digital twin: Origin to future. *Applied System Innovation*, 4(2):36, 2021.
- [53] Jan Smit, Stephan Kreutzer, Carolin Moeller, and Malin Carlberg. Industry 4.0. *Study for the ITRE Committee, Policy Department A: Economic and Scientific Policy, European Parliament, Brussels*, 2016.
- [54] Barry Smith, Farhad Ameri, Hyunmin Cheong, Dimitris Kiritsis, Dusan Sormaz, Chris Will, and J Neil Otte. A first-order logic formalization of the industrial ontology foundry signature using basic formal ontology. 2019.
- [55] Fei Tao, Jiangfeng Cheng, Qinglin Qi, Meng Zhang, He Zhang, and Fangyuan Sui. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94:3563–3576, 2018.
- [56] Jacques Trienekens and Peter Zuurbier. Quality and safety standards in the food industry, developments and challenges. *International journal of production economics*, 113(1):107–122, 2008.
- [57] Mike Uschold and Michael Gruninger. Ontologies: Principles, methods and applications. *The knowledge engineering review*, 11(2):93–136, 1996.
- [58] Jonas Wanner, Christopher Wissuchek, Giacomo Welsch, and Christian Janiesch. A taxonomy and archetypes of business analytics in smart manufacturing. *ACM SIGMIS Database: the DATABASE for Advances in Information Systems*, 54(1):11–45, 2023.
- [59] Gary White, Anna Zink, Lara Codecá, and Siobhán Clarke. A digital twin smart city for citizen feedback. *Cities*, 110:103064, 2021.
- [60] Haijun Zhang, Guohui Zhang, and Qiong Yan. Dynamic resource allocation optimization for digital twin-driven smart shopfloor. In *2018 IEEE 15th International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC)*, pages 1–5. IEEE, 2018.
- [61] Jianrong Zhang and Tejas Bhatt. A guidance document on the best practices in food traceability. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 13(5):1074–1103, 2014.
- [62] Cunbo Zhuang, Jianhua Liu, and Hui Xiong. Digital twin-based smart production management and control framework for the complex product assembly shop-floor. *The international journal of advanced manufacturing technology*, 96:1149–1163, 2018.

Resumé

Ce mémoire examine la modélisation d'un jumeau numérique logistique dans le cadre de l'industrie 4.0. Le but est de créer une représentation virtuelle précise des processus logistiques pour améliorer l'efficacité opérationnelle et la prise de décision. La méthodologie utilisée comprend la collecte de données, la modélisation des processus, et l'implémentation d'algorithmes de simulation. Le document explore les différentes caractéristiques des jumeaux numériques, les défis associés à leur déploiement, et leurs applications potentielles dans les chaînes logistiques alimentaires. Les résultats montrent une amélioration significative de la gestion des ressources, une optimisation des flux logistiques, et une réduction des coûts opérationnels. En conclusion, le mémoire démontre que l'intégration des jumeaux numériques peut transformer les opérations logistiques en offrant une meilleure visibilité et des capacités accrues d'optimisation.

Summary

This thesis examines the modeling of a logistics digital twin within the context of Industry 4.0. The goal is to create an accurate virtual representation of logistics processes to enhance operational efficiency and decision-making. The methodology involves data collection, process modeling, and the implementation of simulation algorithms. The document explores various characteristics of digital twins, the challenges associated with their deployment, and their potential applications in food supply chains. The results show significant improvements in resource management, logistics flow optimization, and operational cost reduction. In conclusion, the thesis demonstrates that integrating digital twins can transform logistics operations by providing better visibility and enhanced optimization capabilities.

ملخص

دقيق افتراضي تمثيل إنشاء هو الهدف 4.0 الصناعة سياق في اللوجستي الرقمي التوأم نمذجة الأطروحة هذه تتناول وتطبيق، العمليات نمذجة، البيانات جمع المنهجية تتضمن. القرارات واتخاذ التشغيلية الكفاءة لتحسين اللوجستية للعمليات وتطبيقاتها، بنشرها المرتبطة التحديات، الرقمية للتوائم المختلفة الخصائص المستند يستكشف. المحاكاة خوارزميات وخفض، اللوجستيات تدفقات تحسين، الموارد إدارة في كبيرة تحسينات النتائج تظهر. الغذائية التوريد سلاسل في المحتملة توفير خلال من اللوجستية العمليات يحول أن يمكن الرقمية التوائم دمج أن الأطروحة تثبت، الختام في. التشغيلية التكاليف معززة تحسين وقدرة أفضل رؤية.

Resumé

Ce mémoire examine la modélisation d'un jumeau numérique logistique dans le cadre de l'industrie 4.0. Le but est de créer une représentation virtuelle précise des processus logistiques pour améliorer l'efficacité opérationnelle et la prise de décision. La méthodologie utilisée comprend la collecte de données, la modélisation des processus, et l'implémentation d'algorithmes de simulation. Le document explore les différentes caractéristiques des jumeaux numériques, les défis associés à leur déploiement, et leurs applications potentielles dans les chaînes logistiques alimentaires. Les résultats montrent une amélioration significative de la gestion des ressources, une optimisation des flux logistiques, et une réduction des coûts opérationnels. En conclusion, le mémoire démontre que l'intégration des jumeaux numériques peut transformer les opérations logistiques en offrant une meilleure visibilité et des capacités accrues d'optimisation.

Summary

This thesis examines the modeling of a logistics digital twin within the context of Industry 4.0. The goal is to create an accurate virtual representation of logistics processes to enhance operational efficiency and decision-making. The methodology involves data collection, process modeling, and the implementation of simulation algorithms. The document explores various characteristics of digital twins, the challenges associated with their deployment, and their potential applications in food supply chains. The results show significant improvements in resource management, logistics flow optimization, and operational cost reduction. In conclusion, the thesis demonstrates that integrating digital twins can transform logistics operations by providing better visibility and enhanced optimization capabilities.

ملخص

الهدف من هذه الأطروحة هو إنشاء تمثيل افتراضي دقيق في سياق الصناعة 4.0. تتناول الأطروحة نمذجة التوائم الرقمي اللوجستي، وتطبيقاتها في تحسين الكفاءة التشغيلية واتخاذ القرارات للعمليات اللوجستية. تتضمن المنهجية جمع البيانات ونمذجة العمليات وتطبيق خوارزميات المحاكاة. يستكشف العمل خصائص التوائم الرقمية المختلفة والتحديات المرتبطة بنشرها. تظهر النتائج تحسينات كبيرة في إدارة الموارد وتحسين تدفقات اللوجستيات في سلاسل التوريد الغذائية، مع خفض التكاليف التشغيلية. تثبت الأطروحة في الختام أن دمج التوائم الرقمية يمكن أن يحول العمليات اللوجستية من خلال توفير رؤى أفضل وقدرات معززة.