

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

TYPOLOGIE ET PROTOTYPAGE D'UN JUMEAU NUMÉRIQUE EN SANTÉ ET  
SERVICES SOCIAUX

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

MAÎTRISE ÈS SCIENCES DE LA GESTION

PAR

ANTOINE ARCAND

JANVIER 2024

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL  
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.04-2020). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

## REMERCIEMENTS

La réalisation de ce mémoire a été un processus long et difficile qui n'aurait jamais été possible sans l'aide et le soutien des personnes qui m'ont entouré à travers mon parcours, que ce soit dans la sphère académique, professionnelle ou privée.

Je tiens d'abord à remercier de tout mon cœur ma directrice de recherche, la professeure Yasmina Maïzi, pour son soutien inconditionnel autant affectif qu'intellectuel, qui m'a continuellement encouragé à prendre soin de mon bien-être tout en demeurant une source de savoir, de conseil et de rigueur dans mon travail. Je suis plus que choyé qu'elle ait accepté de m'accompagner aussi comme directrice au doctorat en administration. Je souhaite aussi remercier chaleureusement mon codirecteur de recherche, le professeur Ygal Bendavid, pour son support, son dynamisme et sa franchise dans nos échanges et conseils, qui m'ont permis de garder le cap à travers la rédaction.

Un grand merci aussi à Guillaume Anctil, agent d'amélioration continue du CIUSSS Centre-Sud de Montréal, ainsi qu'à Shany Lavoie, agente de relations humaines de la Clinique Relais, qui m'ont fourni les informations nécessaires à la réalisation du prototype de jumeau numérique.

Un merci spécial à l'organisme Thèsez-Vous pour m'avoir permis de gagner en constance et en confiance dans ma rédaction, et grâce auxquels j'ai pu rencontrer Jonathan, Romain, Marie, Galaad et Jean-Sébastien, des amis et partenaires de rédaction fantastiques qui m'ont apporté soutien émotionnel, plaisir à rédiger, croissance personnelle et stimulation intellectuelle ces derniers mois.

Je remercie évidemment mes proches pour leur support, leur présence, mais aussi leur patience à travers le processus. Un merci particulier à ma patronne Joanie Lacombe pour sa bienveillance, sa flexibilité et son support des trois dernières années, qui m'ont donné la liberté de me donner à fond dans mes études, ma recherche et mon implication tout en conservant une source stable de revenus.

Et finalement, un énorme merci à ma chère meilleure amie, colocataire et partenaire de crime Vickie Lefebvre, qui m'a supporté, enduré et poussé vers l'avant même si je n'étais pas toujours le plus présent ou agréable, et merci aussi à notre chien Édouard, la boule de poils de 50 kilos toujours pleine d'amour et d'énergie à partager, des cadeaux de valeur inestimable ces derniers mois.

## AVANT-PROPOS

Le présent mémoire est le fruit d'un travail ardu qui se sera étendu sur près de deux ans, et m'orienter à travers ce projet n'a pas toujours été facile, entre autres parce que ce travail est aussi la finalité de ma transition de secteur dans mon parcours académique et professionnel. Étant initialement issu d'un baccalauréat en psychologie, j'ai décidé de quitter ce secteur axé purement sur la psyché, le comportement et le bien-être des individus pour me pencher sur la gestion des opérations dans les organisations, ce qui en a surpris plus d'un·e étant donné la nature plus calculatrice et rationnelle de cette discipline. Pourtant, les opérations sont imaginées, gérées et performées par des êtres humains : il s'agissait donc pour moi d'agir directement sur le bien-être des travailleurs en optimisant et réduisant leur charge de travail, et en les mettant au cœur des opérations.

C'est dans ce contexte que j'ai découvert la simulation des systèmes complexes avec la professeure Yasmina Maïzi, qui me permettait de m'intéresser et de modéliser les systèmes d'opérations autant que les humains et leur comportement au sein de ceux-ci. Lorsque l'opportunité s'est présentée de travailler sur le jumeau numérique en santé avec elle, j'ai découvert un concept complexe, mais porteur d'un potentiel énorme pour le bien-être humain. Lorsqu'ensuite une porte s'est ouverte pour la collaboration avec les Services bas seuil Relais, la boucle m'a semblé complète : c'était l'occasion pour moi de réutiliser mes connaissances en santé mentale et en comportement pour les appliquer dans mon nouveau secteur de prédilection. C'est donc avec fierté que je vous présente ce mémoire, un point culminant de mes apprentissages dans le monde académique et professionnel, en sachant très bien qu'il ne s'agit là que du premier pas dans ma carrière en recherche. Il est certes un peu long, mais je trouve intéressant et essentiel de partager les fruits de mon labeur et de ma réflexion, car il m'apparaîtrait saugrenu de ne pas parler de parties de mon travail sans lesquelles les résultats eurent été fort différents, et ma réflexion, moins avancée. Bonne lecture!

## TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS .....	ii
AVANT-PROPOS .....	iii
TABLE DES MATIÈRES .....	iv
LISTE DES FIGURES.....	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	viii
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES .....	x
RÉSUMÉ.....	xii
ABSTRACT .....	xiii
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 PROBLÉMATIQUE, QUESTIONS ET OBJECTIFS DE RECHERCHE.....	5
1.1 Problématiques de recherche .....	5
1.1.1 Problématique générale – la santé et les services sociaux au Québec .....	5
1.1.2 Problématique spécifique – la Clinique de services bas seuil Relais.....	11
1.2 Questions de recherche .....	16
1.3 Objectifs de recherche .....	18
1.3.1 Objectifs généraux – Le DT pour la santé et les services sociaux.....	18
1.3.2 Objectifs spécifiques de développement du prototype de DT .....	20
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE.....	22
2.1 Méthodologie de recherche des références et de classification et analyse des DT .....	23
2.1.1 Méthode de recherche exploratoire intersectorielle sur le jumeau numérique .....	24
2.1.2 Méthode de recherche et d’analyse pour le jumeau numérique en santé.....	25
2.2 Recherche exploratoire : historique, usage et caractérisation du DT dans la littérature.....	30
2.2.1 Historique et utilisation du concept de Digital Twin dans l’industrie .....	30
2.2.2 Caractérisation et classification des Digital Twin.....	39
2.3 Revue de littérature et typologie du jumeau numérique en santé.....	51
2.3.1 Classification des DT par niveau d’abstraction et utilisation.....	52
2.3.2 Analyse des DT pour la santé et les soins personnalisés .....	54
2.3.3 Analyse des DT des procédures en santé .....	65
2.3.4 Analyse des DT pour les systèmes de gestion de la santé.....	67
2.3.5 Analyse des DT pour la gestion de la santé publique et écosystémique.....	80
2.3.6 Typologie du jumeau numérique en santé .....	83

CHAPITRE 3 CADRE MÉTHODOLOGIQUE DE CONCEPTION DU PROTOTYPE DE JUMEAU NUMÉRIQUE.....	93
3.1 Retour sur la problématique et des objectifs de la démarche de prototypage .....	94
3.2 Méthode de conception et développement des composantes du prototype .....	95
3.2.1 Obtention des données et caractéristiques pertinentes de la Clinique.....	95
3.2.2 Développement de l'infrastructure IoT de capture et des traitement des données .....	97
3.2.3 Développement de l'infrastructure logicielle et outils de modélisation-simulation .....	98
3.3 Approche de démonstration, d'évaluation et de communication du prototype.....	101
CHAPITRE 4 CONCEPTION ET DÉVELOPPEMENT DU PROTOTYPE DE JUMEAU NUMÉRIQUE.....	102
4.1 La composante simulation pour le prototype de DT de la clinique.....	102
4.1.1 Définition fonctionnelle et technique du modèle de simulation .....	102
4.1.2 Le modèle de simulation issu de la démarche de conception .....	113
4.2 La composante IoT pour le prototype de DT de la clinique.....	118
4.2.1 Identification des besoins spécifiques en IoT de la Clinique Relais.....	118
4.2.2 Conception et design de la solution d'IoT proposée.....	119
4.2.3 Démonstration de la solution d'IoT proposée.....	122
4.3 Capacité démontrée du modèle et propositions d'améliorations.....	124
4.3.1 Capacité limitée du prototype en fonction de besoins ciblés .....	125
4.3.2 Proposition d'élaboration du prototype dans la lignée de maturation du prototype .....	126
CHAPITRE 5 DISCUSSION : LIMITES, ENJEUX ET OPPORTUNITÉS .....	128
5.1 Objectifs, contributions, limites et opportunités de la recherche.....	128
5.1.1 Évaluation de la classification et de la caractérisation exploratoire du DT .....	129
5.1.2 Évaluation de la typologie et classification du jumeau numérique en santé.....	130
5.1.3 Évaluation du potentiel du prototype proposé pour la Clinique Relais .....	132
5.1.4 Synthèse de l'apport de la présente recherche pour le RССSQ.....	133
5.2 Enjeux et défis éthiques concernant le DT en santé et services sociaux .....	134
5.2.1 Les enjeux d'intrusivité, de propriété et de sécurité liés aux données.....	135
5.2.2 Les enjeux d'équité, diversité et inclusion (EDI) dans les outils numériques .....	136
5.2.3 L'impact environnemental de la transition numérique .....	138
CONCLUSION.....	141
ANNEXE A : MATRICE D'ANALYSE DES CAS HORS GESTION DES SOINS .....	143
ANNEXE B : MATRICE D'ANALYSE DES CAS EN GESTION DES SOINS.....	153
ANNEXE C : RÉSULTATS DES SCÉNARIOS DE SIMULATION POUR LA CLINIQUE ..	154
RÉFÉRENCES.....	157

## LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 - Flux informationnel clinique d'une personne en situation d'itinérance (Caron <i>et al.</i> , 2021b).....	8
Figure 1.2 - Flux informationnel administratif du parcours d'une personne en situation d'itinérance (Caron <i>et al.</i> , 2021b) .....	8
Figure 1.3 - Diagramme Ishikawa des difficultés de la Clinique Relais.....	14
Figure 2.1 – Schéma de la méthodologie suivie pour effectuer les revues de littératures .....	23
Figure 2.2 - Phases de développement de la recherche sur le DT, tel que proposé par Tao et al. (2019b) .....	31
Figure 2.3 - Nombre d'articles publiés avec les mots-clés « Digital Twin » -à oct. 2021 (Fang <i>et al.</i> , 2022).....	32
Figure 2.4 - Applications, structure et composantes du DT dans la ville intelligente (Mylonas <i>et al.</i> , 2021).....	36
Figure 2.5 - Modèle conceptuel et technologique à 5 dimensions du Digital Twin (Qi et al., 2021) .....	48
Figure 2.6 - Structure et offre des services de DT selon Qi et al. (2021).....	49
Figure 3.1 - Méthodologie de Recherche en Sciences du Design de Peffers et al. (2007). .....	93
Figure 3.2 - Plan de la Clinique de Services bas seuils Relais.....	96
Figure 3.3 - Méthode de conception de modèles de simulation à évènements discrets (Rossetti, 2016).....	99
Figure 4.1 - Processus de prise en charge des usager·ère·s (gauche) et plan de la Clinique (droite) .....	103
Figure 4.2 - Processus de prise en charge des appels entrants de la Clinique.....	103
Figure 4.3 – Schéma du processus de visite aux toilettes avec potentielle injection de narcotiques .....	107
Figure 4.4 – Schéma du processus d'intervention auprès d'usager·ère·s agressifs ou en surdose .....	107
Figure 4.5 - Schémas conceptuels des états mentaux et des états d'intoxication des usager·ère·s .....	108
Figure 4.6 - Schéma simplifié de la perception interne de sécurité des employé·e·s .....	109

Figure 4.7 - Schéma conceptuel de l'ajout de tâches cliniques ou administratives après un service .....	109
Figure 4.8 - Priorité des tâches dans le processus opérationnel de la Clinique.....	109
Figure 4.9 - Composantes intermédiaires de modélisation et visualisation pour le modèle de simulation.....	114
Figure 4.10 - Modèle de simulation avec ses composantes fonctionnelles.....	115
Figure 4.11 - Étapes de création de l'environnement de test de la solution IoT.....	120
Figure 4.12 - Étapes d'ajout et d'organisation de l'infrastructure IoT virtuelle .....	120
Figure 4.13 - Illustration des étapes de configuration des lecteurs et antennes de l'environnement virtuel .....	121
Figure 4.14 – Vue en parallèle des trois fenêtres au démarrage de la capture virtuelle des données .....	122
Figure 4.15 - Tests virtuels et réels de capture de données avec les lecteurs RFID / RTLS.....	122
Figure 4.16 - Tests réels et virtuels de la capture de données dans la salle d'accueil avec le lecteur RTLS .....	123
Figure 4.17 - Répétition et fin des tests de capture virtuelle des données .....	123
Figure 4.18 - Applications et utilisations des bases de données sur AnyLogic .....	124
Figure 4.19 - Diagramme Ishikawa des problèmes ciblés par le prototype proposé .....	126



## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 - Critères de recherche des articles dans les bases de données .....	24
Tableau 2.2 - Justification de la classification des références par types .....	26
Tableau 2.3 - Justification de la classification par niveau d'abstraction en santé .....	27
Tableau 2.4 – Extrait de la matrice de classification de base des articles en santé.....	28
Tableau 2.5 - Extrait de la matrice d'analyse des cas de systèmes de gestion de santé, version transposée .....	29
Tableau 2.6 - Portion des industries dans la littérature sur le DT .....	35
Tableau 2.7 - Matrice de sélection des caractéristiques pour la définition du jumeau numérique	40
Tableau 2.8 - Analyse de chevauchement des concepts et classifications présentées dans la littérature .....	44
Tableau 2.9 - Typologie des jumeaux numériques en santé par niveau d'abstraction et par application .....	85
Tableau 2.10 - Typologie des jumeaux numériques pour la gestion de la santé personnalisée .....	86
Tableau 2.11 - Typologie des jumeaux numériques pour la gestion des processus et procédures de santé.....	87
Tableau 2.12 - Typologie des jumeaux numériques pour la gestion des systèmes en santé.....	88
Tableau 2.13 - Typologie des jumeaux numériques pour les écosystèmes de santé publique.....	90
Tableau 4.1 – Répartition de l'achalandage, des choix de services, et des temps de traitement de la Clinique Relais (19/05/2021 – 18/05/2022).....	104
Tableau 4.2 - Ressources humaines et locaux de services de la Clinique.....	105
Tableau 4.3 - Répartition horaire de du taux d'arrivée des usager·ère·s et des appels entrants par heure .....	105
Tableau 4.4 - Composantes du modèle de simulation, tous scénarios confondus .....	110
Tableau 4.5 - Hypothèses des changements psychologiques ou physiologiques des usager·ère·s .....	111
Tableau 4.6 - Hypothèses de modélisation pour les éléments quantitatifs principaux manquants .....	112

Tableau 4.7 - Résumé des résultats d'opérations régulières obtenus avec intervalles de confiance .....	116
Tableau 4.8 – Ventilation de la durée des interventions spéciales par les intervenant·e·s .....	117
Tableau 5.1 - Modèle de classification final à trois critères des jumeaux numériques.....	129
Tableau 5.2 - Portrait de la maturité des cas de DT en santé dans la littérature .....	131
Tableau 5.3 - Normes d'inclusion de design et d'implantation de technologies numériques (Pratt <i>et al.</i> , 2022) .....	138

## LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

- ALD – *Activity and Layout Design* (Conception d'aménagement et d'activités).
- ABS – *Agent-Based Simulation* (Simulation basée sur les agents).
- BIM – *Building Information Modeling* (Modélisation Informatisée de Bâtiment).
- BO – Basé objet.
- CH – Centre Hospitalier.
- CISSS – Centre intégré de santé et de services sociaux.
- CIUSSS – Centre intégré universitaire de santé et de services sociaux.
- CLSC – Centre Local de Services Communautaires.
- CPS – *Cyber-Physical System* (Système cyber-physiques).
- DES – *Discrete Event Simulation* (Simulation à évènements discrets).
- DM – *Digital Model* (Modèle Numérique).
- DP – *Digital Patient-e* (Patient·e virtuel ou numérique).
- DS – *Digital Shadow* (Ombre Numérique).
- DSN – Dossier Santé Numérique.
- DSQ – Dossier Santé Québec.
- DT – *Digital Twin* (Jumeau Numérique).
- ECG – Électrocardiogramme.
- ENAP – École Nationale d'Administration Publique.
- GE – General Electric.
- GMF – Groupe de Médecine Familiale.
- HLM – *Human Lifecycle Management* (Gestion du cycle de vie humain).
- IA – Intelligence Artificielle.
- IIoT – *Industrial Internet of Things* (Internet des Objets Industriels).
- IoMT – *Internet of Medical Things* (Internet des Objets Médicaux).
- IoT – *Internet of Things* (Internet des Objets).
- IRM – Imagerie par Résonance Magnétique.
- ML – *Machine Learning* (Apprentissage machine).
- NFC – *Near-Field Communication* (Communication en champs proche).

- PHM – *Prognostics and Health Management* (Gestion des pronostics et de l'intégrité).
- PIB – Produit Intérieur Brut.
- PLD – *Process and Layout Design* (Conception de processus et d'aménagement).
- PPC – *Production Planning and Control* (Contrôle et planification de production).
- PSM – *Prognostics and State Management* (Gestion des pronostics et de l'état).
- PT – *Physical twin* (jumeau physique).
- RAMI4.0 – *Reference Architectural Model for Industry 4.0* (Modèle de Référence Architectural pour l'Industrie 4.0).
- RFID – *Radio Frequency Identification* (Radio-Identification).
- RSSSQ – Réseau de la Santé et des Services Sociaux du Québec.
- RTLS – *Real-Time Locating System* (Système de localisation en temps réel).
- SLM – *Service Lifecycle Management* (Gestion du cycle de vie des services).
- SPC – *Service planning and control* (Planification et contrôle des services).
- TAO – Traitement par Agoniste aux Opioïdes.
- TI – Technologie de l'information.
- UHF – Ultra Haute Fréquence.
- VF - *Virtual Factory* (Usine virtuelle).
- VI - Ville Intelligente.
- VPH – *Virtual Physiological Human* (Humain Physiologique Virtuel).

## RÉSUMÉ

La gestion des soins de santé et des services sociaux fait présentement face à plusieurs enjeux au cœur des préoccupations de la société québécoise : le manque de main-d'œuvre, le vieillissement de la population et le manque d'intégration des services sont parmi les problématiques clés du secteur. À l'aube d'un plan d'offensive numérique et de réorganisations importantes du Réseau de la Santé et des Services Sociaux du Québec (RSSSQ), les dirigeants sont à la recherche d'outils leur permettant d'intégrer à la fois les services de santé, les services sociaux ainsi que les procédures administratives. Le jumeau numérique, plus connu sous son nom anglais *Digital Twin*, a gagné énormément d'attention ces dernières années, et en particulier dans le secteur manufacturier, ses capacités d'intégration et de gestion des données complexes lui conférant des avantages majeurs sur le marché des outils numériques. Il s'agit d'un outil prometteur pour répondre aux besoins du RSSSQ, mais il est toutefois difficile présentement de s'orienter dans la littérature sur le jumeau numérique, en particulier dans le domaine de la santé à cause d'un manque de cohésion du concept et d'applications très variées et distinctes en termes de structure technologique. Les objectifs de ce travail sont donc d'effectuer d'abord une recherche exploratoire afin de déterminer comment mieux classifier et organiser les cas et modèles de jumeaux numériques dans la littérature existante. Par la suite, ce système de classification et d'organisation a été transposé en santé afin de pouvoir faire ressortir une typologie sectorielle des modèles existants et d'en extraire par la suite les éléments probants et les capacités potentielles pour le RSSSQ. Finalement, le troisième objectif était d'utiliser les informations extraites pour démontrer le potentiel du jumeau numérique via la proposition d'un prototype pour la Clinique Relais, un établissement qui s'occupe de personnes en situation d'itinérance ayant des troubles de dépendances aux opioïdes, et aussi membre d'un des Centres Intégrés Universitaire de Santé et de Services Sociaux (CIUSSS) du RSSSQ québécois. Les résultats de cette démonstration basée sur une infrastructure d'Internet des Objets (IoT) et sur un modèle de simulation semblent concluants pour montrer que le fameux *Digital Twin* aurait le potentiel de répondre aux besoins du RSSSQ, mais d'autres tests et analyses d'impacts sont nécessaires avant d'en étendre l'utilisation à un système d'une telle taille, surtout considérant les enjeux entourant la transition numérique en santé et les difficultés actuelles du système de soins de santé et de services sociaux.

Mots clés : Jumeau numérique, prototype, simulation, Internet des objets, santé, services sociaux, opioïdes, clinique, typologie, classification, patient·e numérique, santé publique, système de santé

## ABSTRACT

The management of healthcare and social services is currently at the heart of Quebec society's concerns: a shortage in the working force, an aging population and a lack of service integration are among the sector's key issues. At the dawn of a digital offensive and a major reorganization by the Health and Social Services System of Quebec (HSSSQ), decision-makers are looking for tools to enable the digital integration of both health and social services as well as administrative procedures. The concept of the Digital Twin has gained considerable attention in recent years, particularly in the manufacturing sector, where its ability to integrate and manage complex data has given it major advantages on the market for digital tools. This technology seems to be a promising tool for answering the needs of the HSSSQ, but it is currently difficult to find one's way in the literature on the digital twin, particularly in the healthcare field, due to a lack of cohesion in the concept and very varied and distinct applications in terms of technological structure. The objectives of this work were therefore to first carry out exploratory research to determine how to best classify and organize the cases and models of digital twins in the existing literature. This system of classification and organization was then transposed to the healthcare sector, with the goal of building up a typology of existing models in the sector, allowing to extract evidence and potential capabilities for the HSSSQ. The third objective was then to use the information extracted to demonstrate the potential of the digital twin by proposing a prototype for the Relais clinic, which cares for homeless people with opioid substance abuse disorders and is also a member of one of the Integrated University Health and Social Services Centers (IUHSSC) of the Quebec HSSSQ. The results of this demonstration using an Internet of things (IoT) infrastructure as well as a complex simulation model seem conclusive and suggest that the trending Digital Twin would have the potential to meet the needs of the HSSSQ. However, further tests and impact analyses are needed before extending its use to a system of systems of the HSSSQ's size, especially considering the issues surrounding digital transition in healthcare and the current difficulties of the health and social care system of Quebec.

Keywords :

Digital twin, prototype, simulation, internet of things (IoT), healthcare, social services, opioids, clinical, typology, classification, digital patient, public health, health system

## INTRODUCTION

Aujourd'hui plus que jamais, la connectivité, la virtualisation, et le contrôle à distance sont devenus des éléments majeurs des organisations en tout genre, et génèrent un intérêt pour de nouvelles technologies qui suivent cette tendance. Dès le début de la crise sanitaire de la Covid-19 en 2020, il s'est manifesté un besoin criant de s'éloigner des opérations et des contacts physiques non essentiels, afin d'assurer d'une part un fonctionnement optimal du personnel, de l'espace et des outils disponibles, et d'autre part de préserver la santé mentale et le bien-être des employé·e·s (Robinson, 2022). Toutefois, même après la crise, et alors que les employé·e·s tout comme les gestionnaires ont pu à nouveau retourner physiquement au travail, le travail à distance n'a pas disparu pour autant. Pourquoi? Parce que de nombreux emplois d'aujourd'hui, plutôt que traiter directement des objets, des personnes ou des documents, vont plutôt en traiter dans l'espace virtuel, et que cette tendance vers la numérisation existait déjà avant la pandémie : la crise l'a simplement concrétisée (LaBerge *et al.*, 2020). Cela inclut la migration des client·e·s vers les marchés en ligne, l'utilisation des données liées aux habitudes et à la consommation, et la vente de produits et services de toutes sortes en ligne.

Alors que nous venons à peine d'entamer l'ère de l'Industrie 4.0, plusieurs disent que nous sommes déjà à l'avènement de ce qu'on appelle l'Industrie 5.0, une ère où les industries vont et doivent orienter leurs actions et leur accent vers leur impact psychologique, social, et environnemental (Kraaijenbrink, 2022). Dans ce contexte particulier, les innovations technologiques occupent une place de choix pour la capture, la communication, ou le traitement des données, mais aussi pour le développement et l'optimisation des opérations et des données des organisations, d'un bout à l'autre de leur chaîne de valeur. Une vision globale de celle-ci est ainsi essentielle pour mesurer l'impact de leurs actions au temps présent, mais aussi pour planifier l'impact et la portée de leurs actions futures.

Bien que certaines technologies se soient déjà bien installées dans les activités quotidiennes des organisations et leur permettent d'atteindre cet objectif, d'autres sont en plein essor et se voient prendre une place de plus en plus importante dans leurs opérations. L'une de ces technologies en plein essor, le Jumeau Numérique ou *Digital Twin* (DT), est apparue dans la littérature il y a moins de quinze ans et y prend une place de taille exponentielle au cours des deux ou trois dernières

années. Cette technologie requiert elle-même un assemblage d'autres technologies pour fonctionner, telles que l'Intelligence Artificielle (IA), l'Internet des Objets (IoT) ainsi que différents outils de simulation et de modélisation. Le tout permet d'obtenir une version numérisée et dynamique d'un objet, d'un système ou d'un environnement, pour ensuite étudier, modifier et améliorer les deux réalités, c'est-à-dire le jumeau physique et le jumeau numérique, en parallèle l'un de l'autre.

La combinaison des technologies de support mentionnées fait du jumeau numérique un outil potentiellement très puissant pour les organisations, et l'intérêt généré est bien présent : selon un sondage effectué par Gartner, 75% des organisations sondées ayant déjà en place des initiatives et infrastructures IoT prévoyaient initier des projets de DT d'ici un an (Costello et Omale, 2019). Le marché du DT en 2021 était estimé à 6.75 milliards de dollars US, avec prédiction de croissance de près de 40% par année pour atteindre environ 100 milliards en 2029. Il va donc sans dire que le DT se fera de plus en plus présent au sein des organisations au cours de la prochaine décennie, et il est à prévoir que la numérisation accélérée et précipitée par la crise sanitaire aura tôt fait d'accélérer l'engouement pour l'outil technologique que représente le *Digital Twin*.

En parallèle du DT, un autre secteur d'activité s'est vu croître de manière accélérée ces dernières années : la santé numérique et la télésanté. Pour des raisons similaires aux besoins du télétravail, la demande pour la télésanté et les outils de santé numérique s'est accrue face à la crise de la Covid-19, et les professionnels de la santé y ont de plus en plus recours pour améliorer les soins de santé aux patients (Market Research Future, 2021). Il est en effet estimé que d'ici 2030, ce marché aura atteint environ 767 milliards de dollars US, un marché bien plus impressionnant que celui du marché du jumeau numérique. Or, ces deux marchés ne sont pas exclusifs l'un à l'autre : le jumeau numérique est également en train de se tailler une place dans le secteur de la santé, où il semble graduellement prendre forme comme un potentiel outil d'aide à la décision. La santé est en effet un secteur d'activité sensible et difficile, dans lequel les parties prenantes font face à des risques uniques et des situations très complexes concernant la santé et le bien-être de ses patients. Le DT a donc beaucoup à apporter aux gestionnaires, au personnel et aux patients du système de soins de santé, autant d'un point de vue médical qu'administratif.

C'est entre autres via ses technologies de support que le DT apporte un potentiel au secteur de la santé. L'Internet des Objets permet la capture massive de données essentielles qui peuvent être



raffinées en données et statistiques plus précises, en particulier lorsqu'on compare l'IoT à la capture manuelle de données sur laquelle de nombreuses organisations reposent encore. Le système de santé est riche d'informations critiques et complexes qui sont nécessaires au traitement des patient·e·s, que cela concerne directement les patient·e·s ou bien le personnel soignant. L'intelligence artificielle et l'analytique de données permettent quant à elles de faire ressortir des patrons de tendances, de détecter des problèmes, d'effectuer des pronostics, et de générer des métadonnées et des rapports d'une grande complexité avec une rapidité incomparable, des atouts importants lorsque les décisions peuvent impacter directement la vie d'un·e patient·e. Finalement, les outils de modélisation et de simulation permettent d'employer l'ensemble de ces informations pour tester des hypothèses, identifier des problèmes, émettre des prédictions de scénarios, et éventuellement optimiser le système étudié à partir des résultats obtenus, le tout étant possible sans risque ou modification pour la réalité physique.

Au regard de la complexité du réseau de la santé, de l'état des patient·e·s, et de la sensibilité des décisions, cette capacité du jumeau numérique à identifier des problèmes ainsi qu'à faire des tests d'amélioration sans affecter le bien-être du personnel ou des patient·e·s est essentielle et particulièrement pertinente. Toutefois, bien que la littérature fasse état d'une progression graduelle et nette des jumeaux numériques en santé, une analyse plus approfondie révèle un accent marqué sur le développement du concept de patient·e numérique, donc sur l'aspect médical et physiologique, tandis que beaucoup moins d'articles semblent s'intéresser à la gestion d'établissements de santé. À cet effet, ce mémoire se veut d'abord et avant tout une étude de l'état de la recherche sur les jumeaux numériques en santé et leurs différents types et classifications. Un accent un peu plus marqué est mis sur les systèmes de soins de santé afin de pouvoir en tester l'application par la conception d'un prototype, qui permettra d'évaluer sommairement le potentiel du jumeau numérique en santé et services sociaux au Québec. Le travail de prototypage décrit dans ce mémoire est effectué en partenariat avec la Clinique de Services bas seuil Relais, un organisme membre du CIUSSS Centre-Sud-de-l'Île-de-Montréal visant à offrir des services aux personnes marginalisées aux prises avec un trouble de dépendance aux opioïdes.

Afin de présenter ce travail de revue de littérature suivi d'une démarche de conception de prototype, le présent mémoire est divisé en chapitres qui vont comme suit. Le premier chapitre introduit la problématique générale ainsi que les objectifs de recherche ayant mené à la recherche sur les

jumeaux numériques en santé et services sociaux, le tout suivi d'une problématique et d'objectifs spécifiques associés à la Clinique de Services bas seuil Relais qui sont nécessaires à la conception d'un prototype simple de jumeau numérique. Le deuxième chapitre présente d'abord la méthode de revue de littérature globale du présent mémoire, suivie ensuite d'une revue de littérature exploratoire sur les classifications et typologies générales du jumeau numérique, puis d'une revue plus exhaustive et analytique des cas d'application de jumeaux numériques en santé permettant de terminer sur une typologie des jumeaux numériques en santé. Le troisième chapitre aborde la méthodologie de conception du prototype de jumeau numérique, dont la conception et démonstration sont explicités dans le quatrième chapitre. Finalement, le cinquième chapitre expose brièvement les opportunités, limites et enjeux liés aux contributions de ce mémoire ainsi qu'au jumeau numérique en santé et services sociaux de manière plus globale.

# CHAPITRE 1

## PROBLÉMATIQUE, QUESTIONS ET OBJECTIFS DE RECHERCHE

Ce chapitre présente les problématiques, questions et objectifs portés par ce mémoire de recherche. Sont d'abord présentées en section 1.1 les différentes problématiques de la recherche effectuée, soit les problématiques générales liées au réseau de la santé et des services sociaux au Québec ainsi que les problématiques spécifiques d'une des cliniques du réseau, la Clinique de services bas seuil Relais, plus simplement nommée la Clinique Relais. Par la suite, des questions de recherches qui découlent de ces problématiques sont proposées en section 1.2 pour guider la réflexion face aux problématiques. Finalement, les objectifs visés sont détaillés en section 1.3 à travers des objectifs généraux de recherche et des objectifs spécifiques concernant la Clinique Relais.

### 1.1 Problématiques de recherche

#### 1.1.1 Problématique générale – la santé et les services sociaux au Québec

Ici comme ailleurs, les soins de santé font face à des problématiques d'envergure qui ont été exacerbées par la crise sanitaire des dernières années, mais existaient déjà auparavant. Si certains de ces enjeux sont répandus partout, d'autres peuvent être spécifiques à une région en fonction des caractéristiques démographiques de la population, de la structure de gestion, et de la législation. Au Québec, le Réseau de la Santé et des Services Sociaux (RSSS) fait précisément face à un ensemble d'enjeux mondiaux et spécifiques qui sont bien présentés dans cet extrait du rapport « *Le Dossier santé numérique et son écosystème* » publié en 2019 par le Ministère de la Santé et des Services Sociaux (MSSS):

« Il est bien reconnu qu'il existe une crise dans la santé, perceptible tant au niveau local que mondial. D'aucuns affirment que le modèle actuel de soins et de services ne permettra pas de répondre à la demande croissante sur les systèmes de santé particulièrement par manque de capacité. Le vieillissement de la population, l'accroissement des maladies chroniques et les pressions financières et fiscales sans cesse grandissantes en santé, couplés à une main-d'œuvre insuffisante, dans le modèle de soins actuel qui présente un bon lot d'inefficacités, de gaspillages et de défaillances,

sont quelques caractéristiques de la situation actuelle en santé qui nécessite un changement draconien. Les citoyens-usager·ère·s, mieux informés, avisés, et enclins à prendre une place active dans leur santé et leur bien-être, sont aussi à la source du changement requis ». (Bouchard *et al.*, 2019)

Dans ce contexte, les auteur·rice·s du rapport présentent donc un ensemble de propositions concernant l'éventuelle implantation du Dossier Santé Numérique (DSN), qui consiste en l'idée d'un système informatique unifié de traitement et de partage des données des usager·ère·s, pour faciliter le travail des ressources et améliorer la qualité, l'efficacité et l'efficience du RSSSQ. Une analyse des propositions formulées permet de voir que les intervenant·e·s et administrateur·rice·s du système sont à la recherche d'un système ayant plusieurs fonctions essentielles :

« L'apport attendu de cette solution permettra entre autres de soutenir et d'améliorer la prestation des soins de santé et des services sociaux auprès des usager·ère·s, d'uniformiser les processus de travail, d'accroître l'accès à l'information par les intervenant·e·s et par les citoyens-usager·ère·s eux-mêmes, de faciliter le partage de l'information, de soutenir la collaboration interprofessionnelle, de limiter la transcription des données déjà saisies et finalement, d'éviter à l'usager·ère de répéter les mêmes renseignements de base. Cet apport est attendu pour l'ensemble des missions des établissements du RSSSQ. Elle devra également soutenir les activités inhérentes à la santé publique, en promotion, prévention, protection et surveillance. »  
(Bouchard *et al.*, 2019)

Pour permettre de remplir ces fonctions, les auteur·rice·s du rapport indiquent par la suite que le système implanté devra être omniprésent, intégré, et interopérable, c'est-à-dire qu'il devra permettre aisément la prise en charge de données provenant de plateformes différentes. Il devra aussi permettre la capture et le partage automatisé des données, faciliter l'accès à l'information et sa visualisation par les parties prenantes; et il devra traiter et préanalyser les données du système et des usager·ère·s pour permettre l'amélioration continue des soins et services ainsi que du système. L'une des requêtes principales du rapport sur les besoins du DSN est que la solution proposée réponde également aux besoins administratifs et non seulement médicaux (Bouchard *et al.*, 2019), d'autant plus que cet aspect semble particulièrement problématique pour les parties prenantes selon des rapports émis par l'École Nationale d'Administration Publique (ENAP)

concernant la gestion des données dans le RССSQ. À cet effet, il importe de s’y attarder pour mieux comprendre quels types de technologies pourraient aider à répondre aux besoins du RССSQ et de ses parties prenantes.

#### 1.1.1.1 Les analyses de l’ENAP

Dans le cadre de leur recherche sur le partage et la gestion des données dans le RССSQ, l’ENAP a entre autres soulevé que les systèmes d’information du réseau de santé sont présentement très mal intégrés (Caron *et al.*, 2021a). Les données sont souvent difficiles, voire impossibles à partager, et ce, malgré l’initiative du Dossier Santé Québec (DSQ) de 2013, qui a amélioré marginalement la situation en facilitant le partage des données entre certaines institutions. L’ENAP reproche en revanche au DSQ un manque d’interopérabilité, les données n’étant pas toujours ajustées aux différents systèmes, et le manque de standardisation occasionnant des blocages dans le partage des informations. Un coup d’œil sur le nombre de systèmes et d’usager·ère·s permet de comprendre pourquoi : l’analyse des 34 établissements directeurs du RССSQ révèle l’existence de 9000 systèmes d’information indépendants employés par 400 000 utilisateur·rice·s (Caron *et al.*, 2021a). Même si ces systèmes ne sont pas forcément uniques – ils pourraient par exemple être basés sur le même logiciel – ils n’en demeurent pas moins séparés les uns des autres. Au-delà d’un problème d’intégration des données médicales, il y a donc un enjeu évident de gestion, de traitement et de partage des données d’un point de vue administratif, et cette lacune cause des problèmes au sein de chacune des organisations, mais aussi pour les usager·ère·s.

L’ENAP a procédé dans un autre article à l’analyse des parcours actuels des usager·ère·s dans les soins de santé et dans les services sociaux, à travers cinq scénarios typiques dans lequel iels soulèvent les enjeux cliniques, législatifs et informationnels (Caron *et al.*, 2021b). Iels en concluent que le suivi et l’intégration des données médicales ou concernant le parcours clinique requièrent un travail supplémentaire et superflu impliquant de nombreuses ressources médicales et administratives au sein des CIUSSS. Ce travail est complexifié lorsque les informations proviennent de différents établissements, par exemple un Centre Local de Services Communautaires (CLSC), un groupe de médecine de famille (GMF), ou un hôpital. Plusieurs ressources médicales et sociales doivent donc questionner les usager·ère·s, compiler des données et effectuer des tests de manière redondante parce que les informations déjà obtenues ne sont pas stockées ou sont inaccessibles. Les Figures 1.1 et 1.2 ci-dessous illustrent les flux informationnels

d'un point de vue clinique puis administratif pour un des scénarios analysés par Caron et al. (2021b) : une personne en situation d'itinérance et dépendante aux psychotropes ayant des comportements dangereux, qui s'est fait arrêter par la police et amener à l'urgence.

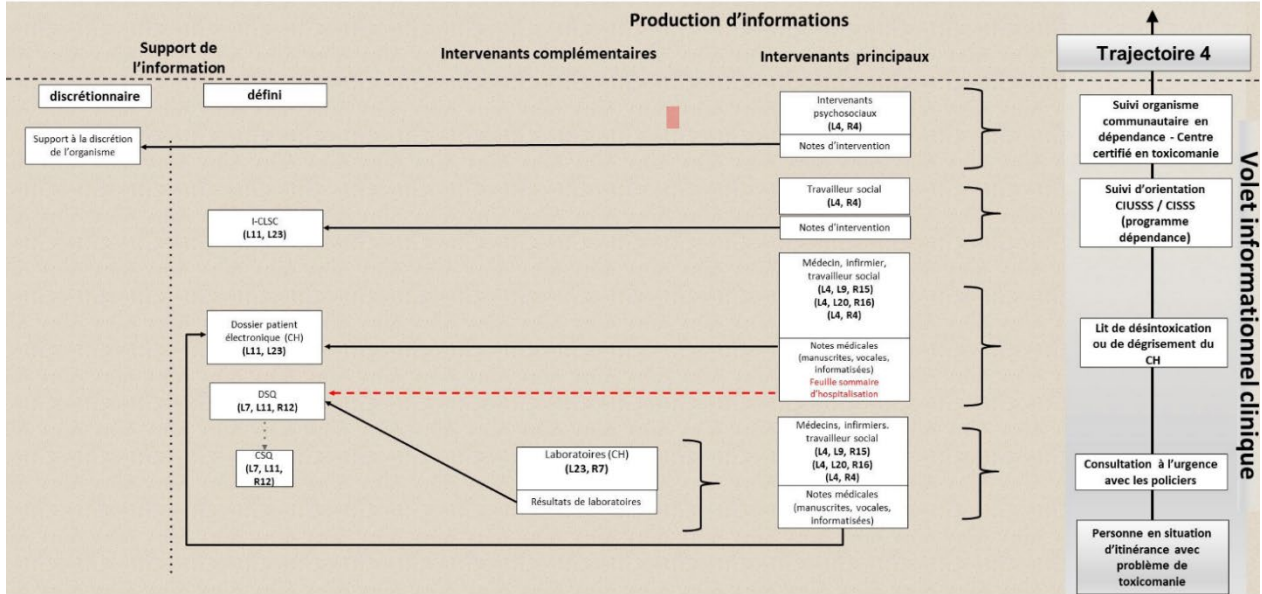


Figure 1.1 - Flux informationnel clinique d'une personne en situation d'itinérance (Caron *et al.*, 2021b).

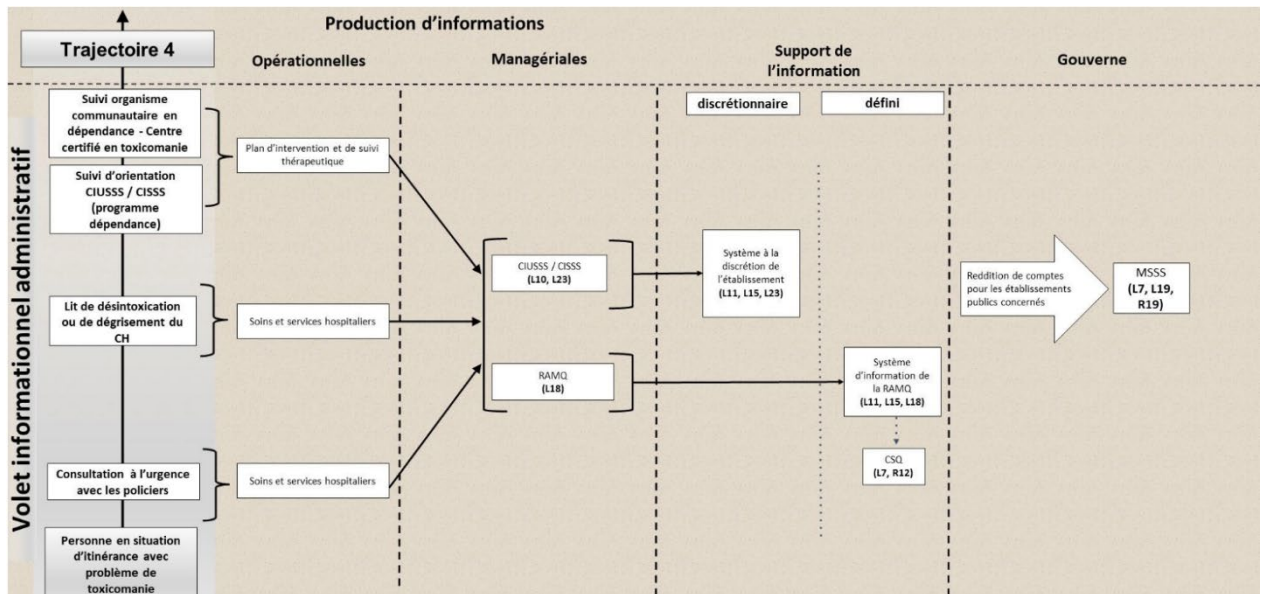


Figure 1.2 - Flux informationnel administratif du parcours d'une personne en situation d'itinérance (Caron *et al.*, 2021b)

Un coup d'œil sur les deux schémas révèle une certaine complexité de production et de gestion de l'information, pour un cas requérant l'utilisation des soins de santé et de services sociaux. Seulement pour la trajectoire de cette personne, il y a recours à entre six et sept intervenant·e·s qui utilisent au moins autant de systèmes de gestion des données différents : la traçabilité de l'information peut ainsi devenir rapidement compliquée, et le manque de standardisation des données amplifie les difficultés de partage. Cela peut se complexifier considérablement si, pour quelque raison que ce soit, il devait y avoir un changement d'établissement ou de CIUSSS au fil du parcours.

#### 1.1.1.2 Répondre aux besoins du RSSSQ : l'opportunité présentée par le jumeau numérique

Pour répondre aux besoins du RSSSQ, la solution technologique proposée doit donc mettre l'accent autant sur les usager·ère·s que sur les différentes ressources du système, qu'elles soient humaines ou matérielles, et doit pouvoir intégrer les informations à différentes échelles, autant macro que micro, pour donner aux ressources du système et aux usager·ère·s un accès centralisé aux informations nécessaires. Le projet semble ambitieux, mais réalisable, et d'autres provinces canadiennes ont déjà implanté des systèmes de ce genre, tels que l'*Alberta Netcare Portal* (Shaw et Wittevrongel, 2022), les résident·e·s et autres parties prenantes ayant accès à une partie de leurs informations via le portail *My Health Records*, où iels peuvent partager des informations sur leur santé, consulter leurs résultats médicaux, et avoir accès à leur historique. Ce système semble peut-être moins complexe que le DSN proposé au Québec en termes de capacité d'analyse et d'optimisation, mais demeure néanmoins bien intégré, centralisé et interopérable.

Plusieurs solutions technologiques peuvent sans doute répondre à ces attentes, basés par exemple sur différents progiciels de gestion tels que des systèmes d'informations hospitaliers ou d'autres logiciels afférents permettant de répondre aux besoins mentionnés par le gouvernement du Québec. Toutefois, plusieurs des éléments recherchés semblent intrinsèquement liés aux technologies IoT, à l'IA, et à l'analytique de mégadonnées. Une technologie complexe qui semblerait pouvoir bien répondre aux besoins du RSSSQ, et qui forme un assemblage de ces technologies requises, est le *Digital Twin*, ou jumeau numérique en français. Son intégration de la technologie et de l'infrastructure de l'IoT, avec le traitement et l'analyse des données par des méthodes analytiques complexes, et l'inclusion de l'intelligence artificielle ou encore de la simulation donnent à cet outil

technologique un avantage concurrentiel énorme pour une organisation de taille monstre comme celle que représente le RSSSQ.

Si le jumeau numérique est présentement encore en développement, il n'en demeure pas moins que les utilisations actuelles par des entreprises privées montrent que son utilisation a déjà commencé à faire ses preuves, comme dans le cas de l'intégration d'un système de jumeau numérique dans l'hôpital *Mater Private Hospital* de Dublin, en Irlande (Siemens Healthineers, 2018). Toutefois, un système comme celui du RSSSQ présente son lot de défis et de difficultés supplémentaires auquel il n'est pas absolument certain que le *Digital Twin* puisse faire face : il s'agit d'un système public hautement réglementé, d'un réseau de plusieurs types d'infrastructures et services, et il traite également des besoins de services sociaux. Or, lorsqu'on tente de se pencher sur la question, la recherche de précisions et de résultats sur l'utilisation qui en a été faite rend apparente une difficulté à évaluer les résultats dans le secteur privé, mais aussi à comparer les modèles et cas proposés. En effet, les articles et références sur le sujet concluent généralement à une amélioration des systèmes, mais ne permettent pas toujours de savoir de manière détaillée comment le DT a permis de répondre aux enjeux des patient·e·s et aux besoins administratifs. Même en surface, les cas et propositions semblent disparates, ce qui rend la prise de position et l'opinion difficile. Dans ce cas, les responsables de la planification et de l'implantation du DSN pourraient alors miser la recherche scientifique et académique pour combler le manque de visibilité au privé, permettant une recherche indépendante et une analyse critique des solutions proposées et retenues.

Or, un regard sur la littérature académique actuelle révèle des problèmes similaires. La technologie du *Digital Twin*, même si elle est bien répertoriée et semble plus mature dans les secteurs manufacturiers et de l'énergie, est en revanche à ses balbutiements dans le secteur de la santé, et n'est pas répertoriée pour les services sociaux. De plus, la vaste majorité des articles et cas proposés de jumeaux numériques sont utilisés pour la personnalisation des soins de santé, comme l'ajustement d'un traitement en fonction des caractéristiques individuelles d'un·e patient·e. Ce focus se traduit dans la littérature par le concept de *Digital Patient·e* (DP) ou *Virtual Patient*, soit le ou la patient·e numérique, avec une concentration particulière autour de l'*Internet of Medical Things* (IoMT), une sous-division des technologies IoT ayant pour accent la capture et le traitement de données médicales, par exemple la capture automatisée des données d'un électrocardiogramme (ECG). Il existe en revanche beaucoup moins de références sur l'utilisation du jumeau numérique



pour la gestion des soins de santé de manière plus systémique, comme l'intégration du parcours clinique des usager·ère·s et la gestion des ressources humaines et matérielles du système, sans compter une gestion combinée des enjeux médicaux et administratifs.

Dans la mesure où un système de gestion associé à un *Digital Twin* pourrait à la fois capter, traiter et partager ces informations, mais aussi offrir une interface de contrôle et un outil de gestion des opérations, il devient au minimum pertinent d'identifier et comprendre ce qui a déjà été fait en recherche sur le DT dans la gestion administrative des soins de santé et de services sociaux. Évaluer la possibilité du jumeau numérique comme solution technologique partielle pourrait mener à une innovation nécessaire dans le RSSSQ, autant en lien avec la gestion et le traitement des données que pour l'optimisation des opérations administratives et médicales, afin de simplifier et réduire le travail manuel des ressources et d'améliorer la qualité des services, mais aussi de rendre les opérations et le parcours plus fluides pour ses usager·ère·s. Toutefois, il est important d'inclure les parties prenantes dans cette réflexion, incluant celles qui pourraient être oubliées ou bien avoir des ressources plus limitées : une démarche de prototypage est donc proposée en partenariat avec la Clinique de Services bas seuil Relais, qui offre justement des services à des personnes marginalisées avec des capacités limitées, et permettra donc d'évaluer la pertinence de l'outil dans un contexte plus inhabituel que ceux explorés dans la littérature.

### 1.1.2 Problématique spécifique – la Clinique de services bas seuil Relais

La Clinique de Services bas seuil Relais<sup>1</sup>, ci-après référée comme étant la Clinique, est une clinique externe du CIUSSS Centre-Sud-de-l'île-de-Montréal, qui fait lui-même partie du RSSSQ. Les usager·ère·s de la Clinique sont généralement des personnes vivant en marge de la société et ayant une dépendance aux opioïdes, le cœur des services offerts étant la prescription et le suivi de Traitements par Agonistes aux Opiïdes (TAO), les agonistes aux opioïdes étant des alternatives aux narcotiques de la rue ayant moins d'effets secondaires et de risques pour la santé, et pouvant permettre le sevrage lorsque les conditions le permettent. Toutefois, selon un entretien fait avec Shany Lavoie, agente aux relations humaines de la Clinique, plus de 90% de leurs usager·ère·s

---

<sup>1</sup> Pour plus d'informations sur les Services bas seuil Relais : <http://www.cran.qc.ca/fr/nos-services-cliniques/nos-services-bas-seuil-relais>.

seraient en situation d'itinérance, n'ayant donc pas les ressources ou l'environnement social nécessaire à la réinsertion et au maintien d'un mode de vie sain. Les usager·ère·s de la clinique sont donc souvent des usager·ère·s de très longue durée, et il n'y a pas d'attentes du personnel de la clinique quant à une éventuelle réinsertion sociale ou à une réhabilitation éventuelle. L'objectif de la Clinique est donc, à travers le TAO ainsi que d'autres services divers, d'améliorer la qualité de vie de ces personnes qui autrement ont accès à très peu de ressources. Les services incluent, en plus du TAO, des examens et traitements médicaux variés, la prescription de médicaments, le suivi psychosocial, l'accompagnement social, l'éducation aux pratiques sécuritaires d'injection et aux traitements de surdoses, et l'accompagnement dans les besoins hors de la Clinique lorsque nécessaire.

En considération de l'objectif du Gouvernement du Québec d'effectuer une transition numérique pour le RSSSQ, il a été proposé dans la section précédente que le jumeau numérique pourrait être intéressant pour la construction du DSN comme système d'information unifié. En revanche, il est essentiel de vérifier si le jumeau numérique est bel et bien applicable dans différents services du RSSSQ, et d'en vérifier l'utilité et la maturité. Le comité de travail multidisciplinaire sur le DSN mentionnait que « les citoyens-usager·ère·s, mieux informés, avisés, et enclins à prendre une place active dans leur santé et leur bien-être, sont aussi à la source du changement requis ». (Bouchard *et al.*, 2019). Toutefois, qu'en est-il des citoyens usager·ère·s qui peuvent manquer d'information ou de ressources, comme ceux et celles qui utilisent les services de la Clinique, et pour lesquels la prise en charge autonome des soins de santé est plus difficile? Seront-ils ou elles également pris·es en compte dans cette transformation numérique?

C'est dans cette optique que la Clinique de Services bas seuil Relais a été choisie comme contexte pour le développement d'un prototype de jumeau numérique : elle offre des services de soins de santé et des services sociaux à ses usager·ère·s; elle vit sensiblement tous les problèmes répertoriés dans la problématique générale de cette recherche; et ses usager·ère·s marginalisé·e·s et vulnérables présentent des caractéristiques qui doivent être considérées dans la transformation numérique. Également, un contact était déjà établi avec Guillaume Anctil, un agent d'amélioration continue pour le CIUSSS du Centre-Sud-de-l'Île-de-Montréal, qui héberge la Clinique. Il travaillait pour la Clinique et a effectué un travail sur celle-ci dans le cadre d'un projet final de Maîtrise (Anctil, 2022), ce qui faisait de lui une source d'information importante sur le sujet, puisque la

problématique qu'il avait abordée était de nature similaire, mais facilitait aussi l'accès aux données et aux contacts nécessaires dans la démarche de prototypage. Une rencontre d'un peu plus d'une heure dans les locaux de la Clinique a donc été demandée et allouée pour visiter la Clinique avec Shany Lavoie et Guillaume Anctil, ce qui a permis une observation des lieux et une discussion des enjeux de la Clinique. À ce titre, les informations et données concernant la Clinique ainsi que les analyses qui en découlent proviennent à la fois du travail effectué par Guillaume Anctil et des rencontres effectuées avec lui, de la rencontre avec Shany Lavoie lors de la visite de la Clinique, et de différentes sources gouvernementales qui seront abordées dans le chapitre 4.

Comme d'autres établissements du RSSSQ, la Clinique a présentement du mal à accueillir davantage d'usager·ère·s selon Shany Lavoie. De plus, les besoins des usager·ère·s changent, et les dangers de surdose liés à la surconsommation d'opioïdes sont exacerbés par la présence croissante du Fentanyl sur le marché noir, un narcotique 20 fois plus puissant que l'héroïne et 100 fois plus que la morphine<sup>2</sup>. C'est aussi sans compter l'impact de la Covid-19 sur l'itinérance : les expert·e·s s'entendent pour dire que le nombre de personnes en situation d'itinérance est en hausse forte depuis la Covid-19, bien que le nombre exact n'ait pas encore été répertorié (Radio-Canada, 2022). Le tout mène à une situation difficile à démêler, avec une clientèle grandissante en intensité comme en nombre, et un besoin de flexibilité et de niveau de service sans précédent qui en découlent. À cet effet, la Figure 1.3 ci-dessous présente les causes identifiées de difficultés pour la Clinique qui affectent entre autres sa capacité à répondre à la demande. En plus des sources d'informations mentionnées précédemment, un article gouvernemental concernant les personnes en situation d'itinérance et leur interaction avec le RSSSQ (MSSS, 2021) a également été utilisé.

---

<sup>2</sup>Informations gouvernementales sur le fentanyl, <https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/dependance-aux-drogues/drogues-illicites-et-reglementees/fentanyl.html>.

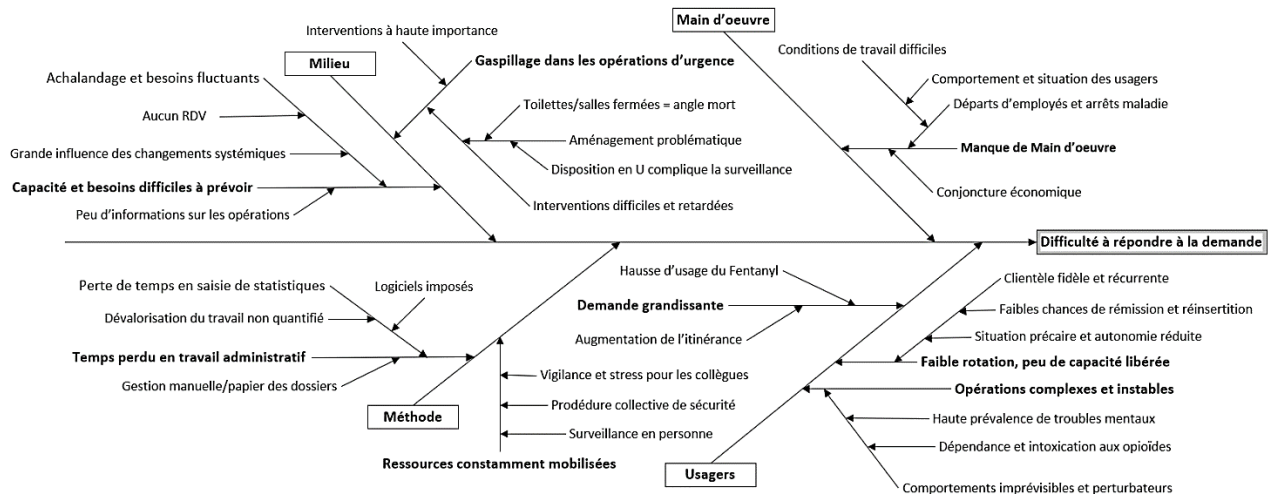


Figure 1.3 - Diagramme Ishikawa des difficultés de la Clinique Relais

Le diagramme permet d'identifier les causes intervenant dans les difficultés de capacité de la Clinique. Les causes de premier niveau sont identifiées en gras pour chaque source de problèmes, c'est-à-dire les enjeux liés aux méthodes de travail, à la main-d'œuvre, au milieu, et aux usager·ère·s de la Clinique. Ces causes impactent la réponse à la demande, mais sont aussi néfastes pour le bien-être des usager·ère·s ou des employé·e·s de la Clinique, ce qui peut affecter la pérennité de la Clinique ainsi que sa capacité à remplir sa mission. Il incombe donc d'examiner sommairement s'il est possible de remédier à ces situations ou non, pour ensuite se pencher sur la question du « comment ? ». La revue de littérature sur le jumeau numérique en santé, qui est présentée et analysée dans le chapitre qui suit, devrait permettre d'éclaircir certains points sur la gestion de la Clinique et de ses enjeux, incluant le bien-être des usager·ère·s et du personnel.

Il est difficile d'intervenir sur les causes de la Figure 1.3 qui sont liées aux usager·ère·s, puisqu'il est impossible pour la Clinique d'agir directement sur les causes systémiques qui ont pour conséquence la situation particulière des usager·ère·s. Considérant la mission de la Clinique, celle-ci ne peut également pas se permettre une gestion rigide ou ultra standardisée de ses opérations, puisque ses usager·ère·s n'auront pas la capacité de s'y adapter : elle doit demeurer flexible, réactive et bienveillante. Il s'agira donc de compenser autrement ces difficultés.

En ce qui concerne les enjeux et problèmes liés à la main-d'œuvre, il est difficile de jouer sur la conjoncture économique, mais il pourrait être possible d'agir pour améliorer les conditions de vie en lien avec la quantité de surveillance exercée par le personnel. Agir sur ce stress de vigilance

constante, mais aussi sur l'insécurité du personnel, pourrait faciliter le travail des intervenant·e·s et professionnel·le·s, et ainsi potentiellement améliorer la rétention de personnel et l'attractivité comme milieu de travail.

La Clinique présente une quantité importante d'inefficiences et de variables dans ses méthodes, ce qui peut compliquer les opérations pour les intervenant·e·s ainsi que la mesure et la saisie de données sur les opérations et/ou sur les usager·ère·s. Présentement, l'outil de saisie des statistiques ne permet pas de bien capter la nature des services offerts par la clinique, entre autres à cause du logiciel imposé par le Ministère, ce qui oblige les employé·e·s à manipuler et modifier le peu de données saisies concernant les opérations afin d'assurer de valoriser au mieux leurs activités auprès des gestionnaires en dehors de la Clinique. En considérant en plus le fonctionnement à peu près complet au papier, l'obtention de données et leur suivi semblent représenter un gaspillage de ressources dans les opérations actuelles, et il s'agit donc là d'une opportunité pour le jumeau numérique. Les employé·e·s doivent constamment être vigilant·e·s et faire de la surveillance dans différents contextes : l'état de santé des usager·ère·s en cas d'injections, la surveillance des toilettes lorsqu'un·e usager·ère y va, la surveillance des autres bureaux en cas de problème d'agressivité, et la surveillance de la salle d'attente sont des exemples mentionnés par Shany Lavoie et Guillaume Anctil. Cet état permanent de vigilance demande du temps et des ressources, en plus de ne pas toujours être efficace : le jumeau numérique pourrait potentiellement répondre à ce besoin.

Finalement, les milieux internes et externes de la Clinique provoquent certaines difficultés pour les opérations et la gestion de la capacité. Entre autres, la disposition des locaux et des couloirs a été identifiée comme source d'angles morts et de difficultés d'intervention : les toilettes fermées ainsi que les couloirs en « U » coupent le son et la visibilité entre collègues et avec les usager·ère·s, ce qui ralentit les interventions et peut causer la détection tardive de problèmes majeurs. Ce problème pourrait éventuellement être réglé par l'IoT, qui permet entre autres une meilleure visibilité en temps réel ou quasi réel des changements dans un système. Les changements systémiques en dehors de la Clinique, comme la propagation des maladies, les changements de température, des changements économiques, mais aussi les crises comme celle de la Covid-19 affectent démesurément les usager·ère·s de la Clinique, qui sont plus vulnérables et sans logements. Si certains de ces enjeux pouvaient être adressés, ils sont en revanche impossibles à contrôler, et le

jumeau numérique pourrait tout au plus assister dans la prévision ou la réaction aux changements de l'environnement, une aide qui pourrait tout de même être considérable.

Ainsi, dans le cas présent, le jumeau numérique semble surtout pertinent pour pallier la disposition des lieux et aux enjeux de sécurité et de bien-être des usager·ère·s ou des ressources, en particulier en ce qui concerne des interventions spéciales qui ont un potentiel perturbateur sur les opérations. Il est à noter que la visite effectuée de la Clinique n'a pas permis de soulever des inefficiences dans les opérations des intervenant·e·s et professionnel·le·s de soins médicaux, mais que cela n'implique pas qu'il n'y en a pas : ces enjeux seront donc sujets à discussion dans les propositions ouvertes pour la Clinique.

Les caractéristiques de la clinique et de ses usager·ère·s présentent des défis intéressants en termes de design de jumeau numérique, mais force est d'admettre que la clinique est très loin du niveau de maturité technologique requis à son implantation. Le prototype est donc pertinent dans l'optique d'une transformation numérique du RССSQ ou du CIUSSS Centre-Sud accompagnée de l'informatisation d'au moins une partie de leurs processus. La Clinique présente aussi une opportunité intéressante pour un prototype de DT dans la mesure où la littérature générale sur le jumeau numérique ne semble pas avoir couvert la gestion des services sociaux, alors qu'il s'agit d'une partie essentielle des services offerts par le RССSQ et les CIUSSS. Il s'agit donc de repérer dans la littérature sur les jumeaux numériques en santé les différents éléments pertinents pour la Clinique et les services sociaux en général, mais surtout de voir le potentiel que présente l'outil pour les ressources et les usager·ère·s.

## **1.2 Questions de recherche**

Cette réflexion sur les enjeux et les besoins du RССSQ québécois ainsi que de la Clinique Relais, accompagnée d'un regard sur l'état de la littérature sur la gestion des informations dans le même secteur, génère une question de recherche centrale:

Comment déterminer si le *Digital Twin* pourrait avoir la capacité d'automatiser et intégrer les données pour répondre aux besoins administratifs et opérationnels du Réseau de la Santé et des Services Sociaux du Québec?

Dans la mesure où le *Digital Twin* est un concept en pleine croissance, l'idée d'en développer un n'est pas illusoire; en revanche, la démarche de développement n'est pas banale non plus, et surtout, il n'est pas certain que cette technologie réponde vraiment aux besoins du réseau. Le concept de *Digital Twin* n'est pas universellement conceptualisé de la même manière, d'autant plus que le secteur spécifique peut affecter la vision des fonctions que doit remplir un DT, mais aussi les données nécessaires à son fonctionnement. Ensuite, les articles concernant les DT de gestion des soins de santé sont rares, et sont même inexistants lorsqu'il s'agit des services sociaux. Pour terminer, peu de publications détaillent le design d'un *Digital Twin*, et encore moins en santé, la plupart se concentrant sur la structure et l'architecture globale, ou bien présentant le développement ou le test d'une des composantes d'un DT pour en illustrer les capacités, ce qui rend le développement complet d'un DT une tâche ardue.

Dans ce contexte, trois sous-questions de recherche guideront le présent mémoire dans l'obtention d'une réponse à la question principale :

1. Quelles sont les caractéristiques et fonctions permettant de classifier les types de *digital twins* et de les qualifier comme outils ayant la capacité de répondre aux différents besoins technologiques et informationnels du RSSSQ ou d'autres organisations axées sur les services?

Répondre à cette question est essentiel pour répondre à la question principale, puisque de nombreuses définitions et conceptions différentes du DT existent, qu'elles comportent chacune des fonctions et structures différentes, et que le RSSSQ québécois requiert une technologie qui soit la plus complète possible : le *Digital Twin* devrait pouvoir répondre à cette demande selon les différentes couvertures du concept dans la littérature, mais il s'agit de bien identifier les éléments qui le permettront, et d'identifier où se positionne la problématique actuelle dans la littérature sur le DT. Une fois qu'une réponse à cette question aura été proposée, une deuxième question se pose :

2. Quel est le niveau d'avancement de la littérature actuelle sur les *Digital Twins* en gestion opérationnelle et administrative de la santé et des services sociaux, et quelles fonctions essentielles sont démontrées ou manquantes dans les modèles qui y sont proposés?

Une fois la technologie bien définie et identifiée, il incombe d'identifier ce qui a été fait dans la recherche et la littérature qui corresponde aux besoins du RSSSQ, mais également ce qui est

manquant. La littérature sur le jumeau numérique présente des modèles ayant des fonctions et objectifs variés, mais il n'est pas garanti que ces modèles couvrent présentement les besoins du RССSQ et de la Clinique. C'est à partir de l'identification d'un manque concernant le DT dans le secteur de la santé et des services sociaux que la présente recherche pourra contribuer à l'avancée du *Digital Twin* de manière globale dans l'industrie, mais aussi valider si les connaissances actuelles sur le DT en santé et services sociaux peuvent lui permettre de répondre aux besoins du RССSQ en tant qu'outil technologique d'aide à la décision. Finalement, une fois le positionnement effectué et le manque identifié, il s'agira de répondre à la troisième sous-question de recherche :

3. Comment illustrer la capacité du *Digital Twin* à répondre aux besoins généraux du RССSQ et aux besoins spécifiques de la Clinique Relais, tout en prenant en compte ses limites de capacités technologiques et de disponibilité des données?

La problématique en santé et services sociaux étant liée à un ensemble de problèmes réels et concrets, il est donc tout aussi essentiel que la présente recherche puisse démontrer la capacité du DT à répondre aux problèmes rencontrés : une simple exploration n'est pas suffisante pour vérifier la capacité de l'outil. Il s'agit donc de savoir comment prouver le potentiel du DT comme solution technologique capable de résoudre quelques problèmes typiques rencontrés dans le RССSQ.

## **1.3 Objectifs de recherche**

### **1.3.1 Objectifs généraux – Le DT pour la santé et les services sociaux**

En réponse à la question de recherche principale, l'objectif principal du présent mémoire est donc le suivant :

Démontrer le potentiel du *Digital Twin* pour automatiser et intégrer les données des systèmes de soins afin de répondre aux besoins administratifs et opérationnels du Réseau de la Santé et des Services Sociaux du Québec ainsi que de la Clinique Relais.

Les enjeux mentionnés précédemment concernant la santé et le bien-être dans la population ainsi que les problèmes d'efficacités et d'efficacité dans la Clinique et le RССSQ posent un problème majeur, et justifient amplement la nécessité d'évaluer la capacité du DT dans un contexte de santé et de services sociaux. En effet, une éventuelle implantation de l'outil doit pouvoir s'appuyer sur des propositions concrètes, et dans un monde où la santé numérique, le DT, et même le marché de



la santé en général, sont appelés à croître de manière fulgurante, il est essentiel de contribuer à l'avancée de la recherche afin de supporter le développement des *Digital Twin* en santé. Afin d'atteindre cet objectif final d'une démonstration des capacités de cet outil technologique, trois sous-objectifs ont été déterminés, qui répondent directement aux trois sous-questions de recherche identifiées précédemment. Le premier sous-objectif, qui répond à la première sous-question de recherche, est le suivant :

Identifier les caractéristiques, structures, fonctions, et classifications existantes du *Digital Twin* dans la littérature pour générer une typologie claire des DT qui permette d'organiser les modèles existants et de cibler les fonctions et services appropriés.

Pour atteindre ce sous-objectif, une revue de littérature et une classification exploratoire seront effectuées sur les jumeaux numériques dans l'industrie afin d'en identifier les éléments clés et d'illustrer les capacités de l'outil lui-même. Le sous-chapitre 2.1 présente la méthodologie employée pour effectuer la revue de littérature ainsi que la classification et l'analyse des jumeaux numériques, d'abord pour l'industrie en général, puis pour le secteur de la santé. Le sous-chapitre 2.2 présente d'abord l'histoire et l'utilisation du concept de DT dans la littérature et dans l'industrie, puis sont présentés les caractéristiques, les types, les fonctions et les structures technologiques principales de DT identifiées et retenues pour effectuer la suite de la recherche. Le deuxième sous-objectif de la présente recherche, qui répond à la deuxième sous-question de recherche, est le suivant :

Analyser, classer et évaluer les propositions de jumeaux numériques dans la littérature sur la santé et les services sociaux pour en faire ressortir le niveau de progression ainsi qu'une typologie spécifique permettant de cibler les fonctions et services pertinents pour le RSSSQ ainsi que la Clinique.

La méthodologie de recherche et de classification des articles en santé sera d'abord présentée dans le sous-chapitre 2.1, puis une analyse des DT dans la littérature existante sera effectuée pour le secteur de la santé et des services sociaux dans le sous-chapitre 2.3. Cette revue approfondie de la littérature sur le DT en santé et des cas qui y sont proposés vise à établir une image plus nette de la progression du concept dans le secteur, mais aussi à identifier les caractéristiques particulières des

différents types de modèles afin de pouvoir par la suite cibler les fonctions et services essentiels selon les besoins d'application.

Finalement, le troisième sous-objectif, qui répond à la troisième sous-question de recherche, et le suivant :

Utiliser les informations disponibles sur la Clinique Relais pour concevoir et modéliser un prototype de jumeau numérique qui puisse démontrer le potentiel du DT à répondre aux besoins de la Clinique et du RSSSQ, et ce, en considérant que les données captées par le prototype pourront être utilisées pour de futures améliorations des fonctions et capacités.

Il est attendu du prototype qu'il permette la démonstration de fonctions de base pour l'intégration des services, puis qu'il permette également d'évaluer le potentiel à grande échelle du jumeau numérique pour le RSSSQ dans des conditions variées. La méthodologie de design de ce prototype sera présentée en chapitre 3, tandis que le chapitre 4 présentera la conception et la démonstration du prototype lui-même à partir des éléments soulevés dans la clinique ainsi que dans la littérature sur le jumeau numérique. La section qui suit détaille les objectifs de conception du prototype de jumeau numérique pour la Clinique de services bas seuil Relais

### 1.3.2 Objectifs spécifiques de développement du prototype de DT

Dans un premier temps, il s'agit de développer un prototype qui permette de mieux cerner le travail effectué par les différent·e·s employé·e·s de la Clinique. La collecte de données est lacunaire présentement, puisque les données ne sont pas représentatives du travail réel des intervenant·e·s et du personnel soignant. Il faut donc capter des données sur les opérations actuelles des ressources et le parcours clinique des usager·ère·s, données qui manquent crucialement pour la suite du développement d'un jumeau numérique.

Dans un deuxième temps, le prototype de jumeau numérique doit être une ouverture sur une solution potentielle aux problèmes de la clinique en termes de sécurité et de qualité de service aux usager·ère·s. Il s'agit donc de proposer une base d'infrastructure qui permette à terme de rendre les opérations plus fluides pour les intervenant·e·s, les personnes soignantes, et les ressources

administratives en ce qui concerne la performance, la sécurité, la qualité et la rapidité des interventions.

Enfin, il s'agit d'identifier et de proposer, à travers le développement du prototype de DT, les éléments clés pertinents à un éventuel DT plus avancé pour la Clinique dans un contexte de santé et de services sociaux. La Clinique offre des services de santé qui pourraient avoir été abordés dans la littérature sur les DT, et la revue de littérature devrait donc permettre d'identifier les pistes de solutions intéressantes. En revanche, les services sociaux ne semblent pas avoir été couverts dans la littérature jusqu'à maintenant, et il est donc plus difficile de se baser sur d'autres recherches et pratiques pour cibler les fonctions à intégrer. Il s'agit donc d'une opportunité importante d'évaluation du DT pour le RSSSQ en termes de capacités et de potentiel de l'outil, mais aussi de discussion des défis, risques et enjeux posés par un système aussi omniprésent que peut l'être le jumeau numérique. À cet effet, le chapitre 5 présentera une discussion autour de ces enjeux du jumeau numérique en santé et services sociaux, afin d'offrir une vision plus critique et complète du jumeau numérique comme outil de gestion des données et d'aide à la décision dans un contexte de services liés à des enjeux et données très sensibles.

## CHAPITRE 2

### REVUE DE LITTÉRATURE

Ce chapitre est dédié à la revue de la littérature ainsi qu'à la classification et à la définition d'une typologie des jumeaux numériques. Le sous-chapitre 2.1 présente d'abord la méthodologie de recherche en deux temps qui a été suivie pour y parvenir, cette méthodologie servant ensuite de ligne directrice pour mieux encadrer la recherche d'articles et de cas d'études du DT. Les résultats de cette démarche sont ensuite présentés en sous-chapitres 2.2 et 2.3.

Le sous-chapitre 2.2 consiste d'abord en un aperçu de l'historique et de l'utilisation actuelle du jumeau numérique dans la littérature dans la section 2.2.1, puis par la mise en œuvre d'une caractérisation et d'une classification du jumeau numérique en section 2.2.2. Le tout permettant de répondre au premier sous-objectif de la présente recherche, soit d'« identifier les caractéristiques, structures, fonctions, et classifications existantes du *Digital Twin* dans la littérature pour générer une typologie claire des DT qui permette d'organiser les modèles existants et de cibler les fonctions et services appropriés ».

Dans un deuxième temps, le jumeau numérique est exploré et analysé plus en détail dans le secteur de la santé en sous-chapitre 2.3, avec une très brève mention des services sociaux étant donné leur absence visible dans la littérature sur le DT. Cette démarche vise à répondre au deuxième sous-objectif de la présente recherche, soit « analyser, classer et évaluer les propositions de jumeaux numériques dans la littérature sur la santé et les services sociaux pour en faire ressortir le niveau de progression ainsi qu'une typologie spécifique permettant de cibler les fonctions et services pertinents pour le RССSQ ainsi que la Clinique ». Une classification primaire et secondaire des articles est d'abord proposée en section 2.3.1 à partir de l'analyse faite des références répertoriées. Sont ensuite présentés les cas et les cadres d'applications du jumeau numérique dans la littérature ainsi que dans l'industrie, par niveau d'abstraction en santé, dans les sections 2.3.2 à 2.3.5. Finalement, la section 2.3.6 présente la typologie finale des jumeaux numériques en santé, obtenue par l'agrégation des caractéristiques des jumeaux numériques en fonction du niveau d'abstraction et des objectifs des modèles proposés.

## 2.1 Méthodologie de recherche des références et de classification et analyse des DT

Ce sous-chapitre présente les différentes étapes de la méthodologie suivie pour effectuer les deux revues de littératures exploratoires et approfondies ainsi que les classifications et typologies subséquentes sur le jumeau numérique. Le schéma présenté dans la Figure 2.1 ci-dessous résume les grandes étapes de cette méthodologie ainsi que les éléments notables issus de cette méthodologie et de la recherche d'articles.

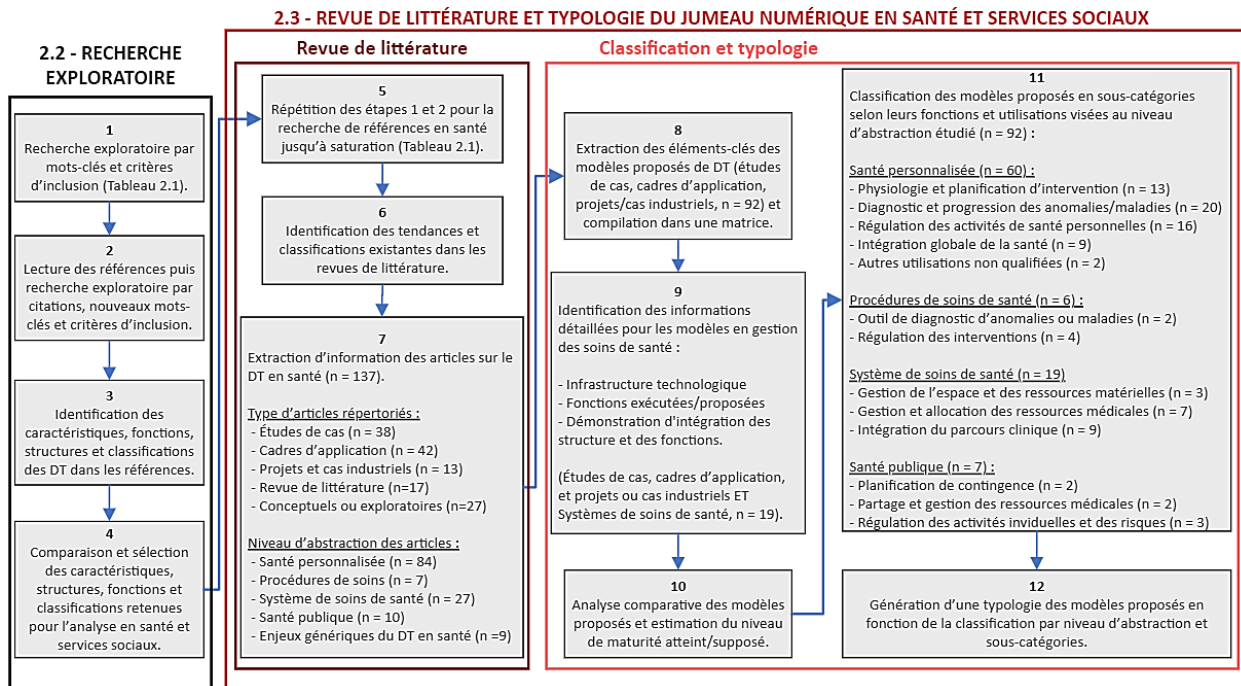


Figure 2.1 – Schéma de la méthodologie suivie pour effectuer les revues de littératures

Les étapes de la méthode appliquée sont simplifiées dans ce schéma, mais seront détaillées dans les sections qui suivront. La section 2.1.1 présente la méthode appliquée pour la recherche exploratoire, soit en premier lieu la revue intersectorielle des utilisations historiques et actuelles du jumeau numérique, et en deuxième lieu la caractérisation du DT et de ses classifications qui en est issue. Ensuite, la section 2.1.2 présente la démarche appliquée pour la deuxième partie de la revue de littérature, soit la revue approfondie du jumeau numérique dans le secteur de la santé et des services sociaux, ainsi que la démarche appliquée pour analyser, classifier et caractériser les différents types de modèles répertoriés dans la revue de littérature.

Les étapes un, deux et cinq de la méthodologie affichée dans la Figure 2.1 impliquent un ensemble de mots-clés, expressions et critères de sélection employés pour chercher et sélectionner les

références pertinentes pour la présente recherche. Les éléments de recherche employés pour les deux revues de littérature sont affichés dans le Tableau 2.1 ci-dessous. Les expressions et mots-clés ainsi que les critères de sélection ont varié selon la revue de littérature effectuée, tandis que la langue des articles, l'année de publication, et le type d'article étaient les mêmes dans les deux cas. Les bases de données utilisées pour effectuer ces recherches sont Google Scholar, Scopus, et le catalogue Sofia de l'UQÀM.

Tableau 2.1 - Critères de recherche des articles dans les bases de données

Étape de recherche	Critères de sélections	Mots-clés ou expressions
Revue de littérature exploratoire	Expression dans le titre, le résumé ou les mots clé des références.	<b>Digital twin</b> ET une expression parmi les suivantes :
	Le jumeau numérique est un élément principal ou majeur de la référence. *	<i>Reviews</i> <i>Characteristics</i> <i>Functions</i> <i>Architecture</i>
	La référence ne concerne pas seulement les secteurs aéronautiques, manufacturiers, ou de l'énergie. **	<i>Applications</i> <i>Enabling Technologies</i> <i>Service</i> <i>Industry</i>
Revue de littérature en santé et services sociaux	Expression dans le titre, le résumé ou les mots clés des références.	<b>Digital twin</b> ET une expression parmi les suivantes :
	Le jumeau numérique est un élément principal ou majeur de la référence*	<i>Health</i> <i>Hospital</i> <i>Health management</i> <i>Patient</i>
	La référence traite spécifiquement du DT en santé, pas séparément.	<i>Mental Health</i> <i>Social service</i> <i>Healthcare</i> <i>Health care</i>
	La contribution principale doit être liée la santé humaine et/ou de l'une de ses composantes (i.e. organes, santé mentale, traitement).	<i>Healthcare system</i> <i>Health care system</i> <i>Healthcare management</i> <i>Health care management</i> <i>Public Health</i> <i>Medic*</i> <i>Clinic*</i> <i>Clinical pathway</i> <i>Opioids</i> <i>Substance abuse</i>
Revue de littérature complète	<b>Année de publication</b>	Jusqu'à 2022
	<b>Type de document</b>	Articles scientifiques ou professionnels, articles de conférence, chapitres de livres, sites web d'organisations.
	<b>Langue</b>	Anglais

\* À titre indicatif, les articles faisant seulement mention du DT comme une ouverture technologique ou comme une parmi tant d'autres dans les industries X.0 ou la transformation digitale n'ont pas été conservés, exception faite des articles sur le *Cyber-Physical System* (CPS).

\*\*Exception faite des articles majeurs dans l'histoire du DT, comme ceux de Shafto et al. (2010), Grieves (2014) et Negri et al. (2017).

### 2.1.1 Méthode de recherche exploratoire intersectorielle sur le jumeau numérique

La démarche effectuée pour la revue de littérature exploratoire est synthétisée dans les étapes un à quatre de la Figure 2.1 présentée précédemment. La première étape consistait à rechercher des références traitant du jumeau numérique de manière globale, c'est-à-dire une couverture globale

des différents secteurs de l'industrie. Les revues de littérature sont particulièrement importantes à ce stade, l'objectif étant un survol du concept et de ses applications. Pour la deuxième étape, les références répertoriées sont lues, et les plus pertinentes concernant l'historique du DT ou son utilisation dans la recherche et dans l'industrie sont ciblées en particulier, ainsi qu'un ensemble de mots-clés permettant de mieux caractériser le DT par la suite. Ces deux étapes sont répétées de manière itérative jusqu'à atteindre un certain niveau de saturation d'information, c'est-à-dire qu'il y a peu ou pas d'articles génériques supplémentaires et que leur contenu n'apporte plus de nouveaux éléments. À travers cette démarche itérative, les mots-clés contenus dans la première partie du Tableau 2.1 présenté précédemment ont été intégrés à la recherche, tandis que les références ne répondant pas aux critères présentés dans le même tableau ont été ignorées ou éliminées de la recherche. La troisième étape consiste à regrouper ces éléments de caractérisation et de classification dans des matrices et tableaux permettant de mieux les compiler et les comparer. Ces tableaux seront présentés en section 2.2.2 de ce chapitre. Finalement, les caractéristiques, fonctions, structures et classifications existantes sont comparées au cours de la quatrième étape afin de déterminer les différences et similarités rapportées, mais aussi pour pouvoir identifier et déterminer lesquelles seront conservées pour la suite de l'analyse dans le secteur de la santé.

## 2.1.2 Méthode de recherche et d'analyse pour le jumeau numérique en santé

### 2.1.2.1 Méthode pour la revue de littérature et la classification primaire

Une fois la démarche de recherche exploratoire terminée, les informations relevées et retenues peuvent être transférées et testées dans le secteur de la santé, autant pour faciliter et organiser la recherche de références que pour tester la classification et l'approfondir dans le secteur de la santé. Les étapes de la démarche appliquée pour la revue de littérature, l'analyse, ainsi que la typologie du jumeau numérique en santé sont présentées dans les étapes cinq à douze de la Figure 2.1 présentée précédemment, et sont explicitées ci-après.

La première partie de cette démarche appliquée en santé, soit l'étape cinq, correspond à une répétition des étapes un et deux, c'est-à-dire rechercher les références existantes sur le jumeau numérique en santé, y identifier d'autres références et mots-clés pertinents, et ce, jusqu'à saturation en termes de nouveaux articles, c'est-à-dire que les banques de données utilisées ou les articles lus ne rendent plus de nouvelles références sur des applications du jumeau numérique en santé. Les mots-clés et autres critères de recherche se trouvent dans le Tableau 2.1 présenté précédemment.

Également, les références répertoriées lors de la recherche doivent passer par un processus de sélection continu à travers les lectures. Les articles ne répondant pas aux critères d'inclusion du Tableau 2.1 sont d'office exclus de l'analyse et de la banque de références puisqu'ils ne concernent pas le sujet d'intérêt. Le triage nécessaire pour éviter la pollution de termes génériques dans les résultats de recherche est un élément majeur de cette partie de la démarche. Par exemple, le mot « *health* » peut être synonyme d'« état » ou d'« intégrité » d'un objet en anglais, et s'applique donc également à l'étude d'objets, de machines, de bâtiments ou de véhicules. Dans les cas où les articles ressortis proviennent de toute évidence d'un autre secteur comme le secteur manufacturier ou aérospatial, les articles sont évidemment omis de la banque de références.

À l'étape six de la Figure 2.1, il s'agit ensuite d'identifier les types d'articles, les tendances et les classifications existantes en santé, et de voir s'il est possible de les intégrer à la classification déterminée dans la recherche exploratoire. À l'issue de cette révision, l'objectif est de déterminer une classification primaire permettant de traiter les articles en fonction de leurs similarités en termes de contenu et d'approche. Le survol des articles et la lecture de leur résumé permettent par la suite d'identifier à l'étape sept le type d'article en fonction de leur contenu et de leur contribution. Le Tableau 3.2 ci-dessous présente les justifications pour la classification des articles, en reconnaissant que cette classification a été faite pour les besoins de la présente recherche : certains articles qui se qualifieraient autrement comme des revues de littérature ou des articles dits « conceptuels » sont classés comme des cadres d'application à cause du modèle qu'ils proposent, ce qui facilite le traitement des articles pour analyse par la suite.

Tableau 2.2 - Justification de la classification des références par types

Type de référence	Caractéristique justifiant la classification
<i>Conceptuel ou théorique</i>	La référence est à prédominance théorique, exploratoire et explicative, et ne propose pas de modèle de jumeau numérique ou d'architecture.
<i>Cadre d'application</i>	La référence propose un cadre d'application dans un contexte générique, que ce soit par le biais d'une méthode ou d'une architecture de modèle, et explicite ce cadre d'application.
<i>Cas d'étude</i>	Un modèle est proposé, détaillé et testé avec des données réelles. Le test peut avoir été effectué sur une portion du modèle, mais l'article doit contenir une démonstration.
<i>Projets et modèles appliqués</i>	Ce sont des modèles développés et testés par une entreprise ou un regroupement de recherche, mais les informations sont limitées concernant l'architecture ou les résultats.
<i>Revue de littérature</i>	L'article est en prédominance une revue de la littérature de nature descriptive et synthétique, et ne propose pas de modèle architectural ou d'application qui soit détaillé. Si c'est le cas, l'article est alors classé comme cadre d'application pour faciliter l'analyse.



En addition à la classification par type d'article, le survol des articles et la lecture de leur résumé permettent également d'identifier le niveau d'abstraction ciblé par le modèle proposé. Cette classification est issue de la revue de littérature générique sur le DT et de la classification globale qui en est issue, mais les niveaux d'abstraction ont été transposés en santé, c'est-à-dire que l'accent n'est pas sur les objets ou machines, mais plutôt sur les humains et leur bien-être. Le Tableau 3.3 ci-dessous présente la justification pour la classification des références dans chaque niveau d'abstraction avec quelques exemples à l'appui.

Tableau 2.3 - Justification de la classification par niveau d'abstraction en santé

<b>Niveau d'abstraction identifié</b>	<b>Caractéristique justifiant la classification</b>	<b>Exemple</b>
<i>Santé personnalisée (entité)</i>	Le modèle représente et affecte surtout la santé individuelle, et la modélisation est axée sur une entité avec de potentielles sous-divisiones.	Patient-e, organe, coureur-euse.
<i>Procédures de santé (procédé/procédures)</i>	Le modèle proposé est lié aux activités des ressources d'un système, la modélisation étant axée sur le processus d'interaction avec l'entité.	Chirurgie, examen médical, diagnostic.
<i>Gestion de système de soins de santé (système)</i>	La modélisation concerne le fonctionnement et le contrôle d'un système de santé composé de multiples entités, ressources et/ou procédures.	Clinique, hôpital, département,
<i>Santé publique/ écosystémique (système-de-système)</i>	Les modèles sont axés sur la régulation à grande échelle des individus, procédures et systèmes de santé, ainsi que sur les phénomènes émergents provenant de leurs activités et interactions.	Ville, réseau d'hôpitaux ou de villes.
<i>Enjeux génériques de la santé</i>	Les références s'attardent à l'exploration et la discussion d'enjeux du jumeau numérique en santé ou de l'évolution du secteur en général.	Éthique, sécurité, technologies.

Les justifications présentées dans le tableau précédent ont formé la base de la classification et ont permis d'organiser les articles en termes de focus principal, toutefois quelques articles ont proposé des modèles de jumeaux numériques intégrant plusieurs niveaux d'abstraction. Dans ces cas multiniveaux, l'article a été analysé et traité en fonction du niveau d'abstraction le plus développé, ou selon le niveau d'abstraction le plus élevé si le contenu est approximativement égal. En ce qui concerne la dernière classe d'articles, les références qui y sont classées explorent des enjeux qui peuvent toucher tous les niveaux, et s'y retrouvent donc même si une référence traite d'enjeux dans le contexte d'un niveau d'abstraction particulier. Par exemple, les enjeux de sécurité des données ou de respect de la vie privée, même si discutés dans un contexte de santé personnalisée, concernent également les autres niveaux d'abstractions.

### 2.1.2.2 Classification spécifique des articles, des cas et des cadres d'applications

À l'étape 8 de la démarche présentée en Figure 2.1, les articles contenant des études de cas, des cadres d'application, ou bien des projets ou cas d'industrie sont ensuite lus et analysés en détail afin d'en relever les caractéristiques principales : l'objectif du modèle, la nature du modèle, l'application spécifique, le type de capture des données, la nature de la connexion, la possibilité de rétroaction directe sur la réalité physique, et finalement les éléments marquants, manquants ou peu précis sous la forme de notes. Le tableau 2.4 ci-dessous présente un extrait de la matrice employée avec quelques exemples à l'appui, tandis que la matrice entière est exposée en ANNEXE A.

Tableau 2.4 – Extrait de la matrice de classification de base des articles en santé

Article	Niveau d'abstr	Sous-division	Type d'article	Entité d'intérêt	Précision	Objectif et Application (1 Phrase)	Entrée et circulation des données	Rétroaction/Actuation	Modèle virtuel clair	Maturité estimée	Notes et éléments manquants
Zhang et Tai (2022)	HP	Régulation de l'intervention	Case Study	Intervention	Chirurgie	Modèle de réalité virtuelle pour l'intervention chirurgicale supporté par un algorithme de sécurité et détection des vulnérabilités.	VR Automatisée, Patient Manuelle	Rétroaction de performance d'opération	Oui	2	RV est avancée et intéressante, mais pas vraiment un DT, le patient n'est pas connecté, c'est un modèle reconstruit.
Zhao et al. (2021)	SP	Suivi et régulation de la population	Case Study	Citoyen	Suivi des cas de Covid-19 et identification des risques	Modèle de suivi et détection de risques liés aux cas confirmés de Covid-19 via les téléphones intelligents et balises bluetooth par les autorités sanitaires	Automatisée	+/-	+/- clair	3	L'actualisation des risques et la MAJ du système requièrent un travail manuel des autorités sanitaire, mais le calcul et l'identification à partir du système est automatisée.
Zimmerman et al. (2019)	PV	Santé globale	Brevet	Patient	Générique, Systèmes internes	Brevet pour la modélisation complexe d'un patient pour effectuer les simulations à partir de données génétiques, historiques, d'imagerie, etc.	Manuelle	Human-in-the-Loop	Oui	2	Pas de connexion en temps réel, modèle de simulation.

Si le niveau d'abstraction avait été mal jugé lors du premier survol et que l'ajout de détails suggère un autre niveau d'abstraction principal, l'article était reclassé dans la bonne catégorie. De la même manière, si trop d'éléments étaient manquants ou trop peu explicites au terme de la lecture d'un cadre d'application, l'article était conservé comme article conceptuel, mais n'était pas évalué comme cas d'application.

À l'étape 9 de la Figure 2.3, l'analyse a été poussée plus loin pour les articles sur la gestion des soins de santé étant donné qu'ils étaient davantage reliés à la problématique générale du RSSSQ québécois et à la problématique spécifique de la Clinique. L'intégration des cinq dimensions retenues du DT, qui seront abordées en sous-section 2.2.2.3 de ce chapitre, a été explicitée pour chaque modèle, et une analyse a également été faite des fonctions exécutées et du niveau de démonstration des composantes du DT. Le Tableau 2.5 ci-dessous présente un extrait de la matrice

employée, présentée en version transposée à des fins de présentation avec deux exemples à l'appui. La matrice complète est présentée en ANNEXE B.

Tableau 2.5 - Extrait de la matrice d'analyse des cas de systèmes de gestion de santé, version transposée

Auteurs	Augusto et al. (2018)	Croatti et al. (2021), Croatti et al. (2020)
Type d'article	Cadrage et Étude de Cas	Cadrage de cas
Cible(s) du modèle	Établissement(s)	Établissement(s)/ Patients
Focus du modèle	Parcours Clinique	Parcours Clinique
Détail	Focus principal = ressources médicales humaines.	Suivi de l'état des patient-e-s en lien avec les étapes et les ressources impliquées.
Gestion centralisée des données	N/A	Proposée
Type de données	Paramètres estimés	Primaires
Traitement/ analyse des données	Démonstré	Proposé
Latence de connexion	Sporadique	Temps [quasi] réel
Capture/Entrée des données	Manuelle	Manuelle
Connexion intégrée	Démontrée	Proposée
Détails de connexion	Données de l'hôpital non fiables, donc seulement utilisées pour estimations.	Les données sont entrées immédiatement par des agent-e-s de software.
Visualisation/ interaction	Modèle de simulation	Résultats (Tableau de bord)
Design et Prototypage	N/A	N/A
Détails du modèle virtuel	Pas de tableau de bord présenté, pas d'optimisation de processus envisagé.	Rien sauf le statut des patient-e-s. Outil IA de support aux agent-e-s.
Monitoring et Détection	N/A	Proposé
Simulations et scénarios	Démonstré	N/A
Prédictions et pronostics	N/A	Proposé
Évaluation et Diagnostics	N/A	Proposé
Type de rétroaction	N/A	Imprécis
Rétroaction est:	N/A	Proposée
Maturité estimée	2	3
Dimensions démontrées du DT (/5)	Partielle (3 axes)	Proposition théorique
Axes démontrés	Modèle de simulation, base de données sommaire, test de scénarios.	Aucune démonstration
Commentaires génériques	Modèle de simulation d'un hôpital, modulable avec données sporadiques manuelles pour analyser des scénarios.	Le modèle reçoit des données en temps quasi réel, mais les données sont saisies et analysées par des intermédiaires. La rétroaction est informative (affichage).

Par la suite, l'étape 10 consiste à utiliser ces matrices et leur contenu afin d'estimer le niveau de maturité des modèles proposés et à en faire une analyse comparée afin de soulever les ressemblances et différences. Ce travail permet par la suite d'effectuer à l'étape 11 une classification en sous-catégories pour chaque niveau d'abstraction des modèles et d'en faire l'analyse comparative sur des bases similaires. La majorité du sous-chapitre 2.3 est formée de l'analyse des cas par sous-catégorie et entre sous-catégories d'un même niveau d'abstraction. Finalement, la douzième et dernière étape consiste à générer une typologie des jumeaux

numériques en fonction du niveau d'abstraction et des sous-catégories, en conservant le principe qu'un modèle de jumeau numérique pourrait comporter plusieurs sous-modèles, et donc plusieurs niveaux d'abstraction ou sous-catégories d'utilisation.

## **2.2 Recherche exploratoire : historique, usage et caractérisation du DT dans la littérature**

Ce sous-chapitre présente d'abord un portrait historique du jumeau numérique ainsi qu'un survol de la situation actuelle dans la littérature scientifique et de ses applications dans les secteurs industriels. Suivra ensuite une analyse des classifications et caractérisations existantes du jumeau numérique afin de déterminer celles à retenir pour l'analyse en santé du sous-chapitre subséquent.

### 2.2.1 Historique et utilisation du concept de Digital Twin dans l'industrie

Cette section aborde le *Digital twin* sur une ligne temporelle : les débuts du concept, suivis de sa croissance dans la recherche, puis son utilisation aujourd'hui dans les différents secteurs économiques, afin de mieux comprendre comment se sont développés les modèles d'aujourd'hui.

#### 2.2.1.1 Débuts et phases de développement du jumeau numérique

Remonter l'histoire exacte du *Digital Twin* n'est pas chose facile : de nombreux concepts similaires au DT en application ou en théorie ont existé avant lui, comme la *Virtual Factory* (VF), les modèles virtuels en simulation, et les *Cyber-Physical Systems* (CPS), sans pour autant que la démarcation soit toujours claire. Dans la littérature scientifique, la première utilisation du terme et du concept précis de *Digital Twin* est attribuée unanimement à Michael Grieves, qui aurait présenté le concept dans le cadre d'un cours qu'il donnait à l'université en 2003, à la suite de ses travaux avec John Vickers, un membre de la NASA (Grieves, 2014). C'est d'ailleurs la NASA qui serait responsable de la première publication utilisant le terme *Digital Twin* en 2010, dans la première ébauche de leur plan de développement technologique (Shafto *et al.*, 2010). Il s'agit donc en un sens de la première formalisation du concept de DT avant que celui-ci ne soit réellement appliqué.

En revanche, déterminer à quand remonte la première application du concept est plus difficile, car comme mentionné précédemment, la frontière avec d'autres technologies n'est pas toujours claire. Par exemple, Stephen Ferguson, ingénieur et responsable marketing chez Siemens, soutient que le premier jumeau numérique aurait été créé bien avant que le terme *Digital Twin* ne soit apparu, dans

le cadre de la mission Apollo 13 en 1970 (Ferguson, 2020), pour laquelle des simulations et modèles computationnels sans précédent ont été développés et utilisés ajuster « rapidement » leurs modèles de la navette, tester des hypothèses, et émettre les directives nécessaires à la continuité et au succès de la mission. S’il est vrai que cette affirmation semble cohérente, le manque de détail des technologies utilisées ne permet pas de valider cette affirmation, même si elle demeure un ajout intéressant à l’historique de la technologie. Une revue catégorique de tous les articles impliquant les autres concepts similaires au DT étant hors de la portée de la présente recherche, l’analyse du DT se concentrera donc uniquement sur les articles et cas réels pour lesquels le terme *Digital Twin* a été textuellement employé, et ce, peu importe le secteur. Le *Cyber-Physical System* (CPS) sera toutefois brièvement discuté, étant abordé conjointement avec le DT dans plusieurs articles relevés.

Tao et al. (2019b) proposent un découpage intéressant de l’histoire du DT, avec un découpage temporel en trois segments du développement de la recherche sur les DT en fonction du nombre de publications scientifiques sur le sujet : la formation du concept, l’incubation du concept, et l’expansion de la recherche. La Figure 2.2 ci-dessous illustre ce découpage.

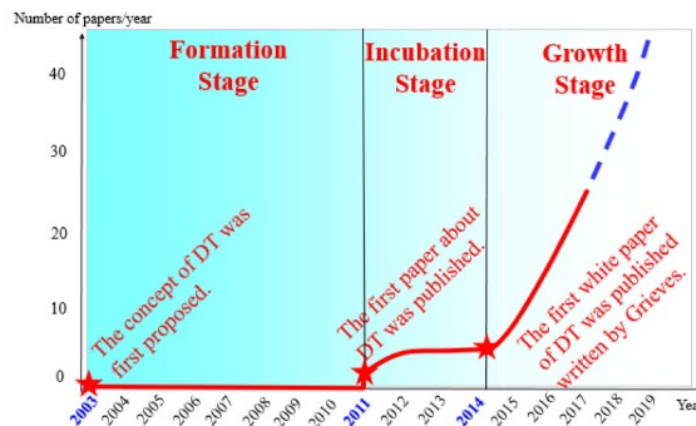


Figure 2.2 - Phases de développement de la recherche sur le DT, tel que proposé par Tao et al. (2019b)

En complément, Fang et al. (2022) identifient également une tendance qui peut être mise en parallèle des phases temporelles de développement du DT de Tao et al. (2019) : la présence initiale de publications surtout conceptuelles jusqu’à environ 2015, suivie d’une présence dominante des cadres structurels et architecturaux de 2015 à 2019, pour terminer avec une majorité de publications d’articles de méthodologies et d’études de cas à partir de 2020. Cette tendance parallèle et globale est présentée dans la Figure 2.3 ci-dessous.

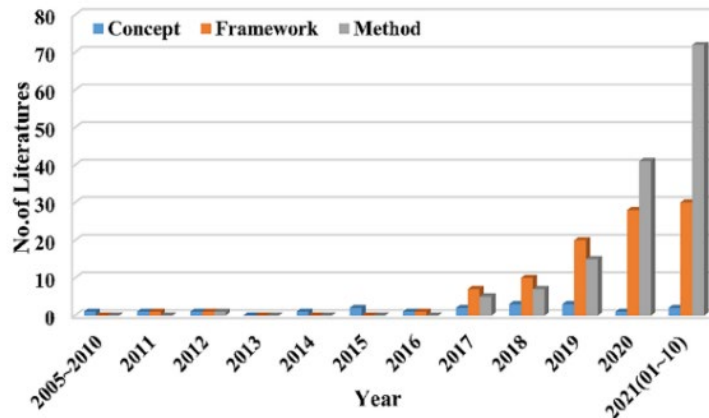


Figure 2.3 - Nombre d'articles publiés avec les mots-clés « Digital Twin » -à oct. 2021 (Fang *et al.*, 2022)

La première phase temporelle de (Tao *et al.*, 2019b), la formation du concept, aurait débuté en 2003 lors de la première présentation du concept (Grieves, 2014). Elle consiste en un développement du concept par les chercheur·euse·s, sans qu'il y ait pour autant de publications officielles sur le sujet. La deuxième phase temporelle, l'incubation, débute en 2011 ou 2010 selon les sources, avec la première publication scientifique officielle sur le DT (Shafto *et al.*, 2010 ; Tuegel *et al.*, 2011). Cette deuxième phase de développement est caractérisée par une dizaine de publications surtout conceptuelles sur trois ans (Negri *et al.*, 2017 ; Tao *et al.*, 2019b) entre autres à la suite des 53<sup>e</sup> et 54<sup>e</sup> éditions de la *AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*. La troisième phase de développement de la recherche, la croissance, débute avec la publication en 2014 du premier *White Paper* par Michael Grieves (2014) dans lequel il caractérise le DT pour la première fois comme étant constitué d'une entité physique, une entité virtuelle, et d'une connexion entre les deux. Il s'ensuit une augmentation exponentielle des publications répertoriées dans les années suivantes, d'abord des cadres structurels de DT, puis des cas et méthodes d'implantations : en octobre 2018 auraient été répertoriées 92 publications concernant les DT depuis leurs débuts (Jones *et al.*, 2020). En octobre 2021, une recherche par mots-clés faisait passer à environ 350 le nombre de publications scientifiques répertoriées avec le concept de « *Digital Twin* » abordé tel quel (Fang *et al.*, 2022 ; Tao *et al.*, 2022), illustrant une croissance marquée de l'intérêt dans la recherche.

#### 2.2.1.2 Incubation du concept: le *Digital Twin* et l'Industrie 4.0

Alors que le concept de *Digital Twin* faisait son apparition formelle aux États-Unis, au même moment, en Allemagne, le terme *Industry 4.0* faisait son apparition comme stratégie de

développement technologique pour l'horizon 2020, consistant en l'intégration des données des systèmes manufacturiers grâce à la connectivité. Les technologies clés de l'Industrie 4.0 peuvent varier selon les auteurs, toutefois certaines technologies demeurent plutôt unanimes : l'IoT, le *Cloud*, le *Big Data Analytics*, l'IA, et les CPS, ces derniers étant très proches du DT (Bottani *et al.*, 2017 ; Khan *et al.*, 2022 ; Negri *et al.*, 2017 ; Pivoto *et al.*, 2021 ; Qi *et al.*, 2021 ; Tao *et al.*, 2019b).

En ce qui concerne le DT, qu'il soit conçu comme une extension du CPS (Bottani *et al.*, 2017 ; Negri *et al.*, 2017 ; Pivoto *et al.*, 2021) ou une technologie à part entière (Khan *et al.*, 2022 ; Qi *et al.*, 2021 ; Tao *et al.*, 2019b), il n'en demeure pas moins une technologie centrale et intimement liée à la croissance de l'Industrie 4.0. Le DT dépend en effet des technologies de l'Industrie 4.0 mentionnées précédemment et évolue donc avec celles-ci, puisqu'elles sont nécessaires à son fonctionnement. Il n'est donc pas étonnant que la croissance de l'Industrie 4.0 dans les dernières années corresponde également à une croissance de l'intérêt pour le DT dans le secteur industriel.

### 2.2.1.3 La croissance du concept : le secteur manufacturier et de l'énergie

Le DT dans la recherche a d'abord existé exclusivement dans le secteur aérospatial, dans les travaux de la NASA, de la U.S. Air Force et à la suite de la *AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference* (Negri *et al.*, 2017). Bien que la recherche dans le secteur aérospatial ne se soit pas arrêtée depuis, il demeure que c'est dans le secteur manufacturier que le concept de DT a pris son envol par la suite.

La première mention du concept dans le secteur manufacturier et hors de l'aéronautique semble provenir d'une proposition de Lee *et al.* (2013) pour le développement du DT comme extension d'un CPS de machines de production. Le DT ainsi proposé viendrait intégrer les données d'une ou plusieurs machines d'usine à leur copie virtuelle afin d'effectuer des simulations et prédictions, permettant un plus haut niveau d'intégration et d'autonomie du CPS proposé, qui lui n'implique pas de copie virtuelle en soi. La caractérisation proposée par Grieves (2014) peu de temps après a marqué le coup d'envoi des publications dans le secteur manufacturier, la vaste majorité des publications répertoriées jusqu'à 2018 y étant rattachées, avec à peu près aucune publication répertoriée ailleurs que dans les secteurs aéronautiques, manufacturiers, et de l'énergie (Jones *et al.*, 2020 ; Negri *et al.*, 2017 ; Tao *et al.*, 2019).

Les applications identifiées en milieu industriel dans les revues de littérature semblent pouvoir être regroupées sommairement dans quatre grandes catégories (Fang *et al.*, 2022 ; Kritzinger *et al.*, 2018 ; Negri *et al.*, 2017 ; Tao *et al.*, 2019b) : *Prognostics and Health Management* (PHM), *Production Planning and Control* (PPC) et *Process and Layout Design* (PLD), le tout permettant de couvrir l'entièreté du cycle de vie d'un produit ou d'un système, soit le *Product Lifecycle Management* (PLM). Ces catégories, bien que non répertoriées dans les autres secteurs et dans les systèmes de classification génériques, auront leur importance plus tard au sein de ce mémoire.

Au-delà de la recherche, des jumeaux numériques ont également débuté leur apparition plus complète sur le marché et dans les milieux industriels, certaines entreprises détenant même des brevets de systèmes de DT. Par exemple, Tao *et al.* (2019) rapportaient que General Electric (GE) a entre autres implanté un système de DT pour le suivi et le contrôle de turbines et d'éoliennes dans le secteur de l'énergie; Siemens auraient implanté pour leur part un DT pour la gestion d'un système d'alimentation électrique, permettant son optimisation et son autonomie. Si le secteur manufacturier est demeuré propice au développement du jumeau numérique, celui-ci s'est plus récemment popularisé dans d'autres disciplines, surtout dans le secteur industriel, comme en ingénierie civile et dans la production d'énergie, mais également dans le secteur des services : villes intelligentes, vente au détail, soins de santé, transport et logistique, etc. Tao *et al.* (2019) faisaient déjà référence à quelques utilisations comme la santé et la conduite assistée, mais c'est plus tard que sont apparues la majorité des applications dans le secteur des services.

#### 2.2.1.4 Le *Digital Twin* aujourd'hui : portrait global

Selon le secteur d'activité, le développement du DT dans la recherche et la littérature peut autant être en pleine expansion qu'en être encore à ses balbutiements. Deux revues de littérature publiées récemment ont fait une étude du nombre de résultats de recherche et d'articles publiés par secteur pour le *Digital Twin* : les résultats comparés et simplifiés sont présentés le Tableau 2.6 ci-dessous, et sont à prendre avec précautions, comme la démarche de classification par secteur n'est pas détaillée par les auteur·rice·s et que les moteurs de recherche ont différé dans les deux études.



Tableau 2.6 - Portion des industries dans la littérature sur le DT

Secteurs d'Activité	Portion des industries		
	Tao et al. (2022)	Singh et al. (2022)	Moyenne
<b>Ressources Naturelles et Énergie</b>	11.6%	30.4%	21.0%
<b>Agriculture et Nourriture</b>	4.0%	2.5%	3.2%
<b>Secteur Primaire (Extraction)</b>	15.5%	32.9%	<b>24.2%</b>
<b>Manufacturier</b>	45.9%	25.7%	35.8%
<b>Véhicules</b>	12.2%	9.1%	10.7%
<b>Construction</b>	5.0%	13.5%	9.2%
<b>Software Engineering</b>	1.7%	0.0%	0.8%
<b>Secteur Secondaire (Production et Construction)</b>	64.7%	48.4%	<b>56.5%</b>
<b>Ville et Environnement</b>	5.6%	3.6%	4.6%
<b>Éducation, Culture et Histoire</b>	1.0%	7.5%	4.2%
<b>Santé</b>	3.6%	4.3%	3.9%
<b>Affaires</b>	6.6%	0.0%	3.3%
<b>Transport et Logistique</b>	2.6%	1.8%	2.2%
<b>Vente au détail</b>	0.3%	1.5%	0.9%
<b>Secteur Tertiaire : Services</b>	19.8%	18.7%	<b>19.2%</b>

Bien que la portion des différents secteurs varie entre les articles, une tendance se dégage néanmoins : les moyennes du secteur primaire (24.2%) et du secteur secondaire (56.5%) sont nettement majoritaires dans les publications. En contrepartie, le secteur des services couvre en moyenne seulement 19.2% des publications, mais représentait 65.7% du produit intérieur brut (PIB) en 2022, contre seulement 6% pour le secteur primaire et 29.3% pour le secteur secondaire (World Bank, 2022a, 2022c, 2022d, 2022b). Il y a donc un fort déséquilibre entre la présence des secteurs économiques dans les publications et l'importance de ces secteurs dans l'économie mondiale. À cet effet, la prochaine sous-section traitera donc brièvement des utilisations du *Digital Twin* dans le secteur des services, qui ont commencé à prendre davantage de place dans la littérature.

#### 2.2.1.5 Utilisation du *Digital Twin* dans le secteur des services

Cette sous-section présente le DT dans les industries de service en se basant sur la présence des publications dans la littérature, et en fonction du Tableau 2.1 présenté précédemment. Ainsi, les villes intelligentes et l'environnement seront d'abord couverts; ensuite, l'éducation, la culture et l'histoire; suivis du transport et la logistique; pour terminer avec la vente au détail. Le secteur des affaires étant trop large et non explicité par Tao et al. (2022), il ne sera pas détaillé dans cette section, d'autant que les affaires pourraient tout autant référer à des activités des secteurs manufacturiers ou de l'énergie qu'à des services. Quant au secteur de la santé, il sera très

brèvement présenté dans cette sous-section, mais sera analysé en détail dans le sous-chapitre 2.3, puisqu'il s'agit du cœur de la présente recherche.

### 2.2.1.5.1 Le DT dans les villes intelligentes et l'environnement

Les villes intelligentes (VI) ont récemment gagné en popularité lorsqu'il s'agit d'appliquer et implanter un *Digital Twin* : Mylonas et al. (2021) couvrent dans leur revue de littérature une cinquantaine de publications sur le DT dans la VI. Bien que le concept des *Smart Cities* ne soit pas exclusivement lié au DT, la citation suivante résume bien l'application qui peut en être faite :

« *The DT is applied to the construction of smart city, which is based on the [Building Information Modeling] and the 3D geographic information model, using the IoT to digitize all the objects in the city, such as buildings, transportation facilities, underground pipelines, and other entities, and finally build a completely corresponding virtual city in cyberspace* » (Fang et al., 2022).

La VI peut donc vivre pleinement à travers le jumeau numérique, qui lui sert de structure numérique, de soutien, et de nombreuses applications du concept ont été répertoriées dans ce contexte. Ces applications sont présentées dans la Figure 2.3 ci-dessous :

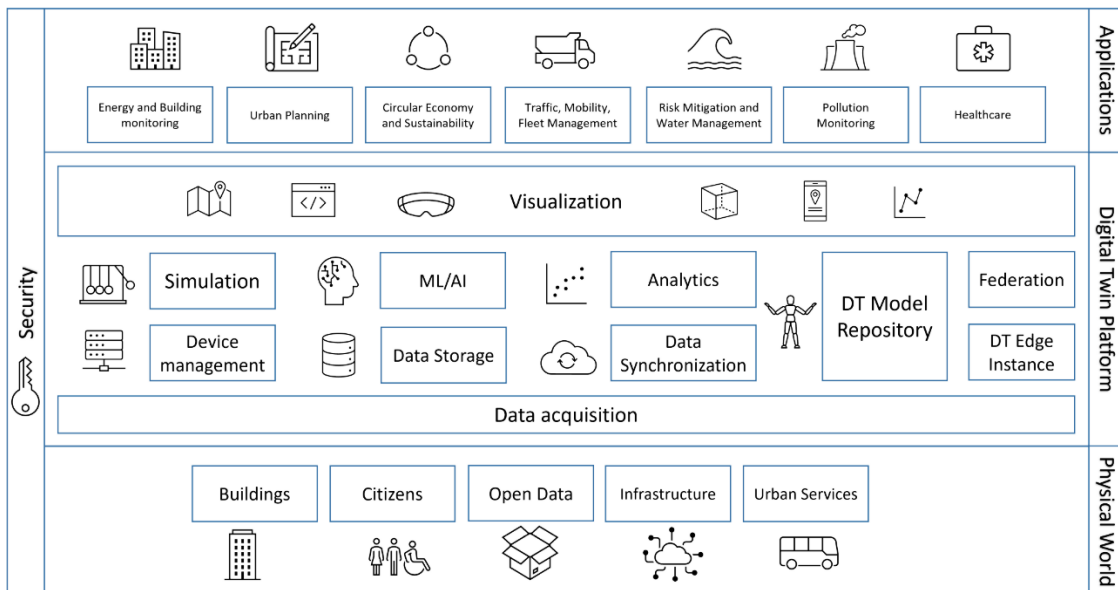


Figure 2.4 - Applications, structure et composantes du DT dans la ville intelligente (Mylonas et al., 2021).

Sans plonger dans l'ensemble des utilisations possibles dans la littérature, il est important de noter que des projets ont déjà été faits ou bien sont en cours d'applications dans certaines villes du monde : plus d'une quinzaine de projets y sont répertoriés, incluant Singapour, Antwerp et Helsinki. Certaines des fonctions déployées incluent l'efficacité énergétique, la gestion du trafic routier ou maritime, le suivi ou contrôle des paramètres ambiants comme la température et la qualité de l'air, et d'autres encore (Mylonas *et al.*, 2021). Ces applications se trouvent donc à la frontière entre ville et environnement, d'où la combinaison des deux catégories pour des fins d'analyse.

Tao *et al.* (2022) recensent l'existence de quatre articles ayant pour accent l'environnement, mais n'en font pas l'analyse approfondie et ne présentent pas les articles, tandis que Singh *et al.* (2022) n'en font pas état du tout. Toutefois, un cas détaillé et intéressant lié à la VI et à l'environnement est le DT proposé pour la maintenance et la gestion des milieux humides de la ville d'Auckland en Nouvelle-Zélande, permettant de suivre et contrôler les paramètres liés au niveau et à la qualité de l'eau entre autres (Aheleroff *et al.*, 2021). Une partie de l'interface du DT serait accessible au public pour des fins d'éducation sur la biodiversité et les milieux humides, une utilisation qui ailleurs répétée dans la littérature et sera présentée en sous-section suivante.

#### 2.2.1.5.2 Le DT en Éducation, Culture et Histoire

Un coup d'œil aux quelques articles détaillés par Singh *et al.* (2022) concernant l'éducation révèle que les DT développés n'étaient pas appliqués au système d'éducation en tant que tel, mais plutôt que le jumeau numérique d'une autre industrie pouvait être utilisé pour des objectifs éducatifs, que ce soit pour la formation et les tests d'opérations avec un navire (Ludvigsen, 2018), ou encore tester les effets de modifications à distance sur un système automatisé de production (Eriksson *et al.*, 2022). Il existe tout de même des DT qui ont réellement été appliqués au système scolaire, que ce soit pour le suivi de la présence des étudiants au cours ainsi que le stockage et la vérification du contenu des cours donnés (Razzaq *et al.*, 2022), ou bien le monitoring et l'ajustement de paramètres ambiants d'un pavillon universitaire afin d'améliorer le confort des étudiants (Zaballos *et al.*, 2020). Cette approche est présentée comme l'extension du concept des Villes Intelligentes (VI) à une échelle plus petite, et complète donc la sous-section précédente.

#### 2.2.1.5.3 Le DT dans la logistique, l'approvisionnement et le transport

Des utilisations variées de jumeaux numériques ont été répertoriées dans la littérature concernant la logistique, l'approvisionnement, et les transports. Par exemple, une proposition a été faite d'un DT pour la gestion d'un aéroport au Brésil (Oliveira, 2020) ; une autre publication concerne un système de gestion des grues d'un port maritime basé sur un jumeau numérique desdites grues, permettant d'optimiser leur utilisation et d'éviter des incidents (Zhou *et al.*, 2022). Singh *et al.* (2022) répertorient également un ensemble de publications axées sur la chaîne d'approvisionnement, quel que soit l'industrie, la plupart étant axées sur les avantages d'un DT pour la planification et l'optimisation de la chaîne d'approvisionnement. Ces publications ont sensiblement le même fonctionnement que les articles mentionnés ci-haut, mais avec pour objectif final un support au réseau de magasins de vente au détail. Ce secteur d'application semble néanmoins gagner en popularité, et s'intègre bien au concept de la Ville Intelligente.

#### 2.2.1.5.4 Le DT dans la vente au détail

Malgré le portrait qu'ils en font, il ne semble pas vraiment y avoir de présence de la vente au détail dans la littérature à l'exception de la présence mentionnée par Singh *et al.* (2022) et Tao *et al.* (2022), qui citent des publications liées aux vêtements dont l'accent est en réalité sur la logistique ou sur la reconstitution d'habits historiques. Les trois exceptions à cette règle sont un chapitre de livre inaccessible et concernant la modélisation des comportements de consommation grâce au DT, un bref article professionnel présentant les avantages potentiels du DT en commerce de détail, et le seul cas d'application démontrée d'un prototype de DT pour optimiser les opérations, l'expérience client, et la gestion des produits dans un commerce au détail (Maïzi et Bendavid, 2021).

#### 2.2.1.5.5 Le DT dans le secteur de la santé et des services sociaux.

Le DT dans le secteur de la santé semble se positionner de manière similaire dans les deux recensements identifiés, avec environ 4% des articles sur le *Digital Twin* appliqué au secteur de la santé (Singh *et al.*, 2022 ; Tao *et al.*, 2022). Cet intérêt pour la technologie spécifique du DT semble relativement récent, tout comme pour les autres types de services : dans les revues de littérature globales répertoriées dans les dernières années, le secteur de la santé était souvent soit absent (Jones *et al.*, 2020 ; Liu *et al.*, 2020a) ou encore à peine mentionné pour son potentiel et les opportunités qu'il représente, avec au plus un ou quelques article(s) mentionnés concernant la santé (Fuller *et*

*al.*, 2020 ; Semeraro *et al.*, 2021 ; Singh *et al.*, 2021 ; Tao *et al.*, 2019b). En 2022, la couverture du secteur est beaucoup plus large : des DT sont proposés pour l'activité physique et le bien-être, la détection et les pronostics de maladies et de problèmes de santé, le contrôle et l'optimisation de la chirurgie, la gestion d'établissements de soins de santé, la gestion et l'étude de la santé publique, ainsi que l'intégration et l'étude du cycle de vie complet de l'être humain (Alazab *et al.*, 2022 ; Botín-Sanabria *et al.*, 2022 ; Hassani *et al.*, 2022 ; Khan *et al.*, 2022 ; Patrone *et al.*, 2019 ; Singh *et al.*, 2022 ; Tao *et al.*, 2022). Ces enjeux sont centraux au contexte des CIUSSS et du réseau de la santé, et ainsi, une analyse approfondie du secteur est nécessaire. À cet égard, il est essentiel de déterminer une typologie et une classification du *Digital Twin* qui permettra de bien évaluer les différents modèles proposés et leur utilisation. Pour ce faire, la prochaine section s'attardera d'abord à déterminer la définition de base d'un jumeau numérique. Il s'agira ensuite d'identifier les caractéristiques d'un DT, les niveaux d'intégration correspondants, ses fonctions, et sa structure technologique et logique, pour s'atteler ensuite en sous-chapitre 2.3 à l'exploration et à la classification des usages du DT en santé numérique pour ensuite faire l'analyse détaillée des cas pratiques pertinents.

## 2.2.2 Caractérisation et classification des Digital Twin

À travers la littérature, ce qui est entendu par *Digital Twin* ne fait pas consensus, et de nombreux auteur·rice·s ont établi des prérequis de caractéristiques, déterminé des architectures conceptuelles, et généré des classifications en ce qui concerne le jumeau numérique. Les sections subséquentes présentent et expliquent donc les résultats sommaires issus de l'analyse et de la comparaison entre les contributions des différent·e·s chercheur·euse·s. Il est toutefois à noter qu'il y a une prédominance marquée des jumeaux numériques dans les secteurs industriels, et que cela s'affiche nettement dans le contenu et l'argumentaire des articles utilisés : les modèles proposés pourraient donc être biaisés vers ce secteur malgré un objectif de portée intersectorielle des auteur·rice·s.

### 2.2.2.1 Les caractéristiques et définitions du *Digital Twin*

De l'apparition du terme en 2010 jusqu'à 2019, VanDerHorn et Mahadevan (2021) ont répertorié 46 définitions différentes dans la littérature scientifique et professionnelle, et ce nombre aura certainement augmenté depuis. Malgré cette division de la littérature, il est essentiel de déterminer les caractéristiques de base du jumeau numérique et d'identifier une définition qui résume ces caractéristiques afin de pouvoir utiliser une base solide de comparaison et d'étude du DT pour la

suite de cette recherche. À cet effet, le Tableau 2.7 ci-dessous présente le tableau comparatif des caractéristiques répertoriées dans douze articles étant soit des revues de littérature ayant établi et détaillé les caractéristiques du DT dans leur analyse, soit des articles conceptuels dédiés aux caractéristiques spécifiques du *Digital Twin*. Trois composantes de modèles, soit la réalité physique, la copie virtuelle, et leur connexion via des données (Grievies, 2014) ne sont pas inclus dans ce tableau, étant universellement reconnues dans les articles répertoriés. Également, trois revues de littérature ayant fait une analyse systématique des caractéristiques du DT (Kuehner *et al.*, 2021 ; Semeraro *et al.*, 2021 ; Sharma *et al.*, 2022) ne sont pas incluses dans la matrice d'analyse pour éviter certains biais : 1- plusieurs des articles employés pour l'analyse qui suit y ont également été utilisés, ce qui signifierait qu'ils compteraient plus d'une fois; 2- puisqu'elles représentent de nombreux autres articles, elles ne pourraient pas avoir le même poids; 3- elles ont une perspective axée presque uniquement sur le secteur manufacturier, ce qui n'est pas forcément représentatif.

Tableau 2.7 - Matrice de sélection des caractéristiques pour la définition du jumeau numérique

Caractéristique du jumeau numérique	Articles												Caractéristique obligatoire?	
	Kritzinger et al. (2018)	Evans et al. (2019)	Adamenko et al. (2020)	Fuller et al. (2020)	Jones et al. (2020)	Mashaly (2021)	Qi et al. (2021)	Singh et al. (2021)	VanDerHorn et al. (2021)	Botin-Sanabria et al. (2022)	Fang et al. (2022)	Khan et al. (2022)	Oui	Non
	Prétraitement/ Traitement/ Fusion des données	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui	Oui	11
Fidélité très élevée (multifactorielles) du modèle virtuel et des données	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Option	Oui	Oui	10	1
Capture/ transmission continue, bidirectionnelle et automatisée des données	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Option	Oui	Oui	10	1
Simulations, tests d'hypothèses et optimisations	Oui	Oui	Oui		Oui		Oui		Oui		Oui	Oui	8	0
Détection et évaluation (ML/AI)		Oui	Oui		Oui	Oui	Oui		Oui		Oui	Oui	8	0
Sécurité accrue des données			Oui	Oui		Oui		Oui		Oui	Oui	Oui	7	0
Prédiction (ML/AI)		Oui	Oui			Oui	Oui		Oui		Oui	Oui	7	0
Autonomie de régulation de la réalité physique (actuateurs ou humains dans la boucle)	Oui	Oui	Oui		Oui		Oui	Oui	Oui				7	0
Plateforme centralisée et interopérable d'utilisation et de visualisation des données		Oui	Oui	Oui	Oui	Oui		Oui				Oui	7	0
Base de méga/métadonnées optimisée pour l'analytique		Oui	Oui			Oui	Oui	Oui			Oui	Oui	7	0
Connexion ultrarapide			Oui	Oui	Oui	Oui			Non	Oui	Oui	Oui	7	1
Données continues sur l'environnement du PT			Oui		Oui		Oui		Oui	Oui		Oui	6	0
Infrastructure TI ultra-performante				Oui	Oui	Oui		Oui	Non	Oui		Oui	6	1
Interface pour usagers facile d'accès, adapté et ajustable.			Oui				Oui			Oui	Oui	Oui	5	0
Adaptabilité du DT (modification aisée des paramètres)		Oui	Oui		Oui			Oui	Oui				5	0
Approche et modélisation standardisée				Oui			Oui	Oui				Oui	4	0
Contrôle et validation constante de la performance du DT				Oui			Oui		Oui			Oui	4	0
Un objet = un DT	Oui		Oui					Oui	Oui				4	0
Edge Computing										Oui	Oui	Oui	3	0

Les caractéristiques retenues par la majorité des articles et énumérées ci-haut ont été déterminées comme centrales, et leur intégration est présentée dans la liste ci-dessous. Les autres ont été pour l'instant classifiées comme optionnelles ou controversées.

- Le jumeau numérique est une représentation dynamique détaillée, en temps réel et avec un haut niveau de fiabilité, d'une réalité physique d'intérêt.
- Cette réalité physique inclut la ou les entités qui la constituent, l'environnement dans lequel la ou les entité(s) évolue(nt), et les relations entre entité(s) et environnement(s).
- La fiabilité, le dynamisme et la synchronicité en temps réel du jumeau numérique requièrent une infrastructure technologique permettant la capture et la transmission des données en continu, de manière sécurisée et automatisée, ainsi qu'à grande vitesse et à grand volume.
- L'infrastructure technologique du DT doit également supporter le stockage, le traitement, le partage et l'analyse complexe de mégadonnées provenant de plusieurs programmes, logiciels, et systèmes de communication différents.
- Les technologies modulaires du DT doivent permettre d'effectuer un ensemble de fonctions incluant minimalement l'observation, l'évaluation, la prédiction, ainsi que la simulation d'hypothèses et d'optimisations concernant l'état de l'entité ou du système physique jumelé.
- Finalement, le DT doit permettre d'effectuer une rétroaction sur l'entité ou le système représenté par l'utilisation d'un actuateur ou d'une communication directe aux parties prenantes des indications ou prescriptions spécifiques pour la régulation du modèle.

VanDerHorn et Mahadevan (2021) apportent toutefois un bémol intéressant concernant l'infrastructure ultraperformante, la connexion Internet ultrarapide, la bidirectionnalité automatisée et continue des données, ainsi que la fidélité très élevée du modèle et des données, indiquant que ces conditions sont trop restrictives et ne laissent pas la flexibilité d'adapter le DT aux besoins de son contexte d'application. Les articles étant majoritairement issus du secteur manufacturier, il n'est pas dit que toutes les caractéristiques s'appliquent également ailleurs, un élément important à prendre en compte dans la transposition vers le secteur de la santé et des services en général. Finalement, les caractéristiques retenues sont similaires à celles identifiées dans les revues de littérature dédiées à la caractérisation du DT (Kuehner *et al.*, 2021 ; Semeraro *et al.*, 2021 ; Sharma *et al.*, 2022), bien que plus détaillées. Sharma et al. (2022) ainsi que Kuehner et al. (2021) posent certaines fonctions ou services effectués par le DT comme étant optionnels, ce qui suit en quelque sorte la demande de flexibilité de VanDerHorn et Mahadevan (2021).

Intégrer tous ces éléments dans une seule définition du jumeau numérique pourrait rendre la définition trop complexe ou spécifique à un secteur : il faut donc déterminer une définition simplifiée qui regroupe bien l'ensemble des éléments répertoriés, et en particulier les éléments cœur du jumeau numérique. Une base plutôt robuste est celle offerte par la compagnie IBM : « A digital twin is a virtual representation of an object or system that spans its lifecycle, is updated from real-time data, and uses simulation, machine learning and reasoning to help decision-making » (IBM, s. d.). Les seuls éléments manquants sont donc l'aspect réglementaire de la réalité physique et l'interaction bidirectionnelle des DT (Kritzinger *et al.*, 2018), retenus comme des éléments de différenciation importants du jumeau numérique vis-à-vis d'autres technologies similaires. Avec quelques modifications à la définition d'IBM, incluant une ouverture sur les besoins contextuels en termes de services (Sharma *et al.*, 2022) et d'infrastructures (VanDerHorn et Mahadevan, 2021), la version complète et française est donc celle-ci :

« Un jumeau numérique est une représentation virtuelle autonome qui peut couvrir le cycle de vie d'un objet ou système, est synchronisée à partir de données captées, traitées et analysées en temps réel ou quasi réel, et permet d'utiliser l'analytique, la simulation ainsi que l'intelligence artificielle nécessaires pour l'aide à la décision et la régulation de l'entité physique représentée ».

Cette définition inclut l'ensemble des éléments couverts et permet la flexibilité et l'ajustement aux différents secteurs d'activités tout en demeurant assez contraignante pour différencier le jumeau numérique des autres technologies similaires. Plusieurs obligations sont en effet implicites, c'est-à-dire la capacité à intégrer la simulation, l'analytique de données, et l'intelligence artificielle. Cette définition servira donc de base à l'analyse effectuée dans ce mémoire, et éventuellement, au développement d'un prototype, bien qu'il soit fort probable que le prototype ne remplisse pas l'ensemble de ces caractéristiques au moment de sa démonstration, étant donné les capacités et données limitées de la Clinique évoquées dans la problématique de cette recherche.

#### 2.2.2.2 Classifications du *Digital Twin*

Les caractéristiques présentées précédemment, bien qu'elles semblent majoritairement reconnues au sein de la littérature, peuvent toutefois être couvertes par plusieurs classifications et nomenclatures différentes élaborées par les chercheurs et entreprises au cours des dernières



années. Le terme *Digital Twin* est ainsi associé à d'autres termes ou dénominations permettant de cibler son utilisation ou certaines de ses caractéristiques. Toutefois, beaucoup de ces nomenclatures se chevauchent ou même se répètent d'une formulation à l'autre : il est donc nécessaire de mieux classifier et de simplifier les différentes propositions et conceptualisations du *Digital Twin*.

Trois articles répertoriés ont effectué spécifiquement un survol de différentes classifications existantes dans d'autres revues de littératures et articles conceptuels du jumeau numérique à travers les secteurs. Les classifications existantes y sont regroupées en fonction de différents paramètres : le moment de création dans le cycle de vie, le niveau d'intégration, l'application ou la fonction spécifique, le niveau hiérarchique ou d'abstraction, et le niveau de maturité ou sophistication (Botín-Sanabria *et al.*, 2022 ; Newrzella *et al.*, 2021 ; Singh *et al.*, 2021). Toutefois, nombre de ces classifications et nomenclatures abordées sont redondantes ou trop spécifiques à un secteur, ce qui rend leur évaluation et leur comparaison plus difficile. Dans le respect du principe de parcimonie et afin de simplifier l'analyse du jumeau numérique en santé, il semble donc nécessaire d'étudier l'ensemble de ces modèles afin d'évaluer si une convergence vers un nombre plus faible de classifications est possible.

La majorité des classifications répertoriées sont couvertes par Newrzella et al. (2021) dans leur analyse des classifications répertoriées, à l'exception toutefois de la classification par niveau de maturité d'Evans et al. (2019), abordée dans la revue de littérature de Botín-Sanabria et al. (2022). Une analyse sommaire des définitions pour chaque concept a été effectuée, et les grandes divisions de classifications proposées par Newrzella et al. (2021) ont été comparées entre elles afin de déterminer si certaines seraient plus englobantes ou permettraient une meilleure différenciation. Le Tableau 2.8 ci-dessous présente la matrice de comparaison utilisée, et se lit comme suit : sur une case donnée  $(x, y)$ , si un modèle fait partie de la classe liée à sa ligne  $x$  implique par défaut la couverture de la classe reliée à sa même colonne  $y$ , alors la case est cochée et on considère que la classe en  $x$  couvre celle en  $y$ .



classification par étape du cycle de vie dont les classes sont entièrement orientées vers la production dans le secteur manufacturier : bien que d'autres entités et systèmes variés puissent passer par des étapes d'un ou plusieurs cycles de vie, celles-ci sont bien différentes du secteur manufacturier. Toutefois, un coup d'œil sur les classifications existantes par niveau hiérarchique révèle aussi que les modèles référencés sont aussi axés sur le système manufacturier : il s'agit donc de ramener le tout sur les divisions plus génériques que Newrzella et al. (2021) a répertoriées, avec quelques modifications. Le niveau informationnel est inclus dans tous les types de modèles, il n'est donc pas pertinent de l'utiliser pour classer des modèles de jumeaux numériques. En ce qui concerne les composantes, elles sont essentiellement des sous-divisions d'un objet, mais n'ont pas vraiment de caractéristiques propres qui les différencient des autres niveaux d'abstraction : ce sont des entités unitaires, mais de plus, elles ne peuvent pas vraiment être considérées seules. Le Tableau 2.9 présente un résumé de la classification hiérarchique ou par niveau d'abstraction retenue, ainsi que les éléments de différenciation entre les types de modèles qui en découlent.

Tableau 2.9 - Présentation des types de modèles et de leurs caractéristiques par niveau hiérarchique retenu

Niveau d'abstraction	Détail/contenu du modèle	Exemples
<b>Objet</b>	Le modèle est axé sur un objet indépendant, inerte ou vivant, avec ou sans composantes, donc le niveau unitaire.	Produit, machine, patient, client.
<b>Procédures</b>	Le modèle est axé sur une transformation ou interaction spécifique incluant un ou plusieurs intrants et ressources.	Assemblage, essayage, chirurgie, évaluation.
<b>Système</b>	Le modèle concerne un lieu défini comprenant plusieurs objets, procédures et processus avec une finalité ou fonction globale commune et coordonnée.	Usine (produire), hôpital (soigner), magasin (vendre).
<b>Système de systèmes</b>	Ce type de modèle a un focus au niveau macro sur la dynamique entre les unités, procédures et systèmes qui le composent et l'environnement qui les contient.	Réseau logistique, centre commercial, Ville, RSSS.
<b>Modèles multiniveaux</b>	Le modèle a pour focus plus d'un niveau hiérarchique avec le niveau de détail requis pour les niveaux concernés : un modèle de niveau hiérarchique élevé n'est pas nécessairement multiniveau.	Station spatiale : passagers, structure, systèmes, et extérieur.

La classification proposée permet de séparer clairement les types de modèles possibles selon leur niveau d'abstraction, et les exemples présentés semblent bien s'appliquer entre les différents secteurs. Les détails de modélisation, les paramètres et les variables ne sont que des exemples, mais beaucoup d'autres éléments peuvent être pertinents à modéliser : les besoins seront reliés au secteur d'application et au besoin du système à modéliser. Dans l'idéal, ce sont sans doute les modèles

multiniveaux qui ont le plus de potentiel, la séparation entre les niveaux d'abstraction n'étant pas absolue, et que chaque niveau pouvant profiter des informations plus précises d'un autre niveau.

En ce qui concerne la classification par niveau de maturité d'Evans et al. (2019), elle contient six niveaux plutôt flexibles qui s'appliquent à plusieurs dimensions puisqu'elle implique par défaut une gradation autant temporelle que de complexité, ce qui rend redondantes les classifications par niveau ou type de données, par niveau de sophistication et par étape du cycle de vie. Le Tableau 2.10 établit la couverture adaptée de la classification par niveau de maturité concernant les autres classifications :

Tableau 2.10 - Types de modèles par niveau de maturité avec caractéristiques et classes correspondantes

Degré de maturité	Détail/contenu du modèle	Fonctions additionnelles	Cycle de vie	Conception du DT	Complexité et type de données
0	Capture de données simples de représentation de l'objet ou système visé. Pertinent comme première ébauche.	Information	Ébauche	Capture de données physiques	Données simples, tests
1	Modèle simple d'intégration de données permettant la visualisation ou l'interprétation organisée des données.	Intégration, digitalisation, visualisation	Design	Intégration en modèle géométrique	Données structurées, historiques
2	Modèle virtuel permettant d'intégrer les métadonnées et ce qu'elles représentent, pour effectuer simulations et des tests de scénarios.	Simulation, émulation, scénarios	Intégration, conception, planification	Modélisation avancée, validation	Métadonnées historiques
3	Modèle d'intégration de données dynamiques en temps réel sur la réalité physique permettant la prédiction des états futurs et la réaction aux changements détectés.	Extraction, détection, évaluation, prédiction	Opérations, suivi et observation	Synchronisation en temps réel avec infrastructure IoT	Mégadonnées, données unidirectionnelles en temps réel
4	Intégration et communication bidirectionnelles des données permettant la régulation de la réalité physique via une action directe ou une rétroaction prescriptive actionnée par le modèle.	Synchronisation, régulation, coordination	Maintenance, régulation, optimisation	Intégration à la réalité physique, mécanisme de régulation	Bidirectionnelles, prescriptives, prédictives avancées
5	Modèle synchrone autonome dans ses décisions et régulations du système, optimisant sa performance et celle de la réalité physique avec peu ou pas d'interventions autres.	Optimisation, auto-évolution	Autonomie pure	Auto-évolution et autonomie du DT	Méta- et méga-données sur le DT lui-même et sa performance

Les éléments rapportés dans ce tableau sont des exemples et des approximations qui se veulent le plus juste possible, mais il est possible qu'un modèle puisse se retrouver quelque part à la frontière entre deux niveaux. Toutefois, un élément qui doit être éclairci est le niveau minimal requis pour être qualifié de jumeau numérique. À partir de la définition adoptée dans la sous-section précédente de ce chapitre, un modèle deviendrait un jumeau numérique mature au niveau quatre à cause de la nécessité d'échange bidirectionnel de données et de régulation du système.

Une caractéristique commune des deux classifications retenues est qu'elles ne sont ni statiques ni trop restrictives, les niveaux d'abstractions pouvant ou non être imbriqués les uns dans les autres, et le niveau de maturité pouvant quant à lui augmenter avec les améliorations faites au système. La complexité des données et des méthodes de capture peut jouer autant sur les niveaux d'abstraction que de maturité, ce qui permet en un sens de placer les modèles de jumeaux numériques sur un spectre d'évaluation et de continuité intéressant pour un concept en pleine croissance.

### 2.2.2.3 La structure conceptuelle et technologique du Digital Twin

À travers les différentes revues de littératures et les articles conceptuels répertoriés, plusieurs modèles conceptuels différents ont été utilisés pour présenter le jumeau numérique, souvent à l'aide de schémas conceptuels. Si dans certains cas le modèle est très restrictif et spécifique, incluant des technologies ou même des programmes clés, dans d'autres cas, le modèle est plus général et offre une variété de possibilités. Plusieurs modèles conceptuels ont été identifiés dans la littérature, chacun avec son lot de différences et de similarités, mais cinq structures semblent revenir à travers les modèles, sous différents noms : les entités physiques avec les capteurs rattachés, les données, les connexions ou communications, le modèle ou jumeau virtuel, et les applications ou services. La conceptualisation qui est de loin la plus complète et détaillée, et qui couvre dans les faits ces cinq structures identifiées, est celle de Qi et al. (2021), explicitant les caractéristiques de chaque structure majeure et détaillant les rôles et interactions de chacune d'entre elles. Il s'agit également d'une architecture dans laquelle on retrouve en version technologique tous les éléments de la définition adoptée du jumeau numérique; à cet effet, la section suivante présente brièvement les éléments principaux de ce modèle, qui servira également de base d'analyse pour les cas et cadres d'applications de jumeaux numériques dans le secteur de la santé.

#### 2.2.2.3.1 Le modèle retenu : les cinq dimensions de Qi et al. (2021)

La conceptualisation à cinq dimensions est applicable dans tous les secteurs et explicitée comme telle. Chacune des structures principales est essentielle au fonctionnement du DT dans sa globalité, et nécessaire à son existence et sa validité comme outil : la Figure 2.7, qui présente un aperçu en contexte manufacturier du modèle à cinq dimensions de Qi et al. (2021).

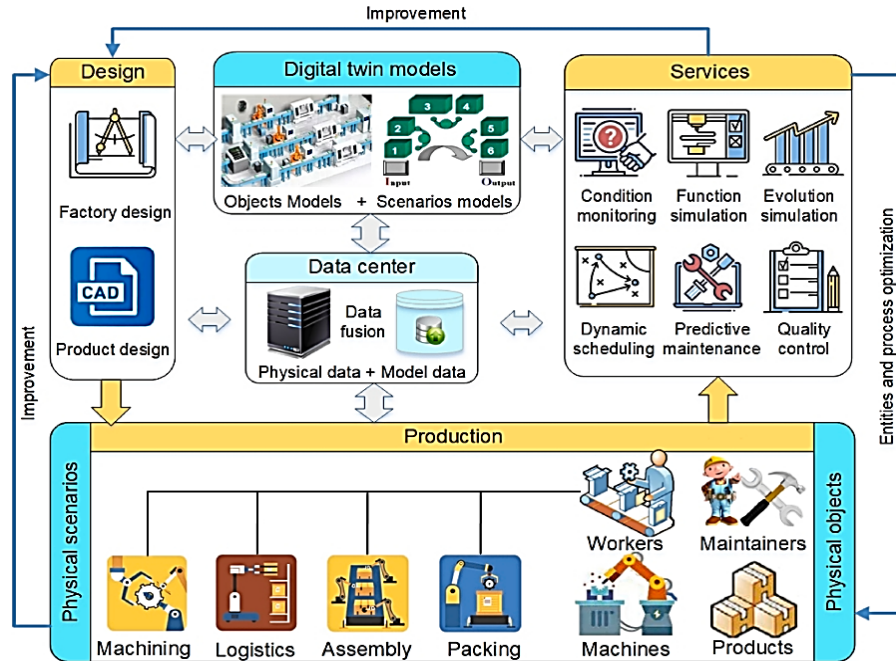


Figure 2.5 - Modèle conceptuel et technologique à 5 dimensions du Digital Twin (Qi et al., 2021)

La dimension physique dans le modèle à cinq dimensions consiste majoritairement en la réalité physique d'intérêt ainsi que les capteurs ou actuateurs nécessaires à l'échange bidirectionnel du jumeau numérique : on parle donc de l'infrastructure physique.

La dimension virtuelle du modèle à cinq dimensions se base sur quatre types de modélisations, présentées en ordre de complexité (Qi et al., 2021 ; Tao et al., 2022). La modélisation géométrique est liée à la forme et l'apparence des objets ou entités; la modélisation physique concerne les caractéristiques non visuelles de l'objet comme son organisation interne; la modélisation comportementale décrit les interactions de l'entité ou objet avec son environnement, d'autres entités, ou le temps et l'espace; et la modélisation régulatoire qui décrit les règles régissant les possibilités et limites de l'entité virtuelle en fonction de paramètres macros prédéfinis, et permet également la détection et la modification de règles et de comportements dans les données étudiées, ce qui permet l'altération du fonctionnement du modèle. En somme, un bon modèle virtuel permet de représenter et d'interpréter l'évolution de l'entité de manière fiable et continue.

La dimension des données du modèle de Qi et al. (2021) consiste principalement en la gestion et l'utilisation des données dans le jumeau numérique, qui sont cruciales à son bon fonctionnement : les données sont en effet la « matière première » du jumeau numérique. Au-delà de la simple

capture de données, le jumeau numérique doit également les transmettre et partager, les stocker, être un outil de traitement et de fusion ou réduction des données, et finalement, en faire la gestion et l'optimisation afin d'en permettre la visualisation et l'utilisation par les autres composantes du DT ainsi que les parties prenantes.

La dimension des connexions forme le lien entre les autres dimensions, les enjeux principaux qui y sont liés étant entre autres la rapidité, la sécurité, la fiabilité, et la compatibilité des connexions. Ainsi, une bonne connexion est essentielle à l'utilisation en temps réel des données; elle permet d'éviter les fuites, le vol ou l'altération de données sensibles; elle assure la communication de données variées entre différents types de logiciels et de programmes sans perte de contenu ou de qualité; et assure aussi que les données qui sont issues de la réalité physique ne se perdent pas dans la transmission. Les connexions sont donc une caractéristique centrale du DT, le DT étant d'abord et avant tout un outil de connectivité pour le monde réel.

Finalement, la cinquième et dernière dimension du modèle adopté inclut les services et fonctions performés par le DT. Qi et al. (2021) classent ces services en quatre grandes catégories : les services liés aux ressources, les services de liés aux données, les services d'applications ou fonctionnels, et les services de gestion de plateforme. La Figure 2.8 qui suit présente ces services.

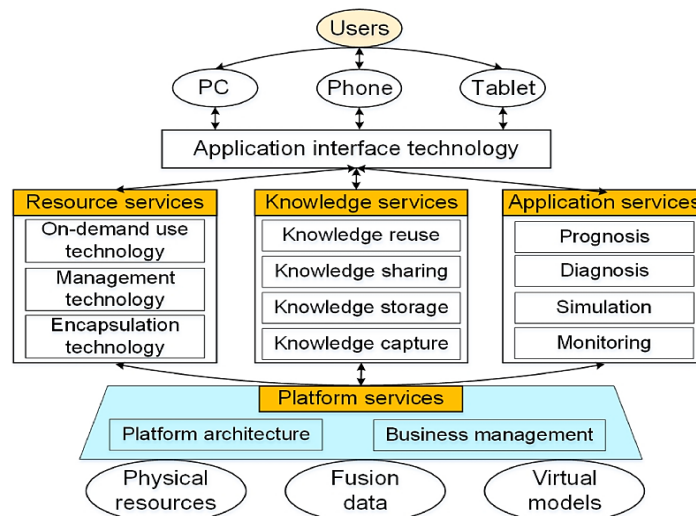


Figure 2.6 - Structure et offre des services de DT selon Qi et al. (2021).

Dans la dimension des services telle que présentée, les services liés aux ressources sont en quelque sorte les outils orientés vers l'interne : gestion des ressources humaines et matérielles, formation,

recherche, et aide à la décision. Les services liés aux données forment les services plus « invisibles » qui lient les autres services par une gestion centralisée des données. Les services d'application sont davantage fonctionnels, liés aux capacités du DT d'un point de vue technologique et interprétatif de la réalité. Finalement, les services de plateforme incluent la gestion de l'architecture du DT, de sa sécurité, ou d'autres formes de contrôle et manipulation du DT lui-même qui sont essentielles à son bon fonctionnement et à son évolution.

Toutes ces possibilités de services font du DT un outil de gestion et d'aide à la décision potentiellement très puissant, mais il est tout de même nécessaire de rester critique sur lesquels de ces services sont vraiment essentiels pour répondre aux besoins, puisque chaque service complexifie et alourdit la structure du jumeau numérique ainsi qu'augmenter les ressources nécessaires à son fonctionnement. En conservant la perspective ouverte sur les fonctions requises du jumeau numérique, il est donc possible que différents types et niveaux de fonctions et de services puissent être exécutés par le DT en fonction des besoins et des objectifs visés : un DT de niveau deux n'a pas les mêmes capacités de prédiction qu'un modèle de niveau trois ou quatre, mais peut tout de même tester des scénarios prévisionnels intéressants.

Une comparaison du modèle conceptuel présenté avec celui du Modèle de Référence Architectural pour l'Industrie 4.0, plus connu sous l'acronyme anglais RAMI4.0, ainsi qu'avec le modèle 5C (Lee *et al.*, 2015) décrivant l'architecture du CPS, permet de voir de nombreuses similarités. Néanmoins, chacun de ces modèles possède certaines caractéristiques distinctes : le modèle RAMI4.0 est très générique puisqu'il décrit simplement l'intégration des systèmes manufacturiers avec le numérique; le modèle CPS intègre de manière dynamique et bidirectionnelle le numérique et les systèmes physiques, mais ne contient pas de représentation virtuelle de l'entité physique, ce qui limite les possibilités de simulations et d'autonomie du modèle; et finalement, le jumeau numérique peut inclure les caractéristiques du CPS, mais inclut en plus et surtout un modèle virtuel complexe et autonome permettant des services variés et interactifs. Il est possible que le DT et le CPS soient en fait les deux côtés d'une même pièce de monnaie, quelques articles consultés semblant positionner le DT comme forme d'extension et d'intégration verticale améliorée du CPS (Negri *et al.*, 2017 ; Pivoto *et al.*, 2021 ; Tao *et al.*, 2019a). À cet effet, quelques articles référencés dans la revue de littérature en santé qui suit peuvent des modèles de DT proposés comme extension d'un CPS, mais pas aux articles n'abordant que le CPS.



### 2.3 Revue de littérature et typologie du jumeau numérique en santé

Plusieurs revues de littérature intersectorielles sur le jumeau numérique ont été répertoriées qui traitaient de la santé, mais de manière généralement superficielle ou simplement limitée par le nombre d'articles disponibles sur le sujet (Botín-Sanabria *et al.*, 2022 ; Fuller *et al.*, 2020 ; Newrzella *et al.*, 2021 ; Rathore *et al.*, 2021 ; Semeraro *et al.*, 2021 ; Singh *et al.*, 2021, 2022 ; Tao *et al.*, 2019b, 2022). Les applications répertoriées pouvaient autant couvrir la santé personnalisée, la gestion des systèmes de soin, ou la santé publique, avec un nombre de cas limités, et l'utilisation du jumeau numérique en santé n'était généralement pas l'objectif principal, bien que les secteurs manufacturiers aient en revanche été bien couverts par ces mêmes articles. Mylonas *et al.* (2021) ont survolé quelques applications dans la santé, mais ont surtout traité la santé d'un point de vue systémique sous l'angle de la Ville Intelligente, tandis que d'autres revues récentes ont ignoré complètement les articles en santé malgré la prétention d'une couverture systématique et intersectorielle (Fang *et al.*, 2022 ; Sharma *et al.*, 2022).

Toutefois, d'autres revues de littérature ayant abordé spécifiquement la santé ont permis une meilleure perspective sur le secteur, illustrant qu'il était sans doute plus actif que ne l'auraient laissé penser les articles à portée plus générale, même si le DT n'y était pas arrivé à maturité. Certaines revues de littérature avaient une portée très spécifique, qu'elles soient axées sur le système cardiovasculaire (Coorey *et al.*, 2022 ; Corral-Acero *et al.*, 2020), sur le ou la patient·e en soins intensifs (Chase *et al.*, 2021), sur l'activité physique et la réhabilitation (Gámez Díaz *et al.*, 2020a) ou sur la gestion des soins de santé (Patrone *et al.*, 2019). Ces articles, sans présenter systématiquement des jumeaux numériques en tant que tels, permettaient de construire une vision nette du secteur et d'idéaliser le jumeau numérique en fonction des directions prises dans la littérature. D'autres revues de littérature plus génériques dans le secteur de la santé ont elles aussi illustré une direction dans la recherche scientifique en répertoriant les différents modèles proposés en santé de façon globale (Ahmadi-Assalemi *et al.*, 2020 ; Alazab *et al.*, 2022 ; Khan *et al.*, 2022). Finalement, d'autres revues ont permis d'établir des divisions d'applications en santé, qui ont apporté des perspectives plus riches sur la manière dont le secteur s'est développé. Erol *et al.* (2020) ont traité des avancées vers le DT en santé en détaillant séparément les patient·e·s virtuel·le·s, la gestion d'hôpital, l'industrie pharmaceutique, et les capteurs portatifs pour la santé personnalisée. Yang *et al.* (2021) ont pour leur part séparé les applications en gestion de la santé urbaine, incluant

la gestion des hôpitaux, ainsi que la santé personnalisée et la médecine de précision. Ferdousi et al. (2022) ont proposé une division des DT incluant la santé personnelle, la gestion de système de soin, la santé des organes, et le système cardiovasculaire. Finalement, Hassani et al. (2022) ont posé les bases d'un modèle de DT pour le cycle de vie humain entier, allant même d'avant la naissance de l'enfant par la modélisation intra-utérine jusqu'à après la mort, par une gestion de la personne numérique décédée. Pour l'analyse et la typologie proposée dans ce mémoire, certaines divisions proposées ont été combinées, comme le ou la patient·e numérique, la santé personnalisée, les jumeaux numériques d'organes, ou les jumeaux numériques humains, dans la mesure où ces divisions ont toutes en commun un accent sur la personnalisation de la santé pour les individu·e·s, que ce soit pour des opérations, des conseils, ou le choix de traitements et d'activités. En contrepartie, certaines divisions n'ont pas été retenues, dans la mesure où l'industrie pharmaceutique couverte par Erol et al. (2020) vise davantage la production de médicament ou le design chimique de ceux-ci, ce qui n'intervient pas directement auprès du ou de la patient·e.

Comme mentionné précédemment, il n'est pas forcément aisé, ni même possible, de séparer dans l'absolu les utilisations du DT par application en santé, et la raison en est fort simple : l'objectif final semble être l'intégration complète de ces différentes applications pour une gestion globale de la santé humaine via son jumeau numérique. Ainsi, les utilisations précises de certains DT sont complémentaires à d'autres utilisations proposées, chaque modèle permettant d'assembler une partie du casse-tête. À ce sujet, la section qui suit présente les caractéristiques clés retenues pour classer et analyser les articles sur le jumeau numérique en santé afin de les regrouper par sous-classes d'utilisation, qui faciliteront l'analyse et l'établissement d'une typologie. Suivront ensuite les analyses par classe et sous-classe afin d'extraire les caractéristiques globales de chaque type, pour terminer ce sous-chapitre par la présentation du système de classification et de la typologie des jumeaux numériques en santé.

### 2.3.1 Classification des DT par niveau d'abstraction et utilisation

Cette section explique brièvement les divisions répertoriées et utilisées dans l'analyse et la comparaison des modèles afin d'établir une typologie à la toute fin du processus d'analyse. La classification par niveau d'abstraction en santé sert de classification primaire, c'est-à-dire qu'elle permet de séparer les modèles ayant des différences plus fondamentales liées à l'échelle d'étude. En contrepartie, l'utilisation ou l'objectif visé des cas de DT répertoriés sert ensuite de

classification secondaire, permettant de regrouper ensemble les modèles ayant des similarités importantes en termes de structure et de focus.

Au sein de chaque niveau d'abstraction utilisé pour classer les DT en santé, certaines utilisations spécifiques ont en effet semblé se recouper par des caractéristiques propres qui provenaient généralement des objectifs à la source des modèles proposés. À cet effet, le tableau 2.11 présente les catégories principales d'utilisation en santé en fonction des objectifs des modèles proposés, divisés par niveau d'abstraction correspondant. La typologie détaillée sera explicitée plus tard en section 2.3.6, soit après que les caractéristiques de chaque sous-classe ait été abordées.

Tableau 2.11 - Justification de classification par objectifs des modèles de DT en santé

Niveau d'abstraction	Utilisation	Justification/ Objectif des modèles
Santé personnalisée : (n = 60)	Physiologie et planification d'intervention (n = 13)	Modélisation d'une composante et de l'effet d'interventions externes sur cette composante et l'individu.
	Diagnostic et progression des anomalies/maladies (n = 20)	Modélisation et analyse des données pour les diagnostics et pronostics d'une problématique de santé spécifique.
	Régulation des activités de santé personnelle (n = 16)	Modélisation et évaluation de l'individu pour la performance et les risques liés à une activité particulière.
	Intégration globale de la santé (n = 9)	Modélisation de l'humain pour l'intégration de sa santé à travers les changements et le temps.
	Autres utilisations non qualifiées (n = 2)	Le focus et le détail des modèles est la sécurité des données plus que l'application.
Procédures de soins de santé : (n = 6)	Procédures de diagnostic et évaluation (n = 2)	Modélisation du processus d'évaluation ou de diagnostic d'anomalies et de maladies.
	Régulation des interventions (n = 4)	Modélisation de la structure opérationnelle et des impacts d'une intervention de santé.
Système de soins de santé : (n = 19)	Gestion de l'espace et des ressources matérielles (n = 3)	Modélisation de l'espace et des ressources matérielles appliquées, modèles plus génériques.
	Gestion et allocation des ressources médicales (n = 7)	Modélisation du système de ressources médicales pour leur contrôle et régulation en fonction des besoins.
	Intégration du parcours clinique (n = 9)	Modélisation du parcours clinique, opérationnel et/ou expérientiel vécu par les usagers.
Santé publique : (n = 7)	Planification de contingence (n = 2)	Modélisation de cas de crises ou de risques majeurs et préparation et tests de plans de réaction.
	Partage et gestion des ressources médicales (n = 2)	Coordination des ressources médicales au sein du système de systèmes en fonction des besoins macrosystémiques.
	Régulation des activités individuelles et des risques (n = 3)	Suivi et régulation des activités des individus en relation avec des facteurs de risque ou des changements macrosystémiques.

La classification proposée ne s'applique qu'aux propositions de DT répertoriées en santé, mais permet néanmoins d'identifier quelles activités principales semblent être d'intérêt dans le secteur pour chaque niveau d'abstraction. Dans le cas de la présente recherche, le point d'intérêt principal se trouve dans le niveau d'abstraction de la gestion des systèmes, puisque les besoins des CIUSSS sont surtout axés sur la gestion et l'intégration des usagers, des ressources du système et de

leurs informations au sein du RSSSQ. En revanche, la création d'un jumeau numérique de l'individu dépasse les frontières du système du RSSSQ, et il en va de même pour l'intégration globale de la santé publique, même si le partage vers et depuis ces deux niveaux d'abstraction serait de toute évidence très bénéfique pour la gestion de système, que ce soit pour faciliter la personnalisation des soins ou l'étude d'impact des changements systémiques sur les soins de santé. En ce qui concerne le niveau des procédés et processus d'intervention, il est pertinent pour la gestion opérationnelle, mais les procédés eux-mêmes et leur modification sont davantage des enjeux liés à la recherche et aux spécialistes médicaux qu'un enjeu de gestion d'établissement ou de réseau. À cet effet, les utilisations dans le secteur de la santé seront abordées dans les prochaines sections selon le niveau d'abstraction, soit les DT pour la santé personnalisée, les DT de procédés de soin et d'intervention, les DT de systèmes de soins, et les DT de santé publique. Une analyse sommaire des modèles axés sur les niveaux d'abstraction non centraux au présent mémoire sera faite, tandis qu'une analyse détaillée et critique sera effectuée pour le niveau d'abstraction de la gestion des systèmes, puisqu'il s'agit de l'objectif principal de la présente recherche et que cela sera particulièrement utile pour la conception du prototype pour la Clinique Relais.

### 2.3.2 Analyse des DT pour la santé et les soins personnalisés

La section qui suit recense tous les articles trouvés qui ne concernent que des modèles de DT axés sur la santé personnalisée, c'est-à-dire des modèles de jumeaux numériques axés sur la personne et sa santé, mais dont l'accent sur l'environnement est limité ou secondaire au modèle. Il est possible que les articles répertoriés n'emploient pas la même nomenclature ou dénomination d'utilisation que celle proposée ici : il n'en demeure pas moins que les caractéristiques des modèles de DT proposés sont cohérentes avec un accent sur la santé individuelle.

Toutefois, au sein même des modèles axés sur la santé individuelle, on retrouve différents sous-secteurs : l'exercice physique, l'alimentation, la médication, l'ergonomie, la modélisation générique des organes ou systèmes physiologiques, la détection d'anomalies et la planification d'interventions, et finalement la représentation de la santé dite « globale ». On trouve également différents niveaux d'abstraction en termes de représentation et de modélisation : on remarque un choix de modélisation allant des cellules individuelles allant jusqu'à l'humain dans sa globalité, en passant par les organes, les systèmes physiologiques, et l'intégration de différentes facettes telles que la santé mentale et les interactions sociales. La présente section effectuera un survol des articles,

des cas d'application, et des brevets axés sur la santé personnalisée, en les divisant par objectif final des modèles proposés : l'intervention et le traitement des patient·e·s, la détection et la prédiction des anomalies et des maladies, la régulation de la santé personnelle, l'intégration globale de la santé, et les utilisations autres et variées. Une analyse simplifiée est faite concernant le niveau de développement estimé des modèles ainsi que des raisons derrière ces estimations, en se basant sur la matrice constituée à la suite de la lecture des articles de cas, visible en ANNEXE A.

### 2.3.2.1 Modélisation physiologique pour la planification d'intervention

La première sous-division proposée pour les DT en soins de santé personnalisés correspond aux cas et propositions axés sur la modélisation d'un organe ou d'un systèmes physiologique prédéterminé afin de planifier des interventions médicales spécifiques. Dans ces propositions, la modélisation du ou de la patient·e ou d'un de ses organes/systèmes, concerne donc davantage le traitement à effectuer et ses conséquences que l'étude ou la représentation du ou de la patient·e : la modélisation par différents procédés se trouve donc au cœur de ces cas.

Par exemple, Aubert et al. (2021) proposent un modèle de DT d'optimisation de chirurgie du tibia. Le modèle intègre des données issues d'imagerie en 3D à Rayons-X pour obtenir un modèle représentatif et ainsi optimiser le rétablissement et la guérison par des simulations de traitements. Toutefois, le modèle proposé n'intègre pas de données en temps réelles ni de rétroaction claire, utilisant des données statiques et intégrées manuellement : il s'agit donc plutôt d'un modèle numérique de niveau 2 de maturité. Dans la même optique, Bjelland et al. (2022) font la proposition d'un modèle de DT permettant la simulation d'interventions chirurgicales sur le genou, à partir de données médicales variées et issues du ou de la patient·e ainsi que de la population de patient·e·s précédent·e·s avec des problèmes semblables. Malgré l'usage du terme « Digital Twin », le modèle proposé n'intègre également pas de données en temps réel, mais propose plutôt une simulation exécutée à l'instant du besoin; ce que les auteur·rice·s exploitent comme étant le « temps réel », afin d'émettre des propositions spécifiques issues de la simulation. Le modèle n'en demeure pas moins un modèle numérique de maturité 2, étant donné l'absence de données en temps réel ou quasi réel et l'usage de données statiques. De nombreux autres articles similaires ont été répertoriés pour lesquels le modèle proposé visait avant tout à modéliser le fonctionnement d'un système physiologique ou d'un organe de corps humain, le tout afin d'en étudier le fonctionnement et d'effectuer des tests d'intervention. Le modèle proposé par le Swedish Digital Twin Consortium

(Björnsson *et al.*, 2020) vise la multiplication d'un modèle numérique humain afin de tester de multiples médicaments en même temps ainsi que leur réaction attendue sur le corps. Corral-Acero *et al.* (2020) ont procédé à une revue détaillée de la littérature précurseure d'un DT du système cardiovasculaire pour ensuite proposer un modèle de cœur qui puisse représenter le plus fidèlement possible son fonctionnement et ainsi faire des tests d'intervention. Fernández-Álvarez *et al.* (2022) ont proposé un modèle de simulation physiologique de l'épaule pour l'optimisation d'opérations chirurgicales. Hirschvogel *et al.* (2019) proposent un modèle de simulation d'intervention chirurgicale et de conséquences attendues sur le système cardiaque. Laubenbacher *et al.* (2022) ont proposé un modèle de simulation avancée du système immunitaire afin d'établir des trajectoires de thérapies, tandis que Li *et al.* (2022) ont proposé un modèle computationnel axé sur la modélisation de traitements ciblés de maladies au niveau cellulaire et génétique. Rahman *et al.* (2022) ont effectué un travail similaire axé sur la modélisation des mécanismes d'actions de médicaments sur le corps humain afin d'effectuer des prédictions sans expérimentations. Subramanian (2020) propose un modèle de modélisation avancée du foie afin d'étudier des traitements et différentes médications pour le traitement de maladies hépatiques. Tardini *et al.* (2022) ont proposé un modèle en deux parties permettant dans un premier temps de déterminer les meilleurs parcours de traitement de cancer en fonction des caractéristiques des patient·e·s, et dans un deuxième temps d'émettre des prédictions sur la progression prévue du ou de la patient·e avec le parcours de traitement choisi. Finalement, Xing *et al.* (2022) ont proposé un ensemble d'algorithmes permettant la modélisation avancée de la vitesse myocardique, un phénomène utilisé dans l'analyse de problèmes cardiaques et permettant de simuler de manière réaliste des scénarios y étant liés.

Un modèle parmi tous ceux répertoriés dans cette catégorie est intéressant pour le cas spécifique de la Clinique Relais : l'étude de cas de Bahrami *et al.* (2022) concernant le traitement de la douleur par l'utilisation de timbres transdermiques de fentanyl. Plus spécifiquement, les auteur·rice·s proposent un modèle de jumeau du corps humain pour représenter la métabolisation du fentanyl afin de déterminer la fréquence de changement de timbre en fonction des caractéristiques du ou de la patient·e. Toutefois, le modèle se trouve être une modélisation mathématique permettant une forme de simulation de la réaction du corps. Cette simulation n'est en revanche pas connectée sur des données en temps réel, bien qu'il semblerait que le modèle puisse prendre en charge une mise à jour quotidienne des données sur la douleur ressentie par le ou la patient·e. Le modèle n'en reste pas moins un modèle de niveau deux, cette alimentation en données n'étant pas continue.

Ces propositions partagent toutes des caractéristiques similaires : elles ne permettent pas l'intégration de données en temps réel issue d'un DT existant, mais permettent plutôt de simuler ou représenter une réalité physiologique générique, cette modélisation étant ensuite utilisée avec certaines données spécifiques pour tester des scénarios. N'étant pas synchrones avec une entité physique réelle spécifique, ces modèles se classent tous comme des modèles de niveau de maturité 2. Un regard sur ces cas d'applications démontre donc que le DT en est encore à ses débuts en ce qui concerne la planification des traitements et interventions : le terme « jumeau » réfère plus à la fiabilité et complexité de la représentation qu'au dynamisme et à la synchronisation des modèles proposés. En soi, le problème vient probablement du fait que le suivi ou « monitoring » du ou de la patient·e n'est pas un objectif des modèles, alors qu'il s'agit de l'aspect qui requiert le plus l'utilisation de données en temps réel ou quasi réel, qui permettrait d'atteindre au moins une intégration de maturité de niveau trois.

#### 2.3.2.2 Modèles de détection et de prédiction des anomalies et maladies

La deuxième sous-division d'application concerne des modèles axés davantage sur la détection et le suivi d'anomalies ou de maladies chez les patient·e·s. Dans ces cas, l'accent des modèles est donc sur l'étude et la représentation de l'état du ou de la patient·e, mais avec un accent sur les irrégularités : les patient·e·s concerné·e·s ont généralement déjà été identifié·e·s comme étant à risque, malades, ou bien ont directement demandé un diagnostic spécifique. Les modèles proposés dans cette sous-division des articles tendent à se diviser en deux niveaux d'intégration : les modèles « vides » permettant de traiter et intégrer les données fournies, mais n'étant pas connectés directement aux patient·e·s, et les modèles alimentés en continu par des données réelles, permettant de suivre l'état des patient·e·s et de détecter de nouvelles anomalies.

Le modèle de Barbiero et al. (2021) est un exemple de modèle « vide » qui vise l'intégration et la modélisation mathématique de données allant du niveau biochimique et génétique jusqu'aux organes et systèmes afin d'étudier la réponse inflammatoire prévue du ou de la patient·e. L'article illustre la performance des modèles d'IA utilisés pour représenter les différentes interactions dans le corps humain afin de détecter des anomalies et d'effectuer des prédictions, mais aucune donnée en temps réel n'est utilisée, les données étant statiques et leur collecte n'étant pas abordée. Lal et al. (2020) s'intéressent également à la réponse inflammatoire globale du corps face à une infection,

leur modèle étant plutôt un modèle complexe de simulation, mais présentant la même absence d'intégration de données réelles en continu.

L'identification de cancers et de tumeurs est une utilisation assez présente dans les modèles de DT sans connexion réelle, les modèles ne permettant pas vraiment de « représenter » l'état des patient·e·s, mais plutôt de détecter des anomalies avec l'aide de l'IA ou d'apprentissage machine. Par exemple, le modèle de Batch et al. (2022) est basé sur un modèle d'apprentissage profond permettant la détection de métastases à partir de données historiques. Jamshidi et al. (2022) proposent un algorithme d'intégration de données de patient·e·s ayant un cancer afin de déterminer les traitements potentiels et appropriés selon les données obtenues. Mourtzis et al. (2021) proposent un modèle pour le diagnostic de cancer à partir de données d'imagerie médicale et d'autres données variées. On retrouve le même type de modèle pour l'identification de risques de cancers du foie via des algorithmes d'IA dans le modèle de Rao et Mane (2019), tandis que Wan et al. (2021) ont proposé pour leur part un modèle de représentation et d'identification des tumeurs du cerveau à partir d'imagerie par résonance magnétique (IRM). Le modèle proposé Ahmed et al. (2022) vise surtout pour sa part à intégrer et traiter les données issues d'imagerie médicale pour les patient·e·s, mais aussi de traiter les données liées à l'usage et la maintenance des machines d'imagerie afin d'en surveiller l'état; les détails fournis sont toutefois limités dans les deux cas. Finalement, le modèle de Wickramasinghe et al. (2022) propose l'intégration ponctuelle de données variées sur le ou la patient·e afin de planifier un traitement spécifique approprié pour le cancer ciblé. Ce dernier modèle se démarque des précédents par une proposition d'architecture qui pourrait facilement intégrer des données en continu et donne aux médecins l'accès à des données et diagnostics médicaux plus complexes. Néanmoins, les autres modèles ainsi que celui-ci ne dépassent pas le niveau de maturité 2 étant donné l'absence d'alimentation de données en continu. Il s'agit plutôt de modèles d'IA sans réelle qualité de « jumeau » dans la mesure où il n'y a pas de représentation active de la réalité physique, avec en contrepartie une capacité à traiter les données pertinentes de manière détaillée et potentiellement intéressante pour un DT complet.

En contrepartie, d'autres modèles intègrent le suivi des patient·e·s en continu, en temps réel ou quasi réel, afin de permettre une forme de réactivité aux anomalies ou symptômes de maladies détectés. Chakshu et al. (2019, 2021) ont d'abord procédé à la modélisation de la carotide afin d'y détecter des sténoses (blocages) via un système d'analytique d'images vidéo en temps réel qui



évalue les vibrations, puis dans un deuxième modèle proposé plus tard ont par la suite effectué la modélisation des artères afin de détecter des anévrismes via l'utilisation d'IA pour l'analyse des longueurs d'ondes et de la pression dans les artères, et en ont fait une démonstration pour l'aorte abdominale. Dans la même veine, Elayan et al. (2021) ainsi que Bende et Gochhait (2020) ont proposé et démontré en partie des modèles d'intégration des données du ou de la patient·e qui permette aux ressources médicales d'avoir accès aux diagnostics et informations concernant des anomalies cardiaques. Chakshu et Nithiarasu (2022) ont présenté un cas d'application avec des objectifs similaires, leur modèle permettant d'identifier et prioriser en continu, chez les patient·e·s ayant une pneumonie, celles et ceux pour lequel·le·s le risque est le plus élevé et nécessitant le support le plus urgent, puis de déterminer lorsque ce support urgent n'est plus essentiel. La manière de capturer les données en continu n'est pas détaillée, mais les auteur·rice·s mentionnent que leur modèle serait adaptable en fonction de la disponibilité ou non d'une infrastructure IoT. D'autres modèles de mêmes niveaux existent avec des portées et objectifs différents. Le projet collaboratif de DigiPredict (Geneux, 2020) utilise la technologie des organes sur puces pour modéliser, suivre et prédire le comportement réel de différents organes avec un objectif de temps réel. Le système de DELL Technologies (s. d.) vise à intégrer et modéliser à un niveau global, par exemple mondial, les données de patient·e·s ayant des caractéristiques similaires afin d'obtenir des propositions de traitements ajustées aux patient·e·s qui soient rendues disponibles aux ressources médicales. Finalement, le modèle de Subramanian et al. (2022) vise la reconnaissance et la représentation des émotions en temps réel pour supporter un jumeau numérique de détection de douleur et de maladie utilisé par le ou la médecin, qui peut ensuite effectuer en autonomie des simulations sur le jumeau numérique des patient·e·s et choisir le traitement approprié. Ferdousi et al. (2021) ont proposé un modèle axé également sur la dimension plus affective en proposant un modèle de détection et de représentation du stress en fonction d'informations qualitatives et physiologiques. Tous ces modèles partagent la caractéristique d'offrir le suivi des patient·e·s à l'aide de données en continu, mais ne permettent pas de rétroaction directe ou du moins directive et active sur le ou la patient·e ou auprès des ressources médicales. Un niveau 3 de maturité apparaît donc comme caractéristique lorsque l'enjeu du suivi des patient·e·s survient dans les modèles, mais qu'aucune régulation directe n'est visée.

Deux modèles semblent se distinguer comme étant cohérents avec les caractéristiques complètes d'un DT, c'est-à-dire un niveau 4. Le premier est une proposition de modèle pour le suivi, le

diagnostic, et le traitement de la sclérose en plaques chez les patient·e·s (Voigt *et al.*, 2021), et favorise autant l'intégration de données saisies manuellement par les patient·e·s qu'automatiquement par des capteurs. Une proposition similaire de la compagnie Empa (Six, 2021) vise l'intégration de données saisies manuellement et automatiquement concernant les signes vitaux, la maladie et la douleur vécue par les patient·e·s afin d'ajuster les traitements et thérapies au fil du temps. Dans les deux cas, la rétroaction est surtout informative mais directe via un tableau de bord, et on peut donc parler d'un DT avec un niveau de maturité estimé à 4, surtout considérant que des rétroactions autonomes seraient particulièrement difficiles ou risquées dans ce contexte.

En somme, les modèles semblent osciller pour la plupart autour de niveaux de maturité situés entre 2 et 3, mais il est à remarquer que les modèles les plus ambitieux sont aussi ceux pour lesquels aucune démonstration pratique n'a été faite, même partiellement.

#### 2.3.2.3 Modèles de régulation des activités liées à la santé personnelle

Les modèles présentés dans cette sous-division concernent la régulation des activités auxquelles les personnes concernées s'engagent au cours de leur vie quotidienne : l'alimentation, l'activité physique, et l'ergonomie sont les principaux sous-secteurs concernés. Il ne s'agit donc pas nécessairement de patient·e·s à proprement parler, mais tout de même de santé personnalisée, dans la mesure où la régulation de ces activités vise à améliorer ou conserver l'état de santé des utilisateur·rice·s. La plupart de ces modèles, étant donné l'objectif de suivi et de régulation des activités, acquièrent par défaut un niveau de maturité de 4, puisque le suivi implique des données en continu et la régulation implique forcément une forme de rétroaction.

Par exemple, Landolfi *et al.* (2018) ont été précurseurs en termes de maturité du modèle proposé, leur modèle s'intégrant bien à l'idée du DT comme service après-vente, mais dont l'optique est également le soutien à la santé et à l'ergonomie. Le modèle, non démontré en application, intègre l'usage d'IoT et d'IA ou d'apprentissage machine dans les pièces d'un dispositif d'aide au déplacement, par exemple une chaise roulante, ce qui permet d'alerter l'utilisateur·rice à propos de risques liés à sa posture en cas de pressions hors-normes, mais aussi de potentiels bris de pièces. En complément, le modèle proposé inclut aussi un module de précommande de pièces en cas de bris actuel ou prévu du dispositif d'aide. L'usage d'IA et d'IoT associé à un modèle interactif et permettant la rétroaction indique un modèle de maturité estimée niveau 4, qui est cohérent avec le

besoin de suivre et réguler un besoin quotidien. Mohapatra et Bose (2020) ont proposé un modèle semblable pour la capture et l'analyse de données en temps réel concernant la posture lors du travail sédentaire, par exemple sur une chaise de bureau, afin d'alerter l'utilisateur·rice et de lui proposer des améliorations de posture. Ogunseiju et al. (2021) ont proposé et testé en partie un modèle associé à la réalité virtuelle permettant d'alerter en temps réel les travailleur·euse·s lorsque leur posture au cours de travail actif présente des risques musculosquelettiques. Avec un but similaire, He et al. (2021) ont proposé un modèle de réalité virtuelle permettant d'intégrer des données liées à la posture afin de réduire le stress imposé sur les vertèbres lombaires en temps réel, tandis que d'autres auteur·rice·s ont plutôt misé sur la modélisation de prothèses de vétérans afin d'ajuster les prothèses et d'étudier les pressions exercées sur les membres amputés en temps réel (Frossard *et al.*, 2019, 2022 ; Saxby *et al.*, 2022).

Dans un axe différent, Gkouskou et al, (2020) ont fait une proposition théorique générale pour l'intégration de données variées afin d'améliorer la précision des recommandations liées à la nutrition, tout comme le OnePlanet Research Center (s. d.) qui propose le modèle d'un « Human Digital Twin » permettant l'intégration de données issues de capteurs et systèmes intelligents pour un DT axé sur la nutrition et le système digestif d'une personne afin d'émettre des suggestions. Finalement, la proposition de Ross (2016) est un modèle à la limite simpliste qui semble néanmoins être une des propositions théoriques précurseurs en activité physique, explorant le potentiel de la réalité virtuelle pour la performance lors d'activité physique ou d'achats au détail.

Plusieurs propositions de modèles ont été faites par la suite afin de réguler l'activité physique, bien que plusieurs de ces modèles fassent généralement une démonstration partielle, voire absente de leurs capacités. Par exemple, Laamarti et al. (2020) ont fait la démonstration seule de la capture et du transfert des données vers une application, bien que le modèle de DT proposé doive permettre le suivi et la régulation en temps réel d'activités physiques. De la même manière, d'autres ont fait la démonstration isolée d'outils d'analytique des données historiques liées à la performance et/ou aux données physiologiques au sein d'un modèle hypothétique plus complet (Barricelli *et al.*, 2020 ; Martinez-Velazquez *et al.*, 2019), ou bien font une proposition détaillée et cohérente, mais sans démonstration pratique (Gámez Díaz *et al.*, 2020a). Dans tous les cas, la proposition telle que formulée demeure néanmoins cohérente avec un niveau de maturité 4, les données étant collectées en temps réel par des capteurs portatifs, et une rétroaction étant générée afin de réguler l'activité

physique des utilisateur·rice·s. La rétroaction n'est pas effectuée via un actuateur puisqu'elle est liée à un comportement; en revanche elle est généralement prescriptive ou directive et en temps réel, ce qui permet une rétroaction immédiate et un jumeau numérique mature.

Dans cette sous-division des articles, les articles qui se démarquent sont plutôt ceux qui sont de niveau de maturité inférieur. Shamanna et al. (2020, 2021) ont procédé à une analyse a posteriori d'utilisateur·rice·s et ont proposé un modèle qui s'intéresse davantage à des indicateurs physiologiques génériques de santé, comme la glycémie, le poids et la pression artérielle, afin de fournir une rétroaction éventuelle sur l'alimentation. Les mêmes auteur·rice·s ont publié tout un ensemble d'autres articles d'analyses a posteriori, mais ces modèles étant basés sur des données historiques ou bien obtenues avec une certaine latence, ils sont par défaut des modèles de niveau maximum de deux ou trois. Alcaraz et al. (2019), qui proposent un modèle d'apprentissage machine pour l'intégration de données de marche et de posture d'athlètes, présentent le même enjeu, tandis que Diaz et al. (2021) n'abordent pas de manière claire la nature et la latence de la capture des données, laissant également présager un niveau de maturité entre deux et trois.

Dans la majorité des cas, on peut donc bel et bien remarquer que les DT proposés pour la régulation des activités liées à la santé personnelle se qualifient avec un niveau de maturité 4. Les modèles sont rarement démontrés, mais sont néanmoins cohérents avec les caractéristiques d'un DT dans la littérature. L'enjeu ici est aussi que la régulation de la santé lors des activités doit se faire en continu, donc contrairement à une anomalie de santé ou à une maladie, le suivi doit être constant et appliqué à des personnes sans particularités préidentifiées, et les interventions ne sont non pas uniques, mais bien répétées et continues.

#### 2.3.2.4 Modèles d'intégration globale de la santé

Cette section présente des modèles plus globaux d'intégration de la santé dans le jumeau numérique, c'est-à-dire que les modèles semblent viser une compréhension plus avancée de la santé humaine et de son fonctionnement. Cela ne signifie pas que le diagnostic ainsi que le suivi d'anomalies et de maladies, l'intervention médicale, ou encore la régulation des activités personnelles ne sont pas d'intérêts dans ces modèles. Il s'agit plutôt de modèles dans lesquels ces objectifs sont secondaires, c'est-à-dire des conséquences d'une meilleure compréhension et modélisation de la santé humaine dans différentes dimensions. Comme pour les modèles de régulation d'activités de santé

personnelle, ces modèles sont également applicables à tous et toutes, et non à des personnes présentant des maladies ou besoins particuliers identifiés au préalable.

Une proposition précurseur de l'intégration globale de la santé via le DT est celle du « Virtual Physiological Human » (VPH) de Marchal (2016), soit l'idée d'un humain générique finement modélisé dans son entièreté qui servirait d'intermédiaire pour une future intégration des données nécessaires pour construire des DT individuels. Cette étape intermédiaire a un niveau de maturité se situant clairement à 2, mais ouvrirait la porte sur un modèle de niveau plus élevé. Le modèle proposé par Semic Health (s. d.) présente les mêmes caractéristiques de modélisation complexe du corps du niveau cellulaire au niveau systémique et sans données réelles. Milne-Ives et al. (2022) ont proposé un modèle proposé sur des personas ou archétypes permettant d'effectuer des prédictions et estimations de risques concernant différents aspects de la santé, incluant par exemple la santé mentale. Finalement, le brevet déposé par Zimmerman et al. (2019) pose quant à lui les bases d'une méthodologie d'intégration de données réelles pour construire un DT d'organe ou un d'humain, sans mention toutefois de synchronisation de modèles ou de données en temps réel. Ces modèles sont des modèles complexes de simulation permettant de mieux relier les éléments de la santé globale, mais demeurent de niveau deux sans données réelles.

D'autres propositions plus ambitieuses de modèles de DT pour l'intégration de la santé humaine globale ont également été effectuées, mais leurs capacités, comme pour les modèles de régulation des activités de santé personnelle, ne sont que peu ou pas démontrées. Okegbile et al. (2022) ont proposé un modèle impliquant la capture en temps réel de données qui sont transférées aux DT des individu·e·s, avec un accent mis sur l'utilisation du cloud et du « *edge computing* » pour obtenir un modèle performant intégrant les différents axes de tests et d'évolution de la personne modélisée. Un manque existe toutefois en ce qui concerne la rétroaction, qui semble inexistante, le modèle ne faisant qu'analyser les informations sans retour d'information précise : le niveau de maturité est donc estimé à 3. Cox et al. (2020) ont pour leur part déposé un brevet pour une architecture de DT nécessitant la présence de capteurs, permettant l'obtention de données liées aux patient·e·s pour les intégrer au modèle virtuel correspondant qui inclue au moins un organe ou système physiologique, le tout visant une intégration et une analyse des données suivies d'une rétroaction sur le capteur directement ou sur le ou la patient·e. Lombardo et Ricci (2022) ont plus tard proposé une architecture de modèle très similaire, avec également les caractéristiques correspondant à peu

près exactement à celles d'un DT. Le brevet tout comme l'article laissent penser à une connexion constante en temps quasi réel, donc un niveau de maturité 4, mais ces informations y sont assez peu détaillées.

Deux autres propositions très théoriques, mais également très détaillées, cohérentes, et ambitieuses proposent de dépasser la santé physiologique pure en intégrant des données en temps réel ou quasi réel de sources variées. S'ajouteraient en effet aux informations biologiques et physiologiques des données liées à la performance de l'activité physique, la santé mentale, le réseau social, et potentiellement d'autres sphères de la vie d'une personne, son jumeau numérique l'accompagnant tout au long de sa vie (Sahal *et al.*, 2022 ; Shengli, 2021). Dans les deux cas, le modèle demeure une intégration complète, bidirectionnelle et en temps réel des données, avec une rétroaction proposée qui soit directive et/ou prescriptive, le modèle méritant donc à un niveau de maturité 4.

Les modèles proposés dans cette sous-division de la santé personnalisée sont les plus complets en termes de couverture de la santé et du bien-être, mais aussi en termes de complexité et d'intégration des données. Ce sont aussi les plus hypothétiques, dans la mesure où ces modèles représentent un idéal à atteindre pour le secteur de la santé personnalisée, mais l'état actuel de la technologie dans l'industrie ne semble pas permettre de réaliser cet idéal, même loin de là. Toutefois, des modèles et propositions existent qui s'attardent à d'autres caractéristiques et enjeux potentiels du DT : la sous-division suivante présente ces cas particuliers, qui sont difficiles à classer.

#### 2.3.2.5 Les autres modèles non-qualifiés liés à la santé personnalisée

Certains auteur·rice·s ont profité de l'engouement pour le DT afin de proposer des composantes différentes de celles considérées comme essentielles au DT, ce qui ne signifie pas qu'elles ne sont pas pertinentes, telles que des algorithmes ou systèmes de protection des données sensibles. Le modèle de Zhang et al. (2020) met surtout l'accent sur le modèle d'analyse des vulnérabilités du système informatisé, mais est appliqué à un algorithme de classification et de détection de cancers qu'ils ont proposé, leur contribution étant donc liée à la santé également. Seuls les modèles d'analyse de vulnérabilités et de classification des cas cliniques sont vraiment élaborés, et le modèle lui-même n'utilise pas de données en temps réel : le niveau de maturité estimé ne dépasse donc pas le niveau 2. Il en va de même pour le modèle d'Akash et Ferdous (2022), lui aussi axé principalement sur des protocoles de sécurité via l'utilisation du Blockchain, mais qui ne présente

qu'un modèle d'obtention, de stockage et de partage des données du ou de la patient·e n'incluant pas de modèle virtuel clair ou même mentionné : il serait donc de niveau de maturité 1.

Ces modèles, même s'ils ne sont pas vraiment des DT, demeurent en revanche cohérents avec les recherches d'Ahmadi-Assalemi et al. (2020), qui avaient soulevé le besoin de prendre en charge les risques variés associés aux jumeaux numériques et aux connexions, la plus criante étant justement la nécessité d'une sécurisation des données et des échanges, le tout en support à la médecine personnalisée et intelligente. Ces enjeux sont abordés plus en détail dans la discussion au Chapitre 5.

### 2.3.3 Analyse des DT des procédures en santé

Les propositions et articles qui suivent concernent des procédés et processus qui entourent le ou la patient·e ou utilisateur·rice du DT, mais ne s'attardent pas spécifiquement aux humains en tant que tels dans la modélisation et le suivi. Deux enjeux spécifiques sont explorés : le contrôle et la régulation des procédures de santé, surtout la chirurgie, ainsi que stabilisation et la sécurisation des connexions dans ces processus, qui dans ce cas-ci sont plus centraux en assurant par exemple la fiabilité des procédures à distance ou sur des modèles virtuels.

Le modèle proposé par Zhang et Tai (2022) implique la régulation en temps réel d'une simulation de chirurgie, mais sur un·e patient·e purement virtuel·le donc sans affiliation réelle, et l'accent est surtout mis sur leur protocole de sécurité et de détection des vulnérabilités. Il s'agit donc d'une interaction en temps réel avec un modèle statique, et leur proposition se qualifie plutôt comme un modèle de simulation de niveau de maturité 2. Le modèle de Laaki et al. (2019) concerne un système de contrôle à distance d'un bras robotisé pour simuler une opération chirurgicale via la réalité virtuelle. Le système développé est axé sur le contrôle de l'outil chirurgical, mais effectue également une représentation sommaire virtuelle du mannequin représentant le ou la patient·e. La représentation de l'opération du bras téléguidé et la rétroaction de force face aux contacts sont faites en temps quasi réel, via une boucle de contrôle et de régulation du bras. Étant donné la connexion dynamique, la copie virtuelle approximative et la rétroaction sur l'action, un niveau de maturité de quatre peut donc être estimé. Hagmann et al. (2021) proposent un modèle qui complète partiellement des lacunes de celui de Laaki (2019) en ajoutant des marqueurs visuels de réalité augmentée afin de guider la tâche en cours. Néanmoins, la tâche ne semble pas évaluée par le

modèle en cours d'exécution, donc le modèle demeure de niveau trois maximum, représentant la réalité physique en temps réel sans offrir de réelle fonction ou rétroaction.

Le brevet déposé par Peterson (2019) offre en contrepartie une couverture plus large concernant le stockage des données et la vérification des opérations liées à une opération chirurgicale, le système proposé permettant la régulation des procédures via un DT enregistré de l'opération. Certains détails sont manquants sur la nature des connexions et l'interactivité du modèle virtuel avec la réalité physique, mais la régulation proposée des chirurgies au cours de celles-ci indique une rétroaction et une connectivité permettant une réaction rapide, et donc, le respect des caractéristiques du DT avec un niveau de maturité quatre.

Trobinger et al. (2021) démontrent de leur côté un modèle d'échange à distance entre patient·e et médecin, appuyé sur des capteurs et actuateurs en temps réel et permettant des rétroactions et une analyse des données communiquées dans la réalité virtuelle utilisée. Le tout qualifie le modèle avec un niveau 4, les fonctions exécutées permettant de dépasser la simple observation visuelle par le ou la médecin. Finalement, le modèle proposé par (Talukder *et al.*, 2022) vise à représenter le processus décisionnel d'un·e médecin via la modélisation très détaillée et complexe de l'interrelation entre les connaissances médicales actuelles et les caractéristiques d'un·e patient·e. Le modèle est en un sens une simulation du processus décisionnel et ne représente aucune personne en particulier, demeurant donc de niveau deux, mais cette représentation particulière du processus décisionnel est assez unique et pourrait s'intégrer en appui à d'autres types de DT.

Comme mentionné précédemment, aucun des modèles présentés dans cette section n'est vraiment axé sur une personne et sa santé, ce qui n'implique pas pour autant qu'ils ne soient pas pertinents pour le jumeau numérique en santé. En effet, une meilleure régulation et modélisation des chirurgies et traitements variés pourra éventuellement permettre des soins plus précis (Peterson, 2019) ainsi que de l'entraînement ou de la formation sur des modèles détaillés et réactifs, comme l'ont proposé Zhang et Tai (2022). En ce qui concerne la sécurité des données et l'analyse des vulnérabilités, elles seront cruciales au bon fonctionnement des DT, mais aussi à l'éventuelle acceptabilité sociale des DT en santé, et assurent la fiabilité des actions et rétroactions du DT, ce qui est également essentiel à la définition même du DT.



### 2.3.4 Analyse des DT pour les systèmes de gestion de la santé

La section qui suit concerne les propositions de jumeaux numériques ayant été développés pour coordonner et intégrer ce qui entoure la santé des personnes, plutôt que la santé elle-même. Ainsi, c'est le fonctionnement des opérations ou des services qui sont au cœur des modèles, et non les besoins et caractéristiques spécifiques des patient·e·s. Les objectifs des modèles semblent se diviser en trois divisions principales de gestion : l'espace et les ressources matérielles, les ressources médicales, et l'intégration du parcours clinique. Les prochaines sous-sections présentent donc de manière plus détaillée ces différents cas et propositions, avec une attention additionnelle portée à ce qui est démontré ou non dans les modèles afin d'identifier la faisabilité des différentes idées proposées.

#### 2.3.4.1 Les modèles de DT pour la gestion de l'espace et des ressources matérielles

Trois propositions de DT ayant pour accent principal la gestion de l'espace et/ou des ressources matérielles ont été répertoriées. Ces modèles ont donc pour objectif principal la gestion des opérations liées aux éléments très matériels et contextuels à la santé, ces éléments étant dans tous les cas cruciaux au maintien des conditions optimales et des services pour la santé des usager·ère·s. Les trois propositions répertoriées concernent la gestion des ressources matérielles et/ou de l'espace dans un hôpital, et ce, pour le bâtiment au complet.

Le premier cas est une proposition par Liu et al. (2020b) d'un modèle dont l'objectif est le design et la planification des opérations d'un hôpital en construction, plus particulièrement la planification de l'acheminement des différentes ressources matérielles, des ressources médicales consommables, et des ressources alimentaires aux départements de l'hôpital, voire directement aux patient·e·s. Un regard sur les 5 dimensions du DT présentées précédemment révèle d'office qu'il s'agit d'un modèle de simulation bien développé, mais qui ne se qualifie certainement pas comme jumeau numérique dans la mesure où on ne considère pas de données réelles actuelles, le modèle ayant été construit avant l'existence de l'hôpital modélisé. On parle donc de jumeau en termes de fidélité de représentation du système prévu, pas en termes de système dynamique en évolution parallèle au système réel. Il n'y a pas de connexion et les données sont statiques, générées entièrement par l'usage de paramètres estimés, donc il n'y a aussi aucune rétroaction possible. Le modèle virtuel consiste en un modèle de simulation à événements discrets, mais ne présente pas de visuel ou de tableau de bord prescriptif ou même descriptif mis en évidence. Finalement, en termes de services

il y a les tests d'hypothèses pour valider des scénarios d'acheminement des ressources et de designs d'hôpital, mais le modèle ne permet pas de générer d'autres services pour l'hôpital. Le modèle a donc un niveau de maturité estimé à 2, mais pourrait être connecté à l'hôpital réel comme outil de prédiction, d'optimisation des services, et même d'allocation des ressources. Il manque toutefois une partie importante de l'infrastructure technologique nécessaire à l'atteinte d'un DT plus mature.

La deuxième proposition de modèle est également partielle en termes de démonstration des capacités, car il s'agit d'un cadre de cas pour lequel seul le système de détection et d'allocation des ressources consommables a été démontré (Hu *et al.*, 2021). La proposition globale concerne la planification des ressources de manière généralisée pour le soin des patients, mais le détail est mis sur les ressources matérielles et surtout consommables. En termes de jumeau physique, aucune entité ou système réel n'est démontré; une proposition est faite pour la capture de données sur les ressources matérielles de l'hôpital via caméras et d'autres types de capteurs. Une connexion en temps réel est proposée, mais pas démontrée ou même explicitée, dans la mesure où le fonctionnement architectural du DT n'est que sommairement exploré. Le modèle virtuel d'analytique des données et de décision d'allocation est formulé et présenté, mais pas démontré, aucun test réel sur des données n'ayant été effectué. En conséquence, aucun service n'est démontré, bien que l'article présente le cas comme un outil de planification, d'allocation et d'optimisation des ressources surtout matérielles, mais aussi humaines dans une moindre mesure. Une rétroaction est proposée et hypothétisée, mais la nature de cette rétroaction n'est pas forcément claire. Le modèle proposé, s'il était développé, atteindrait donc un niveau de maturité estimé à 4, mais il n'est clairement pas suffisamment démontré pour servir une application réelle dans l'état présenté.

Finalement, le dernier modèle, présenté par Peng *et al.* (2020), est sans doute l'un des modèles les plus développés et démontrés dans tous les cas répertoriés de jumeaux numériques en santé, et ce, probablement parce que le projet et système présenté se situe à la frontière entre la santé, le génie civil, et la gestion des opérations industrielles, profitant ainsi de ces domaines où les DT sont plus avancés. Le cas proposé est un jumeau numérique affilié au *Shanghai East Hospital*, et permet la gestion et la maintenance des équipements médicaux et non-médicaux, mais aussi des flux de gaz, d'énergie et de patient·e·s dans l'hôpital, en plus de l'identification de patient·e·s, d'usager·ère·s de services, et des ressources humaines. Le système intégré a été mis en place dès la conception de l'hôpital, faisant même partie des étapes de construction : le cycle de vie de l'hôpital entier est donc

modélisé et suivi. Des milliers de capteurs sont utilisés pour représenter les 22 systèmes ou sous-systèmes différents de l'hôpital, et ce, en temps quasi réel ou réel selon le système. Le modèle démontre une centralisation efficace et efficiente des données de l'hôpital via le DT, qui est accessible via un centre de contrôle où s'affichent les résultats d'analytique d'affaires ainsi que le modèle virtuel interactif en continu. Le modèle permet d'identifier et détecter différentes fautes de systèmes, des besoins de maintenance, mais aussi des tendances en termes de problématiques afin d'émettre des recommandations, des requêtes directes ou des analyses détaillées. Le système peut en effet faire l'allocation des ressources de maintenance et vérifier l'utilisation des espaces et équipements pour en optimiser l'usage et le design. Finalement, un ensemble de caméras associées à l'IA permet de détecter et calculer le flux de patient·e·s dans l'hôpital pour alerter en cas de hausse marquée, mais sert également de mesure de sécurité puisque des usager·ère·s problématiques ainsi que les ressources humaines de l'hôpital peuvent être identifiées. L'ensemble des rétroactions sont donc surtout effectuées via le tableau de bord du centre de contrôle, mais sont aussi opérées via une application pour ce qui concerne le service de maintenance de l'hôpital, l'application permettant de communiquer et d'allouer des requêtes de maintenance directement aux employé·e·s concerné·e·s. Les rétroactions sont donc informatives, prescriptives, et directives via l'intégration du personnel dans la boucle. L'ensemble de ces éléments porte donc vers une estimation de maturité 4, mais qui semble très bien démontré sur toutes les dimensions du DT. Bien que l'accent sur les patient·e·s ou les ressources médicales soit moindre que dans d'autres modèles, il n'en demeure pas moins que le DT présenté est un outil incroyable de gestion des opérations de l'hôpital en ce qui concerne les ressources matérielles et l'espace, ce qui sans aucun doute assure la stabilité des conditions favorables à la santé des usager·ère·s. Ce cas illustre aussi que le DT semble plus avancé dans certains secteurs autres que la santé, car il a en effet profité du *Building Information Modeling* (BIM) issu du domaine de la construction et du génie civil, d'où est également issu l'inspiration pour le système utilisé de classification par niveau de maturité.

#### 2.3.4.2 Les modèles de DT pour la gestion des ressources médicales

Cette sous-section présente en détail les modèles dont l'accent principal est la gestion des ressources dites médicales, donc nécessaires aux procédures et aux soins de santé. En contrepartie, les autres types de ressources ainsi que le parcours cliniques peuvent tout de même faire partie des modèles, mais ne forment généralement pas l'objectif principal de la proposition. Avant de s'y

attarder, il convient de mentionner la proposition de Lu et al. (2021), davantage théorique et axée sur la sécurité des informations, mais dont l'architecture de système trop floue ne permet pas de le qualifier vraiment comme un cadre de cas ou un cas d'application. Cette division des articles est d'un grand intérêt pour la Clinique Relais, puisque saisir le travail des intervenant·e·s et en faire une gestion efficace semble être une piste intéressante d'amélioration des capacités de la Clinique.

Le premier cas plus détaillé est un projet développé par Siemens Healthineers (2018) pour le *Mater Private Hospital* en Irlande, plus précisément pour le département de radiologie. Le projet consistait à la reproduction fidèle du département afin d'optimiser l'utilisation des ressources, la productivité générale, et le flux des patient·e·s. Bien que le modèle soit basé sur un lieu physique réel, aucun capteur n'a été utilisé pour générer des données réelles, et encore moins en temps réel, les informations ayant été générées au cours d'une évaluation d'une durée d'une semaine. Il n'y a donc pas de question de connectivité qui se pose non plus dans le cas présent. En revanche, le modèle virtuel est très bien développé, est interactif et a permis de visualiser et présenter les résultats et les simulations d'opérations du département, incluant des tests d'optimisation d'allocations de ressources et de design d'espace. Étant donné l'absence de connexion réelle avec le système, la question de la rétroaction est également hors de propos : il s'agit donc d'un modèle de simulation avancé correspondant à un DT de niveau maturité estimé à 2, le terme DT ne référant ici qu'à la fidélité du modèle en termes de représentation graphique et physique ainsi que des distributions de données. Néanmoins, ce seul usage a déjà prouvé son efficacité pour l'amélioration des opérations, et il importe donc de savoir si ces améliorations sont jugées suffisantes, ou bien si l'hôpital ou le département concerné souhaitent préciser et complexifier leurs interventions avec l'aide de données en temps réel et d'analytique plus avancée.

Un autre modèle proposé est celui de Pilati et al. (2021) pour la numérisation de cliniques de vaccination à grande échelle pendant la Covid-19. Le DT envisagé permet de tracer le parcours des usager·ère·s dans la clinique de vaccination et de mesurer la durée des différentes étapes du processus de vaccination, mais surtout en conséquence d'étudier l'usage des ressources. Les personnes usagères transportent avec elles des badges de communication en champ proche, communément référés par leur sigle anglais NFC, qui sont déposées sur les téléphones intelligents des ressources médicales lorsque les usager·ère·s sont aux kiosques de celles-ci, ce qui permet de mesurer précisément le temps passé à chaque étape. L'info est ensuite transmise manuellement par

les ressources médicales à la base de données, ces données étant ensuite disponibles pour des simulations et de l'analytique de données qui permettent aux personnes responsables de prendre les décisions appropriées. Sur les cinq dimensions, le jumeau numérique représenté est clair, et une capture de données en temps réel est faite de manière automatisée. Un problème survient toutefois sur l'axe de la connexion, car la connexion n'est pas automatisée et continue, donc même si les données sont plutôt précises et presque continues, elles ne sont pas transmises directement et dépendent de la rigueur des ressources médicales qui servent d'intermédiaires. La connexion ne va également pas vraiment du monde virtuel vers le monde physique, les informations ne résultant qu'en un tableau de bord descriptif n'offrant aucune information prescriptive. Le modèle virtuel est clair et bien défini dans la simulation, et les services produits incluent la prédiction et les tests de scénarios accessibles au besoin. Il s'agit donc d'un modèle qui se qualifierait comme un modèle de niveau 3, dans la mesure où les données sont précises et captées en temps réel, mais accessibles ou traitées de manière déphasée.

Le cas suivant est celui proposé par Zhong et al. (2022) et implique la modélisation d'une unité de soins intensifs dans l'hôpital *Mayo Clinic Rochester*, dans l'état du Minnesota aux États-Unis. Le modèle proposé est présenté d'office comme un modèle de simulation hybride avec des paramètres variés et des éléments et ressources détaillés. L'objectif principal du modèle est l'optimisation de l'utilisation des lits de l'unité ainsi que du ou de la médecin résident·e, via différents scénarios. En ce qui concerne les cinq dimensions du DT, la réalité physique est en réalité une inspiration pour générer le modèle plutôt qu'un jumeau physique ayant un jumeau numérique affilié; aucun capteur n'est en effet utilisé, et les données sont obtenues du système informatique de l'hôpital afin de générer des estimations de paramètres. Les données dans le modèle ne sont donc pas réelles, et certainement pas en temps réel, puisqu'il n'y a pas de connexion avec la réalité physique. Le modèle virtuel est simplement le modèle de simulation, avec lequel il est possible d'interagir pendant la simulation, et le service principal est le test de scénarios et d'hypothèses. Il n'y a pas de rétroaction possible étant donné l'absence de jumeau physique relié, et le modèle se qualifie donc comme un modèle numérique de niveau de maturité estimé à 2. En ce sens, le modèle est intéressant et permet des tests de scénarios intéressants pour l'unité, mais la précision des résultats de scénarios demeure limitée aux hypothèses et estimations de paramètres plutôt qu'à des cas et des conditions réels. Le modèle a néanmoins été démontré et les résultats semblent probants, ce qui en fait une référence intéressante pour la modélisation d'une unité de soins avec des paramètres variés.

La quatrième proposition de DT dans cette catégorie est construite autour de la simulation basée la modélisation de type agent et cible le département d'urgence d'un hôpital (Liu *et al.*, 2022). Le système de DT proposé vise à permettre le suivi de l'état actuel du système, la prédiction de l'état futur à partir de l'état actuel, et les tests de scénarios via des simulations de type Monte Carlo. Le modèle se synchronise ou se réinitialise à chaque entrée de données issues du système informatique de l'hôpital modélisé. L'objectif exact du modèle n'est pas très clair outre une représentation générale, mais les ressources médicales sont modélisées avec détail et leur optimisation semble être visée dans les indicateurs de performance. D'un point de vue des cinq dimensions et des caractéristiques du DT, le modèle est bien développé sur plusieurs axes, mais présente une lacune majeure sur l'aspect de la capture des données liée au jumeau physique : ces données sont saisies manuellement dans le système par des ressources administratives ou médicales réelles, et pas forcément au moment de l'évènement d'intérêt, mais plutôt par exemple à la fin de la journée, ce qui pose un problème majeur en termes de temps réel des données et de la connexion. Il n'y a pas vraiment de rétroaction proposée, le modèle de simulation pouvant faire des analyses prédictives, mais seulement avec l'action d'une personne responsable. De même, le modèle de DT dit « synchrone » pose un problème puisqu'il se réinitialise dès l'arrivée de nouvelles données : il n'est donc pas possible d'étudier la fiabilité des prédictions ou même simplement de les communiquer, ce modèle n'étant utile que si quelqu'un le regarde en tout temps. Dans cette optique, ce modèle, comme les deux présentés précédemment, oscille quelque part entre un niveau de maturité 2 et 3, des données étant synchronisées en « continu » dans le modèle, mais pas en temps réel, et sans rétroaction. Toutefois, il a un potentiel évident pour atteindre au moins le niveau 3 avec un apport IoT, qui pourrait également permettre une rétroaction permettant d'atteindre le niveau 4.

Le cas qui suit est une application réelle et toujours en utilisation qui a été mise sur pied par GE Healthcare au *Johns Hopkins Hospital* (Keating, 2021), à Baltimore, dans l'état du Maryland aux États-Unis. Le système déployé évolue autour d'un centre de commande qui assure l'utilisation et l'allocation des lits d'hôpitaux dans les différents départements, mais qui supervise aussi les transferts vers et depuis l'hôpital. Sur la dimension du jumeau physique, la représentation est claire pour la ressource et les informations ciblées. On peut suivre l'état des lits – occupé, en attente de nettoyage, libre – de manière centralisée, ainsi que le nombre de chirurgies en cours avec leur temps de fin estimé, et aussi le nombre de patient·e·s en cours de transfert depuis d'autres hôpitaux. En ce qui a trait à la capture de données, la source exacte des données n'est pas claire : les données

semblent être mises à jour en temps réel au centre de commande, mais il n'est pas mentionné si ces données sont entrées manuellement dans le système ou bien si des capteurs peuvent générer ces informations. Il s'agit d'une imprécision importante, mais qui n'empêche pas le modèle d'être efficace et pertinent pour l'amélioration des services et l'efficacité opérationnelle de l'hôpital. Le modèle virtuel est en partie visible sur l'énorme tableau de bord du centre de contrôle, procédant à des analyses de résultats et des prédictions pour l'utilisation des ressources variées en plus d'afficher leur état. En ce qui concerne le contrôle et la rétroaction, là encore il manque quelques informations, mais le tableau de bord semble avant tout informatif, et une équipe complète est dédiée à l'utilisation des informations affichées. Avec tous ces éléments, dont plusieurs manquants, il est difficile d'estimer précisément le niveau de maturité du modèle implanté, mais en admettant une certaine flexibilité sur la capture de données et en considérant la réactivité du système proposé, on peut supposer un DT de niveau de maturité 3, dans la mesure où il requiert une charge importante de travail « manuel » avec une légère latence, mais qu'il permet une régulation active et à distance des activités de l'hôpital.

Finalement, la proposition de Liu et al. (2019) allie la gestion des ressources médicales variées et les soins de santé personnalisés pour les personnes âgées. Le modèle proposé intègre les données concernant l'état de santé des personnes âgées, telles que le rythme cardiaque, la pression artérielle, ou le taux de glucose sanguin, mais aussi l'utilisation et la disponibilité des ressources médicales, qu'elles soient humaines ou matérielles. Le modèle inclut aussi la possibilité de faire un suivi à domicile de l'état de santé des patient·e·s en temps réel, afin de détecter des problèmes majeurs et de dépêcher au besoin les ressources médicales nécessaires sur place. En termes des cinq dimensions définies du jumeau numérique, les auteur·rice·s effectuent des propositions qui semblent complètes et cohérentes avec le DT. La réalité physique est mesurée par des capteurs variés représentant différents éléments du système de soins de santé proposée. Cette réalité physique est à son tour transposée dans un modèle virtuel faisant l'intégration et la gestion des données de manière centralisée, avec lequel les utilisateur·rice·s varié·e·s, qu'ils soient usager·ère·s ou ressources médicales, peuvent interagir pour utiliser les services offerts. Ces services proviennent de l'analyse des données des patient·e·s, permettant de détecter et d'identifier des anomalies dans leurs signes vitaux et autres paramètres, mais aussi de faire un suivi de leurs besoins et leur état. Le modèle peut allouer des ressources appropriées aux besoins des personnes âgées, que ce soit au sein d'un établissement ou encore à domicile, comme l'appel d'une ambulance,

le rappel pour la médication, ou l'appel d'un·e infirmier·ère à l'hôpital. L'article indique un suivi en temps réel des patient·e·s et des autres entités du système, mais aussi la capacité à réguler le système via des communications, rappels et alertes aux ressources appropriées, ce qui implique une connexion bidirectionnelle et en temps réel ainsi qu'une rétroaction appropriée vers le système. Le tout indique un niveau de maturité estimé de 4. Si cette proposition est cohérente, et l'une des premières qui semble aussi cohérente pour la gestion des soins de santé, elle n'est en revanche que partiellement démontrée.

En somme, les modèles de DT proposés pour la gestion des ressources médicales en sont à des stades variés de développement et de démonstration, la démonstration la plus avancée étant sans doute celle de l'hôpital John Hopkins (Keating, 2021), le principal élément manquant étant lié à l'automatisation de la capture de données et de la rétroaction vers le système. Il n'est pas exclu que des détails soient simplement manquants dans l'article, mais il n'en reste pas moins que le DT proposé réussit à faire ce pour quoi il a été créé. En contrepartie, le modèle le plus complet et ambitieux (Liu *et al.*, 2019) ne démontre pas sa capacité à être implanté dans une situation réelle, malgré sa proposition intégrant l'ensemble des éléments nécessaires pour la gestion des soins de santé personnalisés : il y a donc un écart entre le niveau de maturité des propositions théoriques ou cadres et les cas d'application réels, tout comme dans la plupart des catégories d'utilisation du DT couvertes jusqu'à maintenant. Ce sont néanmoins des modèles qui apportent des pistes de solutions et d'étude intéressantes pour la Clinique Relais, puisque même un modèle de simulation pure peut déjà permettre de mieux étudier et optimiser la capacité du système à répondre aux usager·ère·s.

#### 2.3.4.3 Les modèles de DT pour l'intégration des parcours cliniques

Les modèles présentés dans cette sous-division ont pour axe principal la gestion du parcours clinique des usager·ère·s, c'est-à-dire un accent sur le service reçu par les patient·e·s. On s'approche d'une forme de soins personnalisés, mais dans un axe de service plutôt que de données de santé, donc ce sont les données liées au système qui sont employées pour étudier le service reçu. En ce sens, c'est aussi sans doute la division d'articles la plus importante en lien avec la problématique de la Clinique Relais. Bien que les informations sur les ressources médicales soient importantes, il manque cruellement d'information sur le parcours clinique précis des usager·ère·s, qui ne sont pas toujours à même de le partager elles- ou eux-mêmes, ce qui rend encore plus cruciale la perspective d'une gestion intégrée des données et du parcours lui-même.



Le premier modèle concerné est celui proposé par Augusto et al. (2018) qui modélise l'unité d'urgence d'un hôpital et vise à mieux prévoir différents changements d'opérations et d'achalandage. La modélisation est basée sur la simulation à événements discrets, et représente les différentes étapes du parcours clinique des patient·e·s. Les ressources médicales sont modélisées, mais ne sont pas étudiées via les indicateurs de performance du modèle, et le modèle ne vise pas à optimiser leur utilisation. En ce qui concerne les cinq dimensions du DT, il n'y a pas de jumeau physique spécifique lié au modèle, le modèle virtuel étant un modèle de simulation générique basé sur la configuration et le fonctionnement d'un ensemble d'unités d'urgence. En conséquence, il ne peut donc pas y avoir de données réelles correspondantes, le modèle étant fait pour intégrer les données à partir du système informatique hospitalier auquel il se joint afin de générer des distributions de données nécessaires aux simulations. La nature et la fréquence de synchronisation des données ne sont pas claires, mais seraient au mieux toutes les quelques heures. Le modèle de simulation permet par la suite l'analyse de scénarios à partir de ces données afin de préparer l'hôpital à différentes éventualités, avec une certaine forme de prédiction de l'état de l'hôpital. Finalement, il n'y a pas de rétroaction dans le modèle proposé, le modèle étant simplement à la disposition de l'équipe de gestion : le tout mène vers un niveau de maturité estimé à 2, la connexion étant peu fréquente, et les données obtenues étant saisies manuellement dans le système faute de preuve du contraire. Il s'agit donc surtout d'un modèle de simulation facilement « synchronisable », mais ne se qualifie pas comme jumeau numérique mature en tant que tel.

Un deuxième modèle de DT proposé est celui de Croatti et al. (2020, 2021) dont l'accent est axé sur le parcours clinique détaillé d'un·e patient·e, de la prise en charge par des ambulancier·ère·s jusqu'à la fin du traitement dans l'unité d'urgence. L'outil d'aide à la décision proposé faciliterait l'intégration et la communication des informations entre les différentes parties prenantes des soins de santé. Les données sont soit captées par un ensemble de capteurs de signes vitaux ou bien sont entrées par des agent·e·s de logiciel [traduction libre] qui sont chargé·e·s d'entrer certaines données sur le ou la patient·e dans le modèle, permettant d'en suivre l'état au fil de son parcours clinique via un écran central. Les agent·e·s peuvent également utiliser le modèle d'IA proposé pour générer des suggestions et diagnostics probables à partir des données entrées, que les ressources médicales pourront ensuite utiliser dans leur prise de décision. D'un point de vue de qualification et des cinq dimensions du DT, le modèle répond à certaines caractéristiques de manière plus claire que d'autres. Bien que le système virtuel proposé puisse être jumelé à une réalité physique, la capture des

données de cette réalité physique demeure restreinte par les opérations manuelles. Certaines données sont saisies automatiquement, telles que le rythme cardiaque ou d'autres signes vitaux; en revanche, ces données ne sont pas analysées par le système afin d'offrir de quelconques services, ou à tout le moins, pas automatiquement. Le modèle virtuel mise en effet sur la modélisation basée sur les agent·e·s pour représenter le statut du ou de la patient·e, mais l'IA est à part du modèle et fonctionne sur demande. Toute la partie analytique demeure donc entre les mains des agent·e·s de logiciel mentionné·e·s plus haut. Ainsi, les informations plus complexes telles que l'état de criticité, les diagnostics, et les pronostics dépendent des agent·e·s de logiciel pour être effectués. Aussi, la seule rétroaction consiste en un affichage informatif des données captées, toute métadonnée ou analyse restant dans le contrôle des agent·e·s de logiciel. En somme, l'intégration n'est pas complète, des intermédiaires étant requis à trop d'étapes : le modèle se situerait donc quelque part entre un niveau de maturité 2 et 3.

Le troisième cas de cette sous-division des DT pour la gestion du parcours clinique est celle de Patrone et al. (2020), une proposition d'intégration de boutons IoT pour préciser la saisie de données liées aux différentes étapes d'une chirurgie en salle opératoire, pour ensuite pouvoir mieux étudier lesdites opérations, leur durée, et la gestion de la salle opératoire. Le jumeau numérique présenté consiste en un modèle de simulation basé sur l'approche de dynamique des systèmes pour modéliser la succession des étapes, dont la durée et les conditions sont déterminées par la base de données issue des boutons IoT. Ce modèle peut ensuite être utilisé pour mieux estimer la durée d'une chirurgie et planifier les opérations. D'un point de vue des cinq dimensions du DT et de ses caractéristiques, quelques informations sont manquantes ou bien manquent de précision. En termes de jumeau physique, il semblerait que ce soient les étapes d'opérations qui soient modélisées, mais aucune entité ou ressources de quelque nature que ce soit. Les données sont captées par un bouton IoT activé par un observateur externe, et la capture n'est donc pas automatisée en soi, mais surtout, sont plus ou moins continues : le bouton est pressé huit fois sur une période d'une à deux heures. Ces données sont transmises à une base de données utilisable par la suite dans le modèle de simulation, c'est-à-dire dans ce cas-ci l'entièreté du modèle virtuel. Cependant, la nature de la connexion entre le bouton IoT et la base de données ou entre cette dernière et le modèle de simulation n'est pas précisée. La capture est manuelle et effectuée en « temps réel » puisque le bouton est pressé au moment voulu, mais il n'y a aucune indication que les données soient transmises au modèle virtuel en temps réel, et il n'y a également aucune rétroaction du modèle

virtuel vers la réalité physique. En termes de services, on peut parler d'une forme de prédiction ou de tests de scénarios avec le modèle de simulation, mais ces tests sont donc basés sur des données synchronisées manuellement de manière sporadique. En somme, le niveau de maturité estimé oscille ici entre 2 et 3, la connexion n'étant pas complètement établie entre les éléments du système proposé, et la continuité des données étant discutable. Les auteur·rice·s concluent à une précision plus élevée des données recueillies par le bouton IoT, mais cette conclusion est discutable, et ce modèle ne semble pour l'instant pas être particulièrement efficace. En effet, le bouton est pressé par un·e étudiant·e observateur·rice qui n'est attiré·e qu'à cette tâche, donc il est très probable que la personne faisant la saisie manuelle dans la salle d'opération pourrait atteindre des résultats similaires en ne faisant également que cette tâche. En somme, le modèle proposé manque de cohésion, mais aussi de cohérence avec les caractéristiques requises d'un DT, et se qualifie donc comme un modèle numérique correspondant à un DT de niveau 2 de maturité.

Le quatrième modèle présenté a été développé afin de proposer un cadre architectural de DT nommé *Hospi'Twin* pour la gestion des soins de santé (Karakra *et al.*, 2018, 2020), afin de pouvoir par la suite présenter une méthodologie de développement de DT basé sur le modèle d'*Hospi'Twin* (Karakra *et al.*, 2022). Dans le modèle initial (Karakra *et al.*, 2018), un modèle de simulation est proposé pour une éventuelle intégration à un DT. L'IoT est considéré dans la définition du DT, mais le modèle n'inclut pas ces données, l'objectif étant d'abord une meilleure compréhension et modélisation du parcours clinique des patient·e·s en fonction du design et des ressources modélisées d'un hôpital. Dans le modèle suivant, une proposition est faite pour un système global qui n'est pas sans rappeler le système précédemment décrit de Liu *et al.* (2022), c'est-à-dire un modèle contenant un modèle miroir et un modèle prédictif qui permettraient l'intégration de données obtenues en temps réel et qui se mette à jour lors d'entrées de nouvelles données. Dans la méthodologie utilisée et ensuite explicitée en 2022, un émulateur d'hôpital est construit afin de générer des données qui sont ensuite intégrées et testées dans le modèle *Hospi'Twin* proposé. Les modèles sont plutôt détaillés, les parcours explicités, et les algorithmes d'analyses et d'utilisation des données sont présentés, pour obtenir un modèle qui semble assez robuste : il s'agit maintenant d'évaluer plus concrètement chacune des dimensions et caractéristiques requises du DT pour en être certain. En ce qui a trait au jumeau physique, il n'y en a pas de précisé, comme il s'agit d'un cadre puis d'une méthodologie pour un cas d'application. En revanche, la méthodologie proposée implique la réplique architecturale des lieux modélisés, il y a donc bel et bien une réalité

physique correspondante au modèle. Pour la capture des données et la connexion, elle est proposée, mais non démontrée : le suivi du cheminement clinique des patient·e·s est proposé via la capture via l'usage de systèmes RFID ou « Real Time Location System » (RTLS) avec les étiquettes correspondantes. En revanche, la démonstration d'usage de données dans les articles est toujours associée à l'usage de l'émulateur d'hôpital. Bien qu'un désir de capture de données en temps réel soit évoqué, il n'y a toutefois pas de détails sur la nature et la fréquence de la connexion ou bien sur le prétraitement et le traitement des données captées. Le modèle virtuel semble quant à lui très bien développé, complexe, et permet des analyses descriptives et prédictives d'indicateurs de performance liés au parcours clinique des patient·e·s, tels que les temps d'attente aux différentes étapes et le nombre de patient·e·s traité·e·s ou transféré·e·s. Les services offerts sont donc liés aux tests de scénarios et au monitoring du système; cependant, aucune rétroaction n'est mentionnée pour le modèle, le modèle ne faisant qu'être « disponible » pour les parties prenantes. En somme, le modèle est très proche d'un niveau de maturité 4 en termes de proposition, mais certains éléments manquent de détail, comme la connexion et le traitement des données, ou sont absents, comme la rétroaction et l'interaction entre le jumeau numérique et le jumeau physique correspondant. Le modèle est donc un modèle avancé de niveau 3 si le manque de détail est ignoré, mais pourrait sans doute être transformé en modèle de niveau 4 si un module de rétroaction est ajouté afin d'assurer l'interaction continue avec la réalité physique et les parties prenantes.

Le cinquième modèle présenté pour cette sous-division est une idée de projet issu de la collaboration au Royaume-Uni entre l'hôpital de Moorsfield, spécialisé dans les soins des yeux et de la vue, et l'Université de Cambridge (s. d.). L'objectif du projet, et du système de DT proposé, est de préparer l'hôpital pour son déménagement vers le site d'Oriel, initialement prévu en 2025, mais aussi et surtout d'améliorer ses services aux personnes ayant différents problèmes de la vue. Le projet proposé dépasse la sphère du seul hôpital, et couvre également les transports en commun ainsi que la santé du ou de la patient·e, bien que la description brève du modèle pour le ou la patient·e ne corresponde pas du tout à un DT pour les soins personnalisés. Les DT proposés permettraient d'assister en temps réel les patient·e·s de l'hôpital dans leur navigation des transports en commun vers et depuis l'hôpital, mais aussi dans la navigation à l'intérieur de l'hôpital. Le DT de l'hôpital pourra identifier les caractéristiques des patient·e·s en route pour leur opération et permettre aux ressources médicales de se préparer correctement; il pourra aussi assurer un soutien aux patient·e·s par l'envoi d'une ressource médicale en cas de besoin. Ces éléments pointent vers

les caractéristiques requises d'un DT. En revanche, très peu de détails sont fournis concernant la composition des cinq dimensions du DT : les seules dimensions partiellement couvertes sont l'existence des jumeaux physiques sous la forme des patient·e·s, du réseau de transport, et de l'hôpital, ainsi que les services offerts aux usager·ère·s. Aucune information n'est en revanche présentée pour la capture et le traitement des données, le modèle virtuel, et la connexion entre les différents éléments du système proposé. Le système proposé serait donc hypothétiquement de niveau de maturité 4, mais aucune des dimensions n'a été démontrée dans la proposition initiale.

Le sixième et dernier modèle présenté pour la gestion et l'intégration des parcours cliniques est un peu particulier, puisqu'il concerne la santé des usager·ère·s du système et que le cadre proposé est applicable en santé, mais est testé et appliqué en contexte manufacturier, plus précisément dans une cafétéria d'usine (De Benedictis *et al.*, 2022). Le modèle proposé permet la visualisation de la cafétéria, l'analyse et la prédiction des risques liés à la distanciation sociale dans l'espace concerné, et la gestion de l'utilisation des tables et des capacités de la cafétéria. En soi, le DT proposé s'apparente donc autant à un DT de gestion des espaces et des ressources matérielles qu'à un DT d'intégration du parcours clinique. En ce qui concerne les cinq dimensions proposées du DT, le modèle développé est cohérent, d'autant plus que les auteur·rice·s font une proposition de cadre et d'architecture très similaire à celle de Qi et al. (2021) adoptée dans le présent mémoire. Le jumeau physique est bien défini comme étant dans ce cas-ci la cafétéria et les files d'attente. La position des usager·ère·s est calculée grâce à l'usage de multiples capteurs stéréoscopiques vidéo, permettant d'identifier de manière précise la position des usager·ère·s dans l'espace ainsi que les un·e·s par rapport aux autres. Les capteurs ayant des capacités AI intégrées, les capteurs permettent également d'identifier si les usager·ère·s portent le masque ou non. Toutes ces données sont transmises à une unité de prétraitement puis à l'unité d'analytique du modèle virtuel, qui permet d'analyser la proximité et la durée des contacts, et d'évaluer l'occupation de la salle et des tables. Chacun des usager·ère·s est modélisé·e et représenté·e graphiquement avec une couleur qui représente le risque présenté par sa proximité avec une autre personne et la durée de cette proximité. La connexion est bien détaillée, et les auteur·rice·s évaluent la latence entre l'action et sa représentation dans le modèle à environ 4 secondes, ce qui les qualifie largement comme du temps quasi réel. En termes de services et de rétroaction, plusieurs affichages permettent aux usager·ère·s de savoir si des places sont disponibles, quelles files d'attente sont moins occupées, et régule également les entrées avec un code de couleur. Le modèle virtuel peut également effectuer de

courtes prédictions afin de déterminer d'éventuels engorgements des files d'attente ou des services alimentaires. Les auteur·rice·s mentionnent l'absence de simulations de scénarios, mais en proposent la future intégration, ce qui représente un point additionnel pour leur proposition. En soi, considérant le modèle virtuel fonctionnel, la rétroaction informative et même prescriptive, ainsi que la connexion en temps quasi réel, on peut estimer un niveau de maturité de 4 pour le modèle, particulièrement si le modèle en vient à acquérir des capacités de simulation supplémentaires. Même si le modèle démontré n'est pas en contexte de santé, la proposition d'architecture l'est bel et bien, et les deux points focaux du modèle en font un modèle plus qu'approprié comme DT en gestion des établissements de soins de santé.

À ce stade, les modèles explorés permettent de dégager des idées intéressantes pour le suivi des usager·ère·s de la Clinique Relais. Beaucoup de modèles sont encore des modèles de simulation, mais les idées concernant les prédictions et la régulation du système apparaissent, comme l'usage simple d'écrans pour communiquer avec des usager·ère·s et l'étude de proximité entre eux. Les niveaux de maturité divergent au sein de cette sous-classe de cas, mais il ressort néanmoins des différents modèles que peu semble leur manquer pour atteindre le stade de DT mature, et qu'ils permettent d'étudier les besoins et activités des patient·e·s et usager·ère·s à un niveau plus élevé que les DT de soins personnalisés. D'autres modèles permettent de pousser cette étude à un niveau encore plus élevé : c'est à ce titre que la section suivante aborde les DT au niveau le plus élevé répertorié, soit les DT pour la gestion de la santé publique et écosystémique.

### 2.3.5 Analyse des DT pour la gestion de la santé publique et écosystémique

Les cas et articles présentés dans cette section ont pour point focal la gestion de la santé à un niveau qui dépasse les individus, les procédures ou les systèmes de soins. La santé publique mise sur la gestion des différents facteurs liés à la santé, de nature collective et individuelle, et est surtout axée sur la prévention plutôt que l'intervention (Larousse, s. d.), et c'est pourquoi cette catégorie regroupe aussi l'aspect écosystémique, c'est-à-dire sous forme d'un système-de-systèmes : certains modèles visent aussi des interventions ou modifications à grande échelle plutôt que la prévention, en mettant l'accent sur les interactions entre les différents systèmes. Les modèles et propositions théoriques répertoriés dans cette section ont en effet pour objectifs principaux la préparation de plans de contingence en cas d'urgences sanitaires, la régulation des activités individuelles pour limiter les risques émergents, ou le partage de ressources de l'écosystème de systèmes de santé

pour répondre aux besoins globaux. Les modèles proposés pour la santé publique sont peu nombreux et seront donc présentés de l'approche la plus préventive, soit les plans de contingence, jusqu'aux approches les plus régulatrices, soit la régulation des activités individuelles des citoyens et citoyennes, en passant par les modèles de gestion des ressources médicales au niveau citadin et/ou régional.

Le modèle de DT par Barat et al. (2021) concerne la ville de Pune en Inde afin de tester différents plans d'interventions pour réguler la propagation de la Covid-19, leur modèle ayant été conçu au plus fort de la pandémie. Le modèle proposé est en fait une simulation complexe basée sur la modélisation d'agents, soit par entités individuelles et changements d'états, et visait à représenter fidèlement la propagation du virus dans la ville afin de planifier correctement les interventions possibles. La modélisation incluait des paramètres très variés liés aux caractéristiques démographiques, aux lieux et espaces occupés, aux étapes et conséquences des interventions, et aux caractéristiques du virus lui-même. L'ensemble des données sont issues d'estimations de paramètres, et il n'y a pas de connexion en soi, donc pas de temps réel ni de rétroactions non plus. Le niveau de maturité du modèle de DT est donc estimé à 2, puisqu'il s'agit simplement d'un modèle de simulation avancé avec un niveau de fidélité important. Un autre modèle avec des objectifs similaires a été proposé par Pang et al. (2020), leur modèle misant sur l'apprentissage fédéré pour améliorer l'analyse et l'intégration des données de plusieurs villes souhaitant étudier des plans de contingence face à un virus, par exemple des tests de mesures sanitaires, la collaboration augmentant la quantité et diversité des données disponibles. Des données alimentées en continu sont mentionnées, mais la nature de la collection ou de la saisie des données n'est pas explicite; en revanche, l'absence de rétroaction du système est très claire, l'ensemble des données et modèles étant disponibles pour les parties prenantes, mais sans interaction avec la réalité autre que lors d'un besoin sporadique. On peut donc estimer un niveau de maturité à 3 si les données variées sont synchronisées et saisies en continu comme mentionné. Le modèle de Rodríguez-Aguilar et Marmolejo-Saucedo (2020) propose quant à lui l'usage de la modélisation hybride, soit autant basée sur des événements discrets, des entités, et des dynamiques de système. Les trois types de modélisation servent ainsi à représenter et réguler l'allocation des ressources médicales et matérielles ainsi que les systèmes de soins eux-mêmes à travers un réseau d'établissements de santé, l'accent étant mis sur la réaction face à une crise sanitaire. Le modèle utiliserait des données en temps réel obtenues à propos des différentes ressources et du parcours clinique des patients, bien

que cette partie manque de détail. Une fois le modèle synchronisé en temps réel, le modèle macro de vision du réseau pourrait permettre la prédiction de tendances et évaluer différents scénarios de crises pour produire des plans de contingences et de régulation des ressources adaptées à la situation actuelle du système. Outre une utilisation sur demande du système, la seule rétroaction proposée est un tableau de bord dans les hôpitaux présentant les données récoltées, comme le parcours clinique des patient·e·s. Or, les données seules ne permettent pas de réguler le système, et il n'y a pas de rétroaction au niveau macro. En incluant le temps réel hypothétique et l'utilisation de données réelles, ce modèle se qualifierait donc comme un système de niveau de maturité 3. Le modèle semble en effet viser l'obtention d'un état actualisé du système nécessaire aux simulations, plutôt qu'une régulation continue du système représenté.

La proposition de Verma (2022) est en fait ancrée dans un CPS, avec un DT présenté comme support et extension du CPS pour optimiser ses services et représenter plus fidèlement les ressources du système. La proposition est davantage théorique qu'appliquée, mais mérite d'être développée puisqu'elle est très ambitieuse et complète. Le CPS proposé, associé aux DT des différentes entités, impliquerait différents niveaux d'intégration, allant du ou de la patient·e virtuel·le jusqu'à la ville intelligente. Y seraient donc représenté·e·s et régulé·e·s les patient·e·s, les ressources médicales et matérielles de l'hôpital, les ressources externes de l'hôpital incluant d'autres hôpitaux ou des cliniques, et la ville entière dans une vision systémique, le tout alimenté par des données en temps réel obtenues par des capteurs variés. Les ressources peuvent être dirigées vers des patient·e·s, et des recommandations de soins peuvent aussi être faites au sein de l'hôpital ou à l'extérieur. La proposition inclut également des systèmes de régulation du modèle lui-même, donc une évolution du CPS et DT à travers des optimisations systèmes et une IA autonome. En soi, il s'agirait donc de la seule proposition claire de niveau de maturité 5, soit le niveau le plus élevé de DT, permettant un jumeau numérique et un système de gestion de la santé qui s'autorégulent et améliorent leur propre performance à travers le temps, les expériences et les rétroactions.

Finalement, les autres modèles répertoriés ont une approche davantage axée sur la surveillance et la régulation des activités individuelles d'une population afin de réduire les risques et les impacts, en particulier en temps de crise sanitaire. Le modèle d'EL Azzaoui et al. (2021) mise sur un DT de coordination des soins de santé et de contrôle de la propagation de la Covid-19 dans une ville donnée. Le modèle est basé sur une application permettant de suivre les contacts et déplacements



des usager·ère·s, mais aussi leur état de santé, afin de contrôler la contagion et leur utilisation des services de soins de santé. En cas de test positif ou même seulement de symptômes, l'application peut au besoin alerter les autres usager·ère·s d'une possible contagion, orienter l'usager·ère vers un établissement de santé proche ayant des ressources médicales et matérielles disponibles, et ainsi réguler l'utilisation du système de santé tout en optimisant les soins aux personnes touchées par le virus. Les données semblent surtout saisies manuellement, mais des capteurs ne semblent pas exclus, et la rétroaction est claire : le niveau de maturité serait donc estimé à un niveau 4, dans la mesure où l'usager·ère se voit conseillé ou alerté au besoin dès que nécessaire et où des données seraient entrées en temps réel ou quasi réel. Les modèles de Saracco et al. (2020) ainsi que de Zhao et al. (2021) ont sensiblement le même objectif et fonctionnement, mais davantage de contrôle et de travail sont exigés des autorités publiques sanitaires, les deux modèles étant davantage informatifs sur la situation de santé de la population identifiée, mais ne permettant pas de régulation directe ou ciblée. Les autorités sanitaires doivent prendre une part active dans ces modèles si une action doit être entreprise. Dans l'optique où ces modèles permettraient tous deux l'obtention de données en temps réel ou quasi réel, il s'agirait ici de modèles de niveau 3 de maturité.

Un regard sur l'ensemble de ces propositions montre que tout comme pour les autres divisions des jumeaux numériques en santé, les propositions pour la gestion de la santé publique sont plus avancées en théorie qu'en pratique, et encore là des lacunes persistent surtout en termes d'obtention de données en continu avec une faible latence, les modèles proposés étant souvent axés sur la prévention, et ne nécessitant donc pas de données dans l'immédiat. L'intervention des autorités publiques dans certains modèles illustre aussi l'influence de la sécurité et des risques sur le choix des infrastructures, puisque le besoin de ces intermédiaires peut causer une interruption des flux de données et des rétroactions.

### 2.3.6 Typologie du jumeau numérique en santé

Cette section est dédiée à la typologie des jumeaux numériques en santé, issue de l'analyse faite précédemment des utilisations, des niveaux d'abstraction, et des niveaux de maturité des modèles de DT dans le secteur de la santé. Cette typologie, bien que ne regroupant pas systématiquement tous les articles existants sur le sujet, couvre la littérature répertoriée et est cohérente avec les éléments soulevés dans la littérature générale intersectorielle faite dans le sous-chapitre 2.2.

### 2.3.6.1 Typologie émergente et parallèles intersectoriels

Après une analyse des utilisations du DT faites ou proposées en santé, une particularité a émergé des regroupements d'utilisations et de leurs caractéristiques. En effet, les types d'utilisations en santé ressemblaient beaucoup aux catégories principales d'utilisations faites dans le secteur manufacturier, soit les applications de *Pronostics and Health Management* (PHM), *Production Planning and Control* (PPC) et de *Process and Layout Design* (PLD), ainsi que de manière plus globale, le *Product Lifecycle Management* (PLM) qui peut aussi englober les trois autres applications. Une fois que cette similarité a été identifiée, un ajustement des sous-catégories trouvées initialement a permis de voir qu'en effet, cette forme de classification semblait séparer plus nettement les modèles en termes d'objectifs, mais aussi de caractéristiques principales. En un sens, cette similarité fait sens, parce que ces applications couvrent les principaux intérêts dans un système donné : le suivi de l'état des entités fonctionnelles d'intérêt, la régulation des interventions et/ou des ressources associées, et l'optimisation des pratiques ou de l'environnement, le tout étant nécessaire pour la gestion complète du niveau d'abstraction d'intérêt à travers le temps et les transformations. On remarque aussi que ces divisions ressemblent aux approches principales de planification en gestion, soit la planification stratégique, tactique et opérationnelle. En production, le PHM serait essentiellement au niveau opérationnel, puisque les interventions sont au besoin et plus près du temps réel. Le PPC serait au niveau tactique, puisque les rétroactions et besoins sont liés à des tendances et à la régulation générale du système. Le PLD serait plus près du niveau stratégique, les changements étant plus durable. Finalement, le PLM conserve une vision globale et pourrait viser l'intégration des trois niveaux de planification, puisque l'entièreté de l'entité et de son existence sont au cœur du modèle.

En changeant les mots-clés liés au secteur manufacturier pour des mots plus applicables dans un contexte de services, on obtient *Prognostics and State Management* (PSM), *Service Planning and Control* (SPC) et *Activity and Layout Design* (ALD). Le tout s'imbrique à son tour dans une vision globale du cycle de vie : le *Service Lifecycle Management* (SLD), équivalent du *Product Lifecycle Management* dans le secteur manufacturier et généralisable à tous les niveaux d'abstraction.

Le tableau 2.9 présente un résumé des applications en santé selon le niveau d'abstraction ciblé. La colonne à gauche identifie les niveaux d'abstractions prédéterminés, tandis que les applications génériques forment les titres de colonnes, et les applications correspondantes pour le secteur des

services avec un langage plus neutre se trouvent en dernière ligne. Pour le reste, les cellules contiennent la typologie proposée des applications et types de jumeaux numériques en santé. Le contenu de la plupart des cellules a déjà été couvert précédemment, toutefois les éléments de la dernière colonne sont particulièrement intéressants et pour la plupart n'ont pas semblé émerger dans la littérature jusqu'en 2022.

Tableau 2.9 - Typologie des jumeaux numériques en santé par niveau d'abstraction et par application

NIVEAU D'ABSTRACTION	Applications transposées dans le secteur de la santé			
	Suivi des unités fonctionnelles	Gestion des pratiques et de l'environnement	Régulation des interventions et ressources	Gestion intégrale et continue
<b>Unité</b> (Santé personnalisée)	Diagnostic et progression d'anomalies	Régulation d'activités et pratiques de santé personnelle	Modélisation fonctionnelle pour interventions	Gestion du cycle de vie de la santé humaine
<b>Processus/Activité</b> (Procédures en santé)	Procédures de diagnostic et évaluation	Design de procédures et de conditions	Régulation des processus opératoires	Régulation dynamique des processus de soins
<b>Systèmes</b> (Système de gestion de santé)	Intégration du parcours clinique des usagers	Gestion de ressources matérielles et d'aménagement	Allocation des ressources médicales	Gestion intégrale des systèmes de soins de santé
<b>Système de systèmes</b> (Santé écosystémique/publique)	Intégration des individus et systèmes fonctionnels	Plans de contingence et adaptation structurelle	Coordination des systèmes de ressources	Gestion de Santé publique et écosystémique
<b>APPLICATION PRIMAIRE</b>	<b>Prognostics and State Management</b>	<b>Activity and Layout Design</b>	<b>Service Planning and Control</b>	<b>Service Lifecycle Management</b>

Au niveau de la santé personnalisée, la gestion intégrale se correspondre en un sens avec le *Human Lifecycle Management* (HLM) présenté précédemment, bien que les modèles proposés n'aient pas besoin d'être aussi complexes que ceux proposés dans la littérature pour se qualifier. La gestion intégrale des processus de soins serait liée à une démarche d'amélioration et d'intégration continue des opérations via le jumeau numérique, une manière de conserver une vision d'ensemble sur les processus et procédures à travers leur développement et le changement des besoins. Pour sa part, la gestion intégrale des systèmes de soins de santé présenterait la possibilité de suivre et réguler un système tel qu'un hôpital à travers son cycle de vie pour assurer la cohésion et la performance des opérations et soins offerts, mais aussi les besoins de l'établissement complet dans une perspective globale. Finalement, la gestion intégrale au niveau du système de systèmes permettrait la prise en charge continue d'un ensemble de variables dynamiques, autant internes qu'externes aux systèmes qui le composent, le tout pour assurer le bien-être et la santé de la population. Ces modèles seraient évidemment idéaux puisqu'ils sont plus complets, mais chaque type de modèle présente néanmoins

des caractéristiques et un potentiel intéressant qui peuvent être employés dans des cas précis. À cet effet, la sous-section qui suit présente les caractéristiques de chaque type de modèle répertorié, et pour les types pour lesquels aucun cas n’a été répertorié, des hypothèses sont posées uniquement pour les objectifs des modèles.

### 2.3.6.2 Caractéristiques et vision intégrale des types de DT en santé

Cette sous-section vise à présenter et comparer les caractéristiques de chaque type de jumeau numérique répertorié ou hypothétisé en santé, chaque type étant donc déterminé par sa jonction entre l’application primaire et le niveau hiérarchique en santé. Il s’agit de résumer les informations ayant émergé de l’analyse des cas, cadres et projets d’application du jumeau numérique dans le secteur de la santé. Le premier niveau hiérarchique évalué est l’unité, dans le cas présent une personne, qu’elle soit patiente, usagère de services, athlète ou autre. Le tableau 2.10 détaille et résume les caractéristiques des modèles répertoriés pour ce niveau hiérarchique ainsi que les enjeux apparents dans les modèles.

Tableau 2.10 - Typologie des jumeaux numériques pour la gestion de la santé personnalisée

Niveau	Application	Objectifs principaux	Technologies dominantes	Maturité atteinte	Enjeu(x) identifiés
<b>Santé personnalisée</b>	Diagnostic et progression d'anomalies	Diagnostiquer des anomalies physiologiques ou des maladies chez des patient·e·s et évaluer la progression (pronostic).	ML/IA, IoT, Analytique	M2 : x9 M3 : x9 M4 : x2	Peu de rétroaction dans les modèles, et peu visuel aussi, donc aide à la décision plus difficile.
	Régulation d'activités et pratiques de santé personnelle	Réguler les activités de santé personnelle (nutrition, sport, ergonomie) pour améliorer les résultats et éviter les risques.	IoT, Edge Computing, ML/IA, Interfaces utilisateur·rice·s	M2-3 : x3 (x5)* M4 : x10 (x11)**	La visualisation est variable, et très peu de prédictif. L’aspect continu est complexe vu la durée limitée des activités.
	Modélisation fonctionnelle pour interventions	Modélisation d’organes ou systèmes physiologiques afin de tester des scénarios d’interventions médicales.	Simulation BO, Analytique, ML/IA.	M2 : x13	La nature sporadique des interventions ne sollicite pas de données en temps réel ou de rétroaction, donc peu matures.
	Gestion du cycle de vie de la santé humaine	Intégration de la santé de manière continue et générique pour des recommandations ou traitements personnalisés.	Simulation BO, IoT, ML/IA, Edge Computing.	M2 : x4 M3 : x1 M4 : x4	Les propositions sont incomplètes ou ne disposent pas des technologies requises, manque de cas réels complets.

\* Shamanna et al. (2020, 2021) ont proposé deux modèles similaires issues d’une même recherche, mais avec des variables différentes. Frossard et al. (2019) ont proposé un modèle initialement de niveau 2, réutilisé et propulsé au niveau 4 en 2022.

\*\* Frossard et al. (2022) et Saxby et al. (2022) ont proposé des modèles très similaires issus d’une même équipe de recherche.

Le tableau 2.10 permet d’identifier certaines tendances. Par exemple, à ce niveau hiérarchique, les modèles d’apprentissage machine et d’IA sont dominants dans les modèles, à l’exception des modèles pour la modélisation fonctionnelle pour les interventions, qui sont en grande partie basés sur la simulation basée objet. La raison est sans doute que la représentation détaillée et précise de

l'humain par la modélisation basée objet est extrêmement complexe, et que les modèles mathématiques de l'IA ou du ML permettent en revanche de représenter certaines fonctions ou dynamiques du corps de manière plutôt fiable et certainement plus simple. En revanche, il y a de nettes lacunes en termes de rétroaction, ce qui n'est pas très surprenant considérant les risques critiques de rétroactions sur l'humain et sa santé. Cette généralité exclut visiblement les modèles pour la régulation des activités de santé personnelle, le risque associé étant généralement moins grave que les interventions ou recommandations liées aux maladies, traitements et chirurgies. Somme toute, les modèles sont plutôt disparates en termes de maturité, mais en moyenne, les modèles se trouvent autour du niveau trois de maturité. Il semble par ailleurs que tous les éléments sont présents pour que des modèles intégraux plus matures et performants voient le jour : des modèles de santé personnalisée de tous types ont au minimum été démontrés, que ce soit en partie ou au complet, ce qui signifie que chaque composante a au moins été faite et testée.

Le deuxième niveau d'abstraction évalué est le niveau des procédures et processus. Le tableau 2.11 ci-dessous présente les résultats de l'analyse des jumeaux numériques de cette catégorie.

Tableau 2.11 - Typologie des jumeaux numériques pour la gestion des processus et procédures de santé

Division	Application	Objectifs principaux	Technologies dominantes	Maturité atteinte	Enjeu(x)
<i>Procédures en santé</i>	Procédures de diagnostic et évaluation	Modéliser et reproduire les procédures de diagnostic et d'évaluation des problèmes de santé.	ML, IA, IoT, Réalité virtuelle	M2 : x1 M4 : x1	Peu de modèles identifiés, difficile à estimer. Le modèle de niveau 4 semble robuste.
	Design de procédures et de conditions	<u>Hypothèse</u> : Évaluation et tests de dispositions d'espace et de conditions des patient-e-s pour améliorer la procédure.	N/A	N/A	N/A
	Régulation des processus opératoires	Accompagner le déroulement de la procédure pour assurer la conformité et éviter les risques.	IoT, Réalité virtuelle, IA, Simulation	M2 : x1 <b>M4 : x3</b>	Le suivi de tous les éléments d'une opération est complexe et n'est pas démontré.
	Ajustement dynamique des soins	<u>Hypothèse</u> : Réguler et adapter les processus et procédures de soins selon leur performance et les besoins.	N/A	N/A	N/A

L'analyse des tendances pour les DT de processus et procédures de santé est plus difficile, puisque très peu de cas ont été répertoriés. Toutefois, plus de la moitié des propositions avaient atteint une maturité de niveau quatre (DT fonctionnels); ce qui indique que ces modèles pourraient déjà être performants. La majorité utilisaient également la réalité virtuelle, associée à l'IA et l'IoT pour l'intégration des processus avec la réalité. Toutefois, l'absence de cas pour une application sommaire ainsi que pour la gestion intégrale ne permet pas une typologie complète à ce stade.

Le niveau suivant est celui des modèles de gestion d'établissements ou systèmes en contexte de santé, celui pour lequel l'analyse a été la plus poussée. Le tableau 2.12 détaille les informations sur les modèles, leur niveau de développement, et leurs lacunes par type d'application.

Tableau 2.12 - Typologie des jumeaux numériques pour la gestion des systèmes en santé

Division	Application	Objectifs principaux	Technologies dominantes	Maturité atteinte	Enjeu(x)
Système de gestion de santé	Intégration du parcours clinique des usager·ère·s	Modéliser et intégrer le parcours clinique des usager·ère·s pour prédire l'état futur du système.	Simulation, IoT, Analytique	M2 : x2 (x3)* M3 : x2 (x4)** M4 : x2	Plusieurs modèles visent des données en temps réel sans en détailler le fonctionnement.
	Gestion de ressources matérielles et d'aménagement	Optimiser l'utilisation et la disposition des espaces et des ressources matérielles.	Simulation, IoT, ML, IA, Analytique.	M2 : x1 M4 : x2	Modèles virtuels développés, mais sans attaches à la réalité ou rétroaction spécifique.
	Allocation des ressources médicales	Optimiser l'utilisation, l'allocation ou la planification des ressources médicales.	Simulation, Analytique, IA.	M2 : x2 M≈3 : x3 *** M4 : x1	Beaucoup de modèles « prêts » à être propulsés par l'IoT, mais la connexion avec la réalité physique est fragmentaire.
	Gestion intégrale des systèmes de soins de santé	Hypothèse : Réguler l'ensemble des dimensions humaines et matérielles d'un établissement de soin à travers son évolution.	N/A	N/A	N/A

\*Le modèle de Karakra et al. (2018), précurseur de leur modèle HospiTwin (Karakra et al., 2020, 2022), était un modèle de niveau deux.

\*\*Les deux articles de Karakra et al. (2020, 2022) traitent du même modèle HospiTwin, mais avec une méthodologie et plus de détails en 2022. Le même enjeu se présente pour les deux articles de Croatti et al. (2020, 2021) qui changent de perspectives, mais traitent du même modèle.

\*\*\* Deux modèles avaient été positionnés entre 2 et 3, et un autre à 3 sous toute réserve, car des données étaient collectées en continu, mais un travail manuel était nécessaire à la collecte ou à la transmission des données. Il s'agit donc de données en continu, mais pas 100% automatisées.

Bien que cette catégorie de DT contienne également beaucoup moins de cas que la santé personnalisée, il demeure faisable d'analyser les cas et les tendances, en particulier considérant le niveau d'analyse effectué. Dans les types de modèles répertoriés, la simulation était de toute évidence dominante comme technologie, ainsi que l'analytique de données nécessaires à l'obtention de données plus raffinées pour les modèles de simulation. Cela s'explique sans doute par l'accent sur les aspects opérationnels et le parcours clinique, qui sont plus facilement représentables avec la simulation à événements discrets qu'avec la modélisation basée objet ou basée sur l'intelligence artificielle. Les niveaux de maturité sont plutôt disparates dans tous les types de cette catégorie. Mais on remarque une tendance vers une moyenne de niveau 3, et plusieurs de ces modèles ont de bons niveaux de démonstration d'intégration de données. Certains modèles démontrés se sont par ailleurs démarqués par leur complexité et leur efficacité, mais la plupart ont un enjeu de manque de collecte de données qui soit autant continue qu'automatisée, c'est-à-dire un support de l'IoT. Le suivi simple des patient·e·s ou l'intégration des ressources matérielles ont été démontrés par un cas chacun de ce point de vue, mais pas les ressources médicales : le seul modèle

qui l'ait intégré était un cadre d'application théorique. Ainsi, comme pour le secteur de la santé personnalisée, tous les morceaux semblent être présents pour assembler un modèle plus mature et performant, bien qu'il y ait beaucoup moins d'exemples concrets, et surtout, peu de variétés de contextes et de besoins.

Finalement, le dernier niveau d'abstraction est celui des systèmes de systèmes, ou écosystèmes de santé publique. Les détails concernant ces modèles sont présentés dans le tableau 2.13. Ce tableau révèle que ce niveau est également peu couvert pour la santé spécifiquement. En revanche, comme mentionné dans la sous-section 2.2.1.5.1 de ce chapitre, la Ville Intelligente est un concept en pleine expansion, et plusieurs modèles dans ce secteur intègrent la santé sans la détailler pour l'instant. Toutefois, une analyse globale demeure possible puisque tous les types sont appuyés par au moins deux cas. Pour ce niveau d'abstraction, aucune tendance particulière n'émerge vraiment de l'analyse effectuée, sinon que la Covid-19 a été un stimulant majeur pour ces types de modèles. Toutes les technologies semblent présentes et peut-être en particulier l'IA, qui est évidemment très utile pour des analyses dynamiques telles que celles requises au niveau macro pour représenter les interactions constantes à différents niveaux et avec l'environnement imprévisible. Le niveau de maturité oscille entre 2 et 5, avec la majorité de niveau 2, ce qui indique que l'IoT s'est taillé une place, mais que la régulation du système est encore manuelle, ce qui n'est pas très surprenant considérant la complexité des décisions impliquées pour un écosystème complet. Il s'agit d'ailleurs de la seule catégorie ou un modèle de niveau cinq a été proposé, même s'il n'a pas été démontré.

En effet, le modèle ambitieux de Verma (2022) est le plus proche d'intégrer de manière plus ou moins exacte les quatre niveaux d'abstraction ainsi que les différentes fonctions qui les composent, et ce, avec une vision d'évolution et de gestion autonome du système et du DT. Bien que la structure hiérarchique ne soit pas exactement la même et que la technologie source soit une combinaison de CPS et de DT, les éléments semblent à peu près tous présents, intégrant la santé personnalisée, la gestion de procédures et processus, la gestion et la coordination des établissements de soins, et l'intégration de la santé écosystémique en relation avec d'autres types de systèmes et écosystèmes sectoriels. Ainsi, bien que le modèle proposé par Verma (2022) soit plutôt axé sur la gestion des ressources et des systèmes associés, il serait tout à fait capable d'intégrer les autres dimensions de la gestion de santé publique et écosystémique.

Tableau 2.13 - Typologie des jumeaux numériques pour les écosystèmes de santé publique

Division	Application	Objectifs principaux	Technologies dominantes	Maturité atteinte	Enjeu(x)
<i>Santé écosystémique/publique</i>	Intégration des individu·e·s et systèmes fonctionnels	Suivi de l'activité des individu·e·s et des systèmes pour prédire leur état futur et prévenir ou enrayer les risques.	IoT, IA, Analytique, Edge Computing.	M3 : x2 M4 : x1	La rétroaction est difficile, la sécurité des données ressort beaucoup comme enjeu à ce niveau.
	Plans de contingence et adaptation structurelle	Adaptation des activités globales et de l'organisation des systèmes face à des risques ou crises anticipées.	Simulation, IoT, IA	M2 : x1 M3 : x1	Les tests de scénarios ne nécessitent pas vraiment des données en temps réel, elles sont donc mises de côté.
	Coordination des systèmes de ressources	Assurer le partage et l'allocation des ressources pour répondre aux besoins de l'écosystème de systèmes.	IA, IoT, Simulation	M3 : x1 M5 : x1	La rétroaction est difficile à cause de la précision et de la certitude des informations requises.
	Gestion de santé publique et écosystémique	Assurer la coordination dynamique du système-de systèmes face aux variables internes et externes.	N/A	N/A	N/A

Il est à noter qu'aucun modèle d'intégration complète n'a été répertorié à l'exception de la gestion de la santé personnalisée, mais que ces modèles ont un potentiel très élevé, et surtout, qu'ils peuvent hypothétiquement s'intégrer à d'autres secteurs via cette dimension. Par exemple, l'approche intégrale du cycle de vie de l'humain, ou HLM, est entre autres très bien détaillée par Hassani et al. (2022) et Shengli (2021), qui proposent une couverture de l'humain·e avant sa conception jusqu'après sa mort, en passant par toutes les sphères de sa vie et de ses interactions. Hypothétiquement, cette vision humaine globale intègre aussi d'autres types de services axés sur l'humain·e, comme la vente au détail, pour laquelle il faudrait adopter une perspective « client·e », ou l'éducation, dans laquelle il s'agirait plutôt d'une perspective « apprenant·e ». Il en irait de même pour les autres niveaux d'abstraction. L'intégration globale des processus et procédures pourrait très bien interagir avec des DT de machinerie médicale, même d'apprenant·e·s en contexte éducatif. Un DT d'intégration globale d'établissement pourrait intégrer les aspects de l'énergie, des flux de matière, et de logistique, ce que fait un peu le modèle de Peng et al. (2020), mais avec des aspects manquants en santé. Finalement, le système de systèmes peut facilement interagir avec d'autres sphères telles que l'environnement naturel, l'énergie et le transport de manière globale.

### 2.3.6.3 Qu'en est-il des services sociaux et des besoins de la Clinique Relais?

Comme mentionné précédemment, aucun résultat n'a émergé concernant spécifiquement les services sociaux. Toutefois, quelques articles répertoriés ont des liens avec les services sociaux ou la Clinique Relais. Il serait par exemple possible de classer les articles concernant la réhabilitation



de vétérans comme un service social, même si les DT concernés s'attardent davantage à la modélisation physique des prothèses et du corps des vétérans eux-mêmes qu'au processus de réhabilitation. Ce dernier mériterait toutefois qu'on y porte attention dans la mesure où cette démarche d'accompagnement est essentielle aux personnes vulnérables ou marginalisées.

D'un point de vue de la santé personnalisée, tout ce qui est lié spécifiquement au diagnostic et la détection d'anomalies, pourrait éventuellement être utile aux médecins et infirmières de la Clinique, qui ont des ressources limitées et des interactions sporadiques et parfois difficiles avec les usager·ère·s. Ce n'est toutefois pas dans l'axe du développement de prototype visé, d'autant plus que très peu d'informations sont disponibles sur le processus de soins de santé dans la Clinique. Les modèles liés à la reconnaissance des émotions (Subramanian *et al.*, 2022) ou du stress (Ferdousi *et al.*, 2021) seraient particulièrement pertinents pour la Clinique considérant leur importance dans le processus de prise en charge des usager·ère·s. Il en va de même pour le modèle concernant le dosage d'opioïdes pour le traitement de la douleur (Bahrami *et al.*, 2022), qui a de toute évidence sa place pour assister les médecins de la Clinique dans leur travail.

En ce qui concerne la gestion des systèmes de soins, ce sont surtout les modèles de gestion des ressources médicales et de parcours cliniques des usager·ère·s qui sont d'intérêt : aucun modèle n'a effectué le suivi des ressources médicales humaines et de leur travail, toutefois plusieurs ont proposé des modèles visant leur allocation ou modélisant leur comportement, ce qui pourrait être pertinent. En ce qui concerne le parcours clinique des usager·ère·s, cette information est cruciale et manquante dans la Clinique : il s'agit donc d'une priorité opérationnelle, et le détail en sera abordé au chapitre 4 lors de la conception du prototype. Le positionnement en temps réel pour la distanciation sociale (De Benedictis *et al.*, 2022) pourrait inspirer des pratiques sur le suivi et la proximité de ressources et d'usager·ère·s, permettant d'étudier les interactions entre entités et d'émettre des recommandations basées sur cette proximité, mais aussi potentiellement des niveaux de risques liés au lieu et au moment.

Finalement, au niveau plus macro lié au système de systèmes, l'étude des dynamiques d'interactions de la Clinique avec différentes sphères, comme le climat, les changements sociaux ou économiques, et évidemment la santé publique, serait sans doute d'intérêt, mais ne semble pas avoir été accomplie dans les articles recensés, et modéliser ces dynamiques est trop complexe pour les objectifs de la présente recherche.

Ainsi, il s'agit désormais d'utiliser ces inspirations de modèles ou idées et propositions pour créer un prototype pour la Clinique qui puisse pallier l'absence de propositions dans ce domaine. Tel qu'indiqué à maintes reprises, l'objectif derrière le développement du prototype pour la Clinique n'est pas la résolution active et complète de tous ses problèmes de la Clinique, ni la démonstration achevée d'un DT de niveau élevé de maturité. Il s'agit plutôt de montrer le potentiel du DT pour résoudre certains des problèmes présentés et de proposer des applications ou fonctions qui n'auraient pas été répertoriées. Les services sociaux n'ayant pas été relevés dans la littérature sur le jumeau numérique, il s'agit aussi d'une opportunité d'aborder des enjeux particuliers à ce type de services : bien-être mental, processus d'accompagnement, et tâches administratives de service indirect aux usager·ère·s peuvent être des pistes intéressantes de développement dans ce contexte particulier.

# CHAPITRE 3

## CADRE MÉTHODOLOGIQUE DE CONCEPTION DU PROTOTYPE DE JUMENTA NUMÉRIQUE

Dans ce chapitre, une méthode est présentée pour appuyer le design d'un prototype de jumeau numérique au sein du RССSQ du Québec, plus précisément pour la Clinique des Services bas seuil Relais. La méthodologie proposée est adaptée de la Méthodologie de Recherche en Science du Design de Peffers et al. (2007), illustrée ci-dessous dans la Figure 3.1, qui permet d'encadrer la démarche de design d'artefacts technologiques en sciences de l'information.

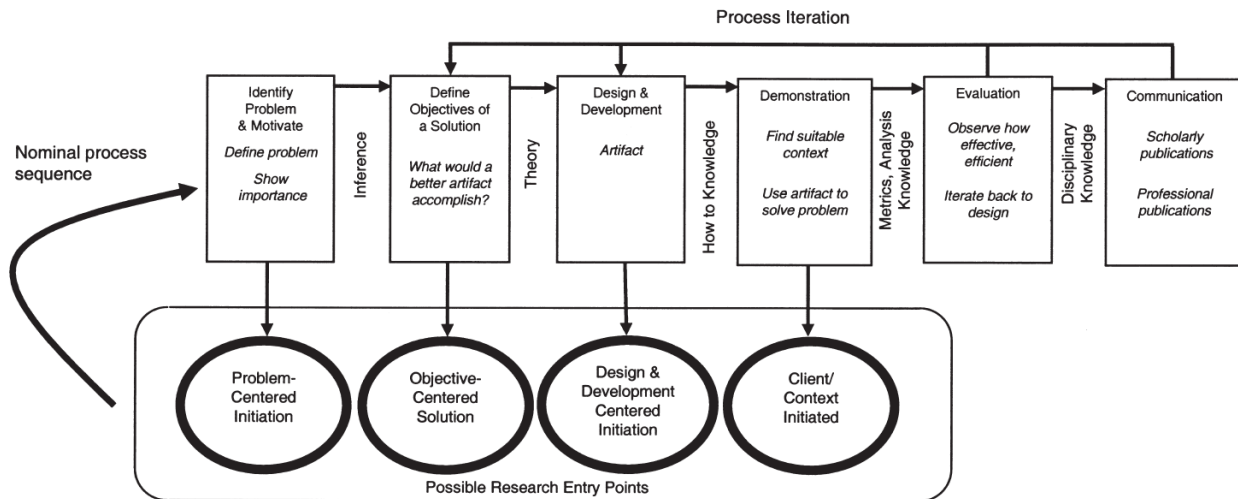


Figure 3.1 - Méthodologie de Recherche en Sciences du Design de Peffers et al. (2007).

Ainsi, les prochaines sections abordent dans l'ordre chacune des étapes de cette démarche pour parvenir à la conception et à la démonstration du prototype de jumeau numérique de la Clinique. Toutefois, la méthodologie suivie est limitée aux quatre premières étapes de la méthode de Peffers, puisque l'artefact proposé n'a pu être implanté ou testé en contexte réel, et il n'est donc pas possible de procéder à l'évaluation de la performance du prototype pour répondre aux problèmes de la Clinique. Il s'agit en effet plutôt d'en tester la faisabilité et l'utilité potentielle en concrétisant davantage la réalité de la Clinique dans ce prototype, afin de faciliter une éventuelle décision sur l'implantation de ce genre de technologies dans le RССSQ, et les résultats qui seront publiés concerneront davantage la démarche et les opportunités soulevées que les résultats.

### 3.1 Retour sur la problématique et des objectifs de la démarche de prototypage

Ce sous-chapitre effectue un bref retour sur problématique de la Clinique ainsi que sur les objectifs du prototype et de la présente recherche. Rappelons que la Clinique vit au moment de la rédaction de ce mémoire des problèmes de capacité d'accueil, de traitement et d'accompagnement de la clientèle visée, c'est-à-dire la population marginalisée en situation d'itinérance et ayant des troubles de dépendance aux opioïdes. Les problèmes majeurs soulevés sont les suivants :

- L'imprévisibilité des comportements perturbateurs des usager·ère·s, en particulier les surdoses et les crises d'agressivité, ce qui déstabilise et mobilise beaucoup les ressources.
- Le travail de surveillance active par les intervenant·e·s, issu d'un problème général d'insécurité lié aux comportements perturbateurs et aux angles morts dans la Clinique.
- La difficulté à estimer la capacité actuelle de la Clinique, à cause de la charge administrative élevée et présentement non quantifiée liée à la saisie manuelle des données sur les opérations et l'achalandage, mais aussi d'une absence d'information sur le travail indirect effectué pour les usager·ère·s, comme l'écriture des rapports d'évolution clinique.
- Le manque d'informations sur le détail des opérations de la Clinique et sur le parcours clinique de ses usager·ère·s, incluant le travail des ressources humaines du système.

Pour répondre à ces problèmes majeurs, les objectifs de prototypage sont donc d'abord d'offrir une base de DT permettant de collecter davantage de données sur le fonctionnement du système et sur le parcours clinique des usager·ère·s. Cela devrait faciliter l'estimation de la capacité actuelle de la Clinique, mais aussi permettre son étude plus en profondeur. Ensuite, il s'agit de proposer des ajouts futurs pour un DT permettant réellement de réguler et fluidifier les activités de la Clinique afin d'améliorer sa capacité, en considérant que les données supplémentaires sont obtenues.

Comme mentionné, la complexité du modèle de jumeau numérique proposé dans de la présente recherche est limitée pour plusieurs raisons. En plus des limites liées au temps et aux objectifs de cette recherche, il faut aussi considérer que la Clinique Relais ainsi que le CIUSSS dont elle fait partie ne disposent présentement pas de l'infrastructure technologique nécessaire au support d'un DT, même partiel. Le modèle proposé sera donc préparatoire à une éventuelle transformation numérique de grande envergure dans le RSSSQ québécois, le prototype permettant d'obtenir un aperçu des possibilités de l'outil dans ce cas de figure. Pour ces raisons, nous n'avons pas utilisé

de solutions existantes de support au DT tels que AWS IoT TwinMaker ou Azure Digital Twins, puisque nous ne pourrions de toute manière pas en faire l'implantation, et que le prototype est proposé dans une démarche d'ouverture sur la mise en pratique et non de résolution active des problèmes de la Clinique ou de conception détaillée de l'infrastructure technologique.

La section suivante, qui correspond à la phase 3 de la démarche de Peffers en Figure 3.2, permettra donc d'expliquer la démarche de design et de conception du prototype de jumeau numérique pour la Clinique, qui sera déclinée sous deux livrables : a) un prototype d'infrastructure physique simple de clinique connectée basé sur l'IoT, et b) un modèle de simulation pour représenter les opérations de prise en charge des usagers ainsi que les comportements des usagers et du personnel, qui peuvent influencer de manière considérable la fluidité des opérations.

### **3.2 Méthode de conception et développement des composantes du prototype**

La section qui suit concerne la collecte des données essentielles concernant le fonctionnement de la Clinique, dont les informations sont utiles pour le design et la conception des deux composantes du prototype à développer. Par exemple, la compréhension de l'aménagement physique des lieux permettra autant d'identifier la localisation envisagée des capteurs de données et des antennes que la modélisation et la simulation des flux de personnes ou des opérations.

#### **3.2.1 Obtention des données et caractéristiques pertinentes de la Clinique**

La Clinique de Services bas seuil Relais est une Clinique avec différents types de services, principalement dans les sphères de la santé et de l'accompagnement psychosocial. Ses locaux se trouvent au sein de l'Hôpital Notre-Dame à Montréal, et incluent un bureau d'accueil, une salle d'attente, des salles d'examen médical, des bureaux de rencontre, et une salle d'injection supervisée, en plus des toilettes et d'un ensemble de locaux réservés uniquement aux employés. La Figure 3.2 illustre le plan complet de la Clinique tel que fourni par son personnel administratif, avec l'ajout d'indications sur les principaux locaux d'intérêt pour le prototype. Le grand encadré noir indique la zone qui sera modélisée plus en détail pour l'infrastructure physique basée sur l'IoT, tandis que le petit encadré sert à identifier les deux salles de bain.



- Les évènements et comportements perturbateurs, en lien avec la dépendance aux narcotiques, la situation d'itinérance, et la santé des usager·ère·s, afin de pouvoir les prendre en compte dans un éventuel modèle de DT.
- La nature des interventions, afin de soulever les difficultés de la Clinique lorsque celle-ci fait face à des comportements imprévisibles ou perturbateurs.
- Les éléments axés sur la surveillance : trappes d'aération ajoutées sur les portes des toilettes, baie vitrée pour observer les usager·ère·s dans la salle d'attente ou au sein de la salle d'injection, les portes entrouvertes des intervenant·e·s lors des rencontres.
- L'architecture et la disposition de l'endroit : plafonds assez bas et fermes, petites salles fermées, disposition en « U », poste de sécurité juste à l'extérieur de l'entrée de la Clinique.

### 3.2.2 Développement de l'infrastructure IoT de capture et des traitement des données

Une infrastructure IoT est essentielle pour la capture de données de la réalité physique afin de nourrir sa contrepartie virtuelle dans le DT. Dans le cadre de cette recherche, l'infrastructure IoT du prototype proposé couvrira uniquement une sous-section de la Clinique, en considérant que tous les bureaux et toutes les salles d'examens auront besoin de la même infrastructure IoT de base.

Pour l'identification et le suivi des patient·e·s à travers leur parcours clinique, des identifiants jetables sont envisagés. Pour ce faire, une solution simple et peu dispendieuse consiste en l'utilisation de tags RFID passifs UHF de type « smart label » Dogbone<sup>3</sup> porté sous forme de badge ou apposé sur le vêtement de l'usager·ère au niveau de l'épaule. Ces tags sont conçus pour les applications de détection précise des objets dans la chaîne d'approvisionnement, le milieu industriel, ou lors de marathons, et offrent d'excellentes performances dans des environnements exigeants et sur différents matériaux. Pour la capture des données dans les pièces fermées, l'utilisation de lecteurs RFID fixes de marque Impinj R420<sup>4</sup> est envisagée. Ces lecteurs sont performants et remplissent les besoins anticipés pour la Clinique et le prototype de DT en termes de nombre d'antennes fixables et d'interface, et étaient également disponibles dans le Laboratoire IoT de l'UQÀM, ce qui élimine les besoins d'engager des dépenses pour la démarche de prototypage. Les

---

<sup>3</sup> Voir <https://rfid.averydennison.com/en/home/product-finder/dogbone.html>

<sup>4</sup> Voir <https://www.impinj.com/fr/products/readers/impinj-speedway>

antennes RFID de marque Time-7<sup>5</sup> ont également été choisies en raison de la disponibilité d'une grande gamme de leurs produits au Laboratoire IoT, mais répondaient aussi aux besoins du prototype pour la portée et la taille de la zone de capture des données. Un lecteur RTLS<sup>6</sup> passif de marque Impinj xArray a aussi été sélectionné pour couvrir la zone de l'accueil, qui est ouverte sur la salle d'attente. Ce lecteur est bien établi et performant dans des zones commerciales de taille plus réduite, avec sa couverture de 140m<sup>2</sup>, et répond donc amplement aux besoins du prototypage pour la Clinique, étant également disponible au Laboratoire IoT de l'UQÀM. Il est à noter que ces lecteurs et antennes pourraient être modifiés pour la Clinique si d'autres besoins se présentent, toutefois les objectifs du prototype n'étant qu'une exploration de son potentiel, la disponibilité du matériel choisi était l'élément principal de sélection.

### 3.2.3 Développement de l'infrastructure logicielle et outils de modélisation-simulation

Pour le volet de traitement et entreposage des données collectées, la plateforme logicielle ClearStream de PTS<sup>7</sup> est employée pour développer le prototype virtuel (représentation des salles, des points de lecture, etc.) et pour configurer les flux de données. Le choix de cette plateforme logicielle a été motivé par sa rapidité et son aisance d'utilisation sans programmation ainsi que son coût de licence très faible, ce qui facilite le développement efficace de l'aspect logiciel du prototype et répond tout à fait aux besoins de la présente recherche. Toutefois, comme aucune donnée réelle sur la Clinique n'a pu être collectée avec l'infrastructure physique proposée, le prétraitement des données n'est pas élaboré, mais serait effectué via la plateforme de stockage et prétraitement de ClearStream.

Pour la conception du modèle de simulation, qui est nécessaire en vue de représenter et d'étudier le processus opérationnel ainsi que pour générer des tests de scénarios, la méthode de modélisation de simulation à événements discrets de Rossetti (2016) sera suivie : le schéma de la Figure 3.3 présenté ci-après en présente un aperçu. On y retrouve plusieurs éléments similaires à la démarche de conception d'un artefact technologique (Peffer *et al.*, 2007) qui est utilisée pour la conception

---

<sup>5</sup> Voir <https://www.times-7.com/uhf-rfid-antennas/>

<sup>6</sup> Voir <https://www.impinj.com/products/readers/impinj-gateways>

<sup>7</sup> Voir <https://www.ptsmobile.com/rfid-ble-software.htm>



du prototype, mais celle de Rossetti est plus spécifique aux besoins de la simulation pour un système opérationnel avec des événements discrets tel que celui de la Clinique, incluant les tâches et services, l'achalandage, et la gestion des ressources.

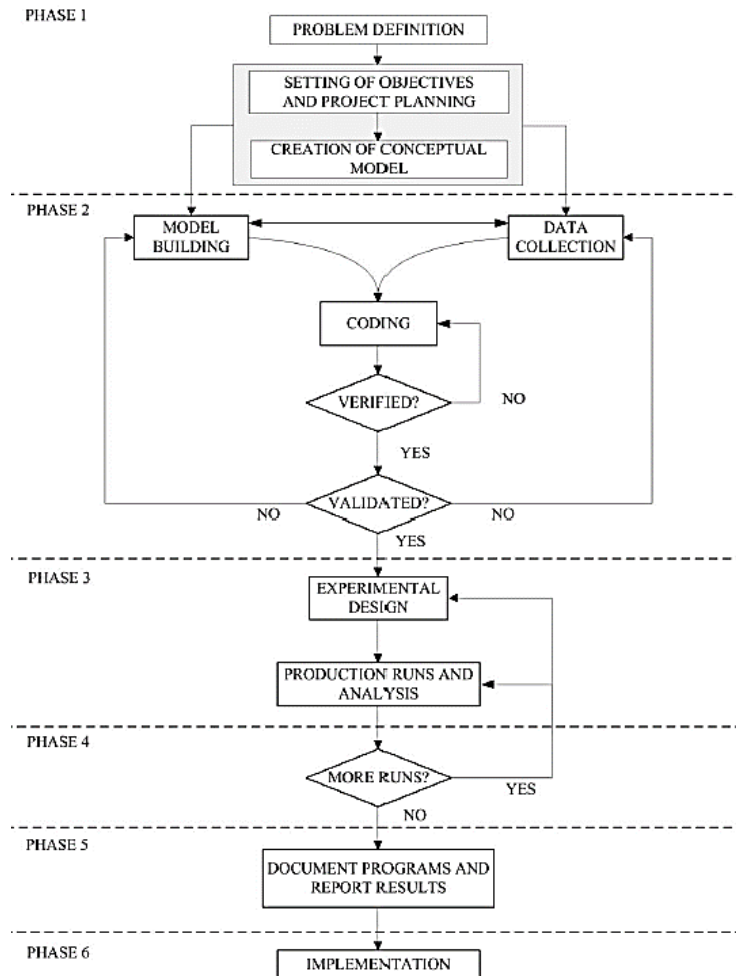


Figure 3.3 - Méthode de conception de modèles de simulation à événements discrets (Rossetti, 2016).

### 3.2.3.1 Phase 1 – Définition fonctionnelle et technique

La première étape de la création du modèle de simulation est la définition fonctionnelle et technique, qui consiste à définir les problèmes du système à modéliser, identifier les objectifs et éléments clés du modèle, et établir un modèle conceptuel avec des hypothèses sur le système modélisé. Un aspect central pour la compréhension de cette étape concerne les deux types de simulation qui seront mobilisés pour la modélisation des processus opérationnels de la Clinique : la simulation à événements discrets (DES) et la simulation basée sur les agents (ABS).

La simulation de type DES se concentre sur les événements spécifiques qui se produisent à des moments précis dans un système opérationnel. En découpant le temps en instants discrets, elle permet l'examen de ces événements afin de comprendre comment ils affectent le fonctionnement global du système. De son côté, la simulation de type ABS se focalise plutôt sur le comportement individuel d'entités autonomes, appelées agents, au sein d'un système. Ce type de simulation permet par exemple de représenter les interactions complexes de personnes entre elles, avec des objets, ou avec leur environnement, mais aussi la modélisation des processus internes de ces agents, comme des changements d'états physiques ou figurés. Les différents éléments du modèle de simulation seront explicités lors de leur conception, abordée au Chapitre 4.

#### 3.2.3.2 Phase 2 – Conception du modèle de simulation

La deuxième étape consiste à modéliser de manière itérative le système à l'étude à l'aide d'un logiciel de simulation, collecter et travailler les données requises, et tester sa validité et sa fiabilité en ce qui concerne le système réel. Afin de modéliser l'ensemble des composantes du système opérationnel et de les lier les unes aux autres, le programme AnyLogic<sup>8</sup> a été retenu pour sa flexibilité de modélisation et de visualisation, mais aussi pour sa capacité à intégrer aisément des bases de données externes, fonction essentielle pour un jumeau numérique.

#### 3.2.3.3 Phases 3 & 4 - Expérimentation et analyse des résultats

Lorsque le modèle est considéré satisfaisant, des tests de scénarios sont effectués afin de tester la performance du modèle et de tester de nouveaux scénarios au besoin. Dans le cadre du prototypage, il s'agira également de réfléchir la capacité du modèle à intégrer des données réelles et à générer des décisions pour les parties prenantes, en considérant un ensemble d'indicateurs de performance.

#### 3.2.3.4 Phases 5 & 6 – Documentation et implémentation

Cette étape consiste à documenter les éléments du modèle et de la démarche de conception pour supporter son implantation et son utilisation. Dans le cas du prototype, celui-ci ne sera pas implémenté complètement, mais son fonctionnement de base sera en revanche illustré.

---

<sup>8</sup> <https://www.anylogic.fr/>

### 3.3 Approche de démonstration, d'évaluation et de communication du prototype

#### Démonstration du prototype de DT :

La démonstration du prototype de jumeau numérique se fera au sein du Laboratoire IoT<sup>9</sup> de l'École des Sciences de la Gestion à l'UQÀM, où la présence d'une partie de l'infrastructure technologique nécessaire se trouve déjà et permettra de tester le fonctionnement du modèle. Les capacités envisagées de notre prototype de DT seront limitées, mais permettront d'évaluer le potentiel de la solution sur la performance des opérations de la clinique.

#### Approche pour l'évaluation de la performance du prototype :

Étant donnée la portée limitée de cette partie de notre projet de recherche, l'évaluation du prototype ne pourra pas se faire dans la Clinique, et donc seule une évaluation critique des capacités hypothétique du prototype sera possible, mais aucune évaluation technique ne sera effectuée.

#### Communication de la recherche et des résultats :

Afin de communiquer les résultats de la présente recherche, des articles et présentations sont déjà acceptés ou prévus. Un article de conférence concernant la démarche de modélisation et les objectifs du prototype en réponse au contexte de la Clinique a été soumis et présenté à l'*International Multidisciplinary Modeling & Simulation Multiconference* du 18 au 20 septembre 2023<sup>10</sup>, avec le support de la revue de littérature effectuée pour le secteur de la santé. Un autre article est également en cours de rédaction concernant la revue de littérature et la typologie proposée des jumeaux numériques en santé, mais n'a toutefois pas encore été soumis.

---

<sup>9</sup> <https://labiot.uqam.ca/>

<sup>10</sup> Arcand A., Maïzi Y., Bendavid Y. (2023). A Digital Twin Prototype for an Addiction Treatments Clinic, The 20th International Multidisciplinary Modeling & Simulation Multiconference - I3M 2023 – accepté, juin 2023.

## **CHAPITRE 4**

# **CONCEPTION ET DÉVELOPPEMENT DU PROTOTYPE DE JUMENT NUMÉRIQUE**

Ce chapitre présente dans un premier temps la démarche de conception de deux composantes du jumeau numérique pour la Clinique Relais, soit (i) le modèle de simulation pour représenter la dynamique de cette clinique avec les données initialement disponibles, formant un DT de niveau de maturité 2, et (ii) l'infrastructure IoT proposée pour la capture et le traitement des données en temps réel, afin d'augmenter la performance et le niveau de maturité du DT. Dans un deuxième temps, les résultats issus du modèle de simulation, leur analyse et l'ajout de la perspective IoT seront présentés afin d'offrir une perspective de progression à la Clinique dans l'optique de l'offensive de Dossier Santé Numérique (DSN) pour le RSSSQ.

### **4.1 La composante simulation pour le prototype de DT de la clinique**

Cette section présente la démarche de conception du modèle de simulation pour le prototype de DT de la Clinique Relais. La section 4.1.1 aborde la définition fonctionnelle et technique du modèle de simulation visé, tandis que la section 4.1.2 présente les résultats de la conception du modèle et des tests de scénarios effectués, ainsi qu'une évaluation de la portée du modèle tel que proposé.

#### **4.1.1 Définition fonctionnelle et technique du modèle de simulation**

Cette section présente les éléments clés nécessaires à la conception du modèle de simulation. Les sous-sections 4.1.1.1 et 4.1.1.2 détaillent le fonctionnement des opérations de base de la Clinique telles que communiquées par les ressources et données consultées. La sous-section 4.1.1.3 présente les scénarios pour la modélisation ainsi que les indicateurs de performance à évaluer. La sous-section 4.1.1.4 aborde les ajouts conceptuels requis pour mettre en œuvre les scénarios et indicateurs de performance identifiés, tandis que 4.1.1.5 présente les composantes et approches retenues pour le modèle de simulation. Finalement, la sous-section 4.1.1.6 détaille les hypothèses et présupposés nécessaires à la modélisation des éléments inconnus du système de la Clinique.

#### 4.1.1.1 Les processus opérationnels de base de la Clinique

La prise en charge des usager·ère·s correspond à au moins un besoin particulier parmi les suivants : le renouvellement de leur ordonnance de TAO, un suivi de relation d'aide psychosociale, un examen ou un traitement médical, une injection de narcotiques sous supervision, ou un accompagnement éducationnel. La Figure 4.1 ci-dessous présente une cartographie simple non standardisée des étapes principales de la prise en charge des usager·ère·s ainsi qu'un plan de la Clinique donnant un aperçu du déplacement des usager·ère·s dans le processus.

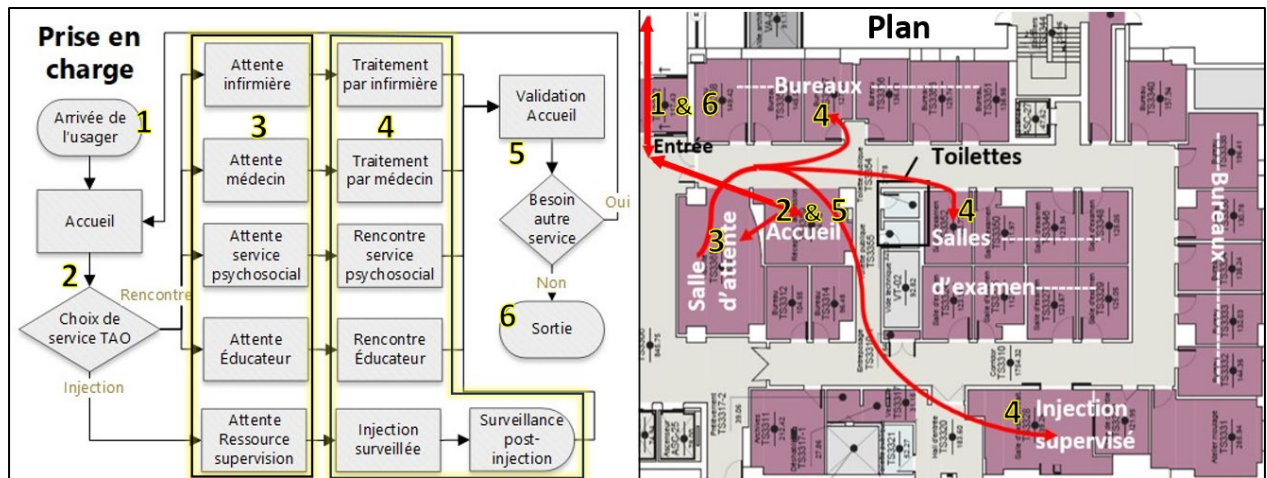


Figure 4.1 - Processus de prise en charge des usager·ère·s (gauche) et plan de la Clinique (droite)

La prise en charge physique des usager·ère·s représente le principal processus de services pour lequel des données sont disponibles, mais la Clinique peut également recevoir des appels entrants, qui sont transférés à la personne ressource correspondante. Il est considéré que les appels sont pris par l'une des ressources intervenantes directement, autrement l'appel « attend » dans la boîte vocale de l'intervenant·e. La Figure 4.2 ci-dessous illustre ce processus simplifié de prise d'appel.

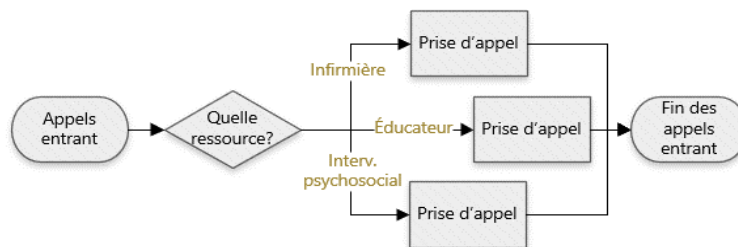


Figure 4.2 - Processus de prise en charge des appels entrants de la Clinique

Ce sont là les deux processus de base pour lesquels des données étaient disponibles, mais les informations sur les scénarios proposés en sous-section 4.1.1.3 présenteront d’autres processus.

#### 4.1.1.2 Les intrants et données connues du modèle

Certaines informations et données concernant le système de la Clinique ont pu être recueillies à partir du système de saisie de statistiques de la Clinique, ou bien ont été colligées manuellement par Guillaume Anctil lorsqu’il travaillait pour la Clinique. Toutes les données reçues avaient déjà été anonymisées par Guillaume, et aucune information communiquée par Shany Lavoie ne concernait un·e usager·ère ou employé·e de la Clinique, elles étaient purement opérationnelles. Le Tableau 4.1 qui suit présente un résumé des données colligées concernant l’achalandage, le choix, et la durée des services<sup>11</sup> de la Clinique Relais à partir de leur système informatisé de statistiques.

Tableau 4.1 – Répartition de l’achalandage, des choix de services, et des temps de traitement de la Clinique Relais (19/05/2021 – 18/05/2022)

Nombre moyen d’usagers par jour					
<i>Jour</i>	Lundi	Mardi	Mercredi (fermés AM)	Jeudi	Vendredi
<i>Services / jour</i>	32,22	33,89	24,44	33,40	27,94
Nombre de service par usager					
<i>Nb. Services</i>	1	2	3	4	5+
<i>% des usagers</i>	68,45%	24,70%	5,63%	0,98%	0,24%
<i>Choix de service</i>	Éducateur	Infirmière	Injection supervisée	Médecin	Interv. psychosocial
<i>% des usagers</i>	7,55%	33,64%	2,66%	30,46%	25,68%
<i>Distribution des temps de traitement (hr)</i>	Lognormal (0,55 ; 0,491)	Weibull (0,457; 1,99)	Beta (1,91 ; 15,5 ; 0 ; 5)	Discrète (70%: 0,17 ; 30%: 0,5)	Gamma (0,211 ; 2,45)
<i>Moyenne (hr)</i>	0,57	0,49	0,72	0,27	0,57

À noter qu’outre le nombre de personnes par jour, il n’y avait pas de différences visibles entre les jours de semaine pour les données et statistiques colligées. En ce qui concerne les ressources, le Tableau 4.2 qui suit présente les ressources de la Clinique en date du 18 mai 2022, moment où la majeure partie des données quantitatives utilisées ont été extraites.

<sup>11</sup> Les temps de traitement sont présentés sous forme de distributions statistiques qui représentent approximativement la répartition des temps de traitements issus des données de la Clinique.

Tableau 4.2 - Ressources humaines et locaux de services de la Clinique

Ressources humaines		Nombre de locaux disponibles	
Éducateurs	2	Bureaux de rencontres	10
Intervenants psychosociaux	5	Salles d'examen	8
Infirmières	5	Postes d'injection (1 salle)	4
Médecins	1	Salle d'attente	1
Ressource administrative	1	Bureau d'accueil	1
		Toilettes	2

Comme l'achalandage varie d'un jour à l'autre et qu'il semble être basé sur différents facteurs, dont plusieurs inconnus, la simulation sera effectuée sur une seule journée, le lundi, afin de faciliter la répliquabilité et de circonscrire les résultats à un moment spécifique. Le nombre quotidien d'appels entrants était disponible pour une période de cinq semaines, mais leur répartition était inconnue : ceux-ci ont donc été répartis également sur un horaire de 9h à 17h, puisque beaucoup de services et de travailleurs fonctionnent sur cet horaire, mais aussi parce que cela permet de répliquer l'idée d'une boîte vocale et d'appels issus de la veille ou du matin. L'achalandage horaire des usager·ère·s est basé sur l'achalandage des lundis pondéré avec l'achalandage moyen de la semaine. La répartition horaire des arrivées est présentée dans le Tableau 4.3.

Tableau 4.3 - Répartition horaire de du taux d'arrivée des usager·ère·s et des appels entrants par heure

Heure	10:00 - 11:00	11:00 - 12:00	12:00 - 13:00	13:00 - 14:00	14:00 - 15:00	15:00 - 16:00	16:00 - 17:00	17:00 - 18:00	Moy. /jour
Usagers /hr	7,85	2,25	0	7,04	5,13	6,59	3,36	0	32,22
Appels/hr	8	4	4	4	4	4	4	0	32

Malgré ces données, il manque encore de nombreux paramètres pour modéliser adéquatement la Clinique. Il s'agit donc d'abord de déterminer les scénarios d'intérêt et les indicateurs de performance à calculer, qui eux permettront d'établir des hypothèses de travail pour concevoir le modèle de simulation et atteindre les objectifs de modélisation.

#### 4.1.1.3 Scénarios et indicateurs de performance de la Clinique

Il y a présentement un problème majeur d'invisibilité des informations et des données dans la Clinique, ce qui rend difficile la mise en place d'améliorations puisque la Clinique elle-même a du mal à évaluer ses opérations. Le premier scénario est donc un modèle de base qui représente la Clinique telle que les chiffres la laissent paraître avec la capacité apparente du système actuel. Les

indicateurs de performance à retenir dans ce cas sont ceux qui sont liés aux statistiques saisies présentement concernant la durée des rencontres, c'est-à-dire :

- Le temps moyen de séjour à la Clinique des usager·ère·s, considérant que nous avons déjà le temps par type de service pour chaque usager·ère, mais pas de mesure incluant également les temps d'attente et de déplacement.
- Le temps occupé des ressources intervenantes, mais pas administratives puisqu'aucune information n'est disponible.
- Le temps d'attente moyen pour être pris en charge par la ressource désirée.

Le deuxième scénario proposé consiste à intégrer toutes les informations qui permettraient de représenter la dynamique de la Clinique plus fidèlement, incluant des opérations plus détaillées et les difficultés rencontrées par ses intervenant·e·s, mais aussi un modèle qui puisse montrer l'utilité de l'IoT pour obtenir de nouvelles données et émettre des prédictions en continu, et ce, en temps réel. Les indicateurs de performance proposés pour initier cette démarche de collecte, d'identification et de reconnaissance du travail invisible effectué sont les suivants :

- Le temps dédié aux interventions spéciales auprès des usager·ère·s, soit lors de crises d'agressivité ou de surdoses.
- Le délai avant le traitement des surdoses causées par une injection non supervisée.
- Le temps de travail réel des employé·e·s considérant les charges additionnelles de notes évolutives, d'appels externes sortants et les services personnalisés aux usager·ère·s.

Ces indicateurs requièrent un travail de modélisation plus compliqué, puisque les délais et calculs liés aux interventions spéciales sont intrinsèquement liés aux états psychologiques et physiologiques des usager·ère·s et des employé·e·s : ceux-ci devront donc être modélisés, et seront abordés dans la sous-section qui suit. Une modélisation appropriée de ces phénomènes devrait également permettre de calculer des délais et temps de traitement correspondants en termes d'opérations pour mieux évaluer les risques et enjeux de la Clinique.

En ce qui concerne la charge clinique et administrative présentement « invisible », il s'agit surtout de modéliser des tâches qui s'ajoutent à chaque fois qu'il y a un contact avec une personne externe, que ce soit via la prise en charge des usager·ère·s ou les appels entrants. À cet effet, la sous-section ci-dessous aborde l'ensemble des modèles conceptuels additionnels requis pour la modélisation du



scénario de base et du scénario plus réaliste, la seule différence notable entre les scénarios étant l'ajout des tâches cliniques et administratives, les autres composantes étant comptées dans les tâches déjà visibles, mais sans être bien comptabilisées.

#### 4.1.1.4 Ajouts conceptuels : le facteur humain et les services indirects dans la Clinique

Cette sous-section traite des modèles conceptuels qui semblent jusqu'ici ignorés par la Clinique dans la gestion et l'étude de ses opérations et doivent être ajoutés au modèle de simulation de base. En parallèle des processus de prise en charge des usager·ère·s et des appels, les usager·ère·s en attente de service peuvent également aller aux toilettes : bien que l'action en elle-même ait peu d'importance, c'est là qu'ils peuvent parfois procéder à une injection de narcotiques, ce qui peut entraîner une surdose. Ainsi, la Figure 4.3 ci-dessous illustre le processus de visite aux toilettes qui peut être accompagnée ou non d'une injection.

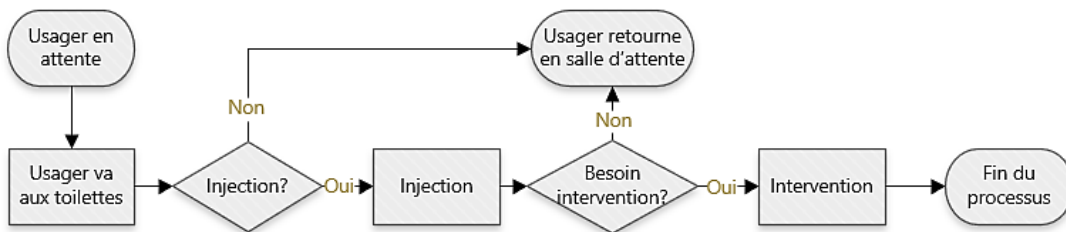


Figure 4.3 – Schéma du processus de visite aux toilettes avec potentielle injection de narcotiques

Dans le cas d'une surdose ou d'un autre type de situation à haut risque comme la crise d'agressivité d'un·e usager·ère, une intervention spéciale est requise de la part des employé·e·s. La Figure 4.4 qui suit montre un modèle conceptuel simplifié de ce processus d'intervention.

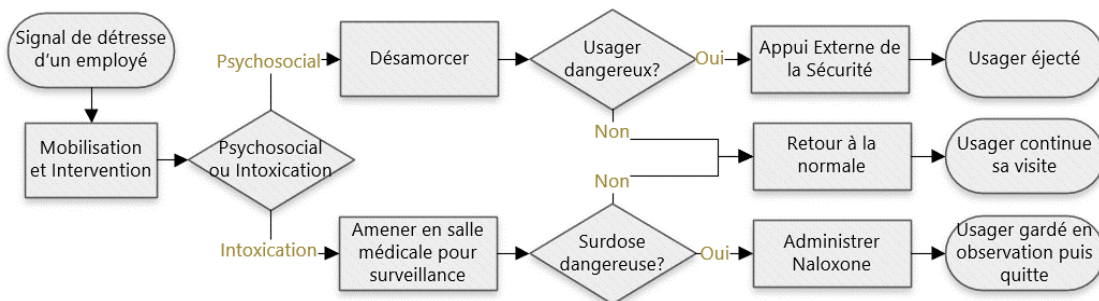


Figure 4.4 – Schéma du processus d'intervention auprès d'usager·ère·s agressifs ou en surdose

Les deux processus qui viennent d'être présentés ont une relation intime avec les états psychologiques et physiologiques des usager·ère·s et des intervenant·e·s. En effet, ces états sont à la source des besoins d'interventions par les employé·e·s, et donc des perturbations dans les opérations régulières, mais jouent aussi énormément sur le bien-être des usager·ère·s et des employé·e·s, ayant un effet délétère sur celles- et ceux-ci. Ces changements d'états psychologiques ou physiologiques sont connus informellement des intervenant·e·s, mais ne sont ni représentés, ni étudiés formellement par la Clinique. La Figure 4.5 ci-dessous présente les deux schémas reliés aux états internes des usager·ère·s, c'est-à-dire l'état mental lié à l'agitation ou l'agressivité et l'état d'intoxication physiologique des usager·ère·s.

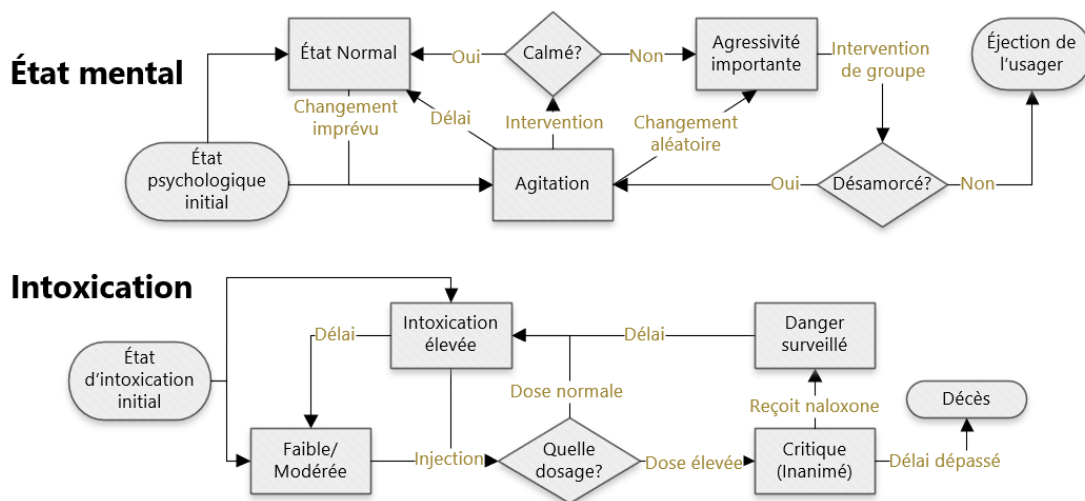


Figure 4.5 - Schémas conceptuels des états mentaux et des états d'intoxication des usager·ère·s

Les deux schémas ci-dessus représentent une approximation des états internes réels des usager·ère·s, et permettent de représenter les causes et conséquences reliées aux changements d'états mentaux et physiologiques des usager·ère·s. Les états qui représentent le plus de risques sont respectivement l'état psychologique d'agressivité importante ainsi que l'état physiologique d'intoxication critique, lié à une surdose potentielle. Il s'agit de deux éléments majeurs d'influence sur les opérations de la Clinique, d'autant plus que sa mission concerne spécifiquement la santé mentale et la dépendance aux opioïdes des usager·ère·s. En conséquence, le schéma de la Figure 4.6 qui suit présente une représentation simplifiée de la boucle des états de perception de sécurité par les employé·e·s de la Clinique lors de rencontres ou d'interventions.

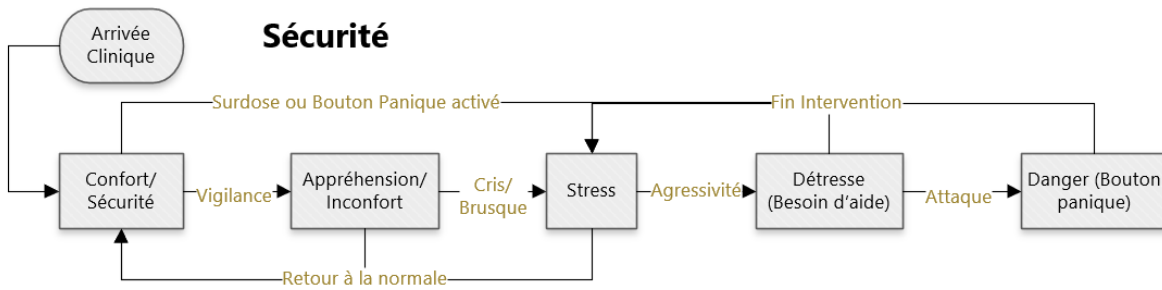


Figure 4.6 - Schéma simplifié de la perception interne de sécurité des employés

Ces changements d'états surviennent en fonction des rencontres, des interventions, et de l'état des usagers. L'objectif de ce modèle d'états internes étant de représenter la charge mentale exercée sur les employés et de montrer les éléments qui mènent à des interventions de degrés d'intensité variés. Finalement, le dernier ajout est la modélisation des tâches additionnelles pour les intervenants, dont la Figure 4.7 ci-dessous l'ajout à une infirmière :

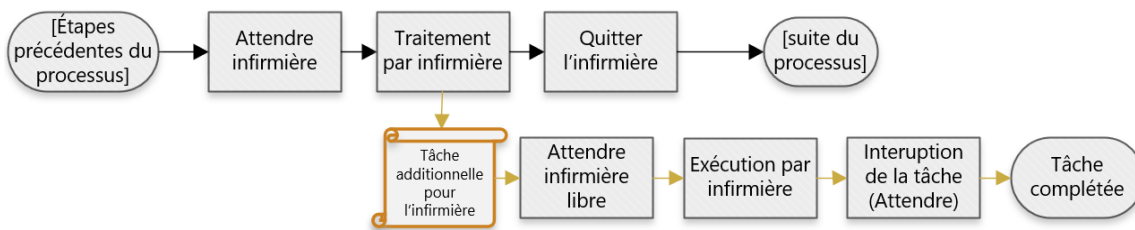


Figure 4.7 - Schéma conceptuel de l'ajout de tâches cliniques ou administratives après un service

Ce schéma illustre également la nature indirecte et non-urgente de ces tâches, qui sont donc traitées en dernière priorité, et c'est un peu là l'idée des tâches connexes. À cet effet, le schéma de la Figure 4.8 suivante illustre justement l'attribution de la priorité et le caractère interruptible des tâches principales des opérations qui sont modélisées pour la Clinique.

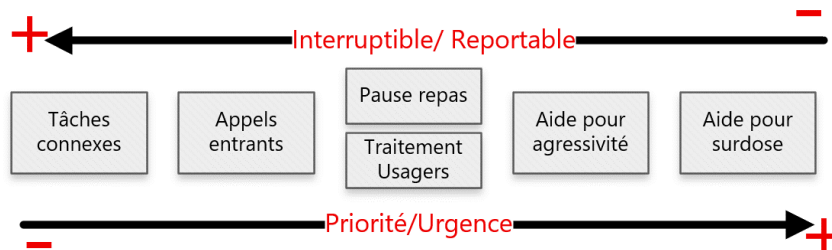


Figure 4.8 - Priorité des tâches dans le processus opérationnel de la Clinique

Les tâches présentées auront donc une priorité correspondante dans le modèle, les tâches usuelles primant sur les tâches administratives externes, mais sont mises de côté en cas d'urgence.

#### 4.1.1.5 Définition du système à modéliser et approches de simulation retenues

Le système complet à modéliser inclut donc l'ensemble des modèles conceptuels, les intrants et données abordés depuis le début de ce chapitre. Tel que mentionné dans le cadre méthodologique du chapitre 3, les modélisations de type ABS et DES sont essentielles pour la représentation des opérations et des différentes personnes dans la Clinique Relais. La combinaison des deux approches permet une analyse plus détaillée de la performance des services grâce à une perspective plus fine et complète sur l'évolution des agent·e·s du système et sur les opérations qui y sont liées. Dans cette optique, le tableau 4.4 présente les composantes du modèle de simulation et leurs caractéristiques principales.

Tableau 4.4 - Composantes du modèle de simulation, tous scénarios confondus

Composantes	Éléments principaux	Approche
<b>Prise en charge des usager·ère·s</b>	Étapes du service et durées des traitements, déplacement des usager·ère·s, allocation des ressources.	DES
<b>Prise des appels</b>	Allocation des ressources, durée des appels.	DES
<b>Interventions spéciales</b>	Saisie des ressources, étapes des interventions spéciales, interruption des autres services.	DES
<b>Ajout de tâches connexes</b>	Saisie de ressources, ajout d'une tâche additionnelle par rencontre ou appel clinique effectué.	DES
<b>Visite/injection aux toilettes</b>	Visite aux toilettes, décision et étapes d'injection, vérification du bien-être par les ressources.	DES
<b>Sécurité perçue des intervenant·e·s</b>	Changements de perception de sécurité, envoi de messages aux collègues et usager·ère·s.	ABS
<b>État mental des usager·ère·s</b>	Changements des états psychologiques des usager·ère·s, envoi de messages aux intervenant·e·s.	ABS
<b>Intoxication des usager·ère·s</b>	Changement de l'état physiologique des usager·ère·s, messages aux intervenant·e·s en cas de surdose.	ABS

#### 4.1.1.6 Les hypothèses du système

De nombreuses hypothèses restent manquantes pour parvenir à modéliser la Clinique dans toute sa complexité, entre autres concernant les enjeux plus humains tels que les états mentaux et physiologiques, mais aussi les opérations plus secondaires ainsi que les tâches connexes de nature clinique et administrative.

À cet effet, le Tableau 4.5 suivant présente les hypothèses liées aux paramètres qui concernent les opioïdes et l'agressivité. Le Tableau 4.6 qui le suit s'attarde quant à lui plutôt sur les hypothèses liées aux processus opérationnels de la Clinique.

Tableau 4.5 - Hypothèses des changements psychologiques ou physiologiques des usager·ère·s

Paramètre	Hypothèse	Raison
<b>Durée d'effet des opioïdes</b>	1h00 d'intoxication de niveau élevée s'il n'y a pas de surdose.	Estimation liée aux données sur l'héroïne <sup>12</sup> .
<b>Risque de surdose</b>	20% de chance de tomber dans un état critique immédiatement après injection.	Présence de fentanyl dans les drogues et fragilité des usager·ère·s (santé physique et mentale), augmentent les risques. % élevé = plus de données.
<b>Risque de décès</b>	Décès après une durée située entre 20 et 60 minutes sans intervention.	Le fentanyl peut tuer en 2 minutes <sup>13</sup> , les autres opioïdes en 1-3 heures <sup>14</sup> , les usager·ère·s sont à haut risque.
<b>Naloxone</b>	45 à 90 secondes pour injecter le naloxone, 2 à 4 heures de surveillance requise par la suite.	Produit à injection, action et arrêt rapides. Surveillance ou transfert à l'hôpital requis à la suite de son administration <sup>15</sup> .
<b>Agitation</b>	Environ 20% d'usager·ère·s agité·e·s.	L'effet de manque et la consommation à long terme sont liés à l'instabilité affective et mentale.
<b>Agressivité</b>	Environ 1-2% de cas d'agressivité plus grave dans les usager·ère·s.	

<sup>12</sup> Informations gouvernementales sur l'héroïne <https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/dependance-aux-drogues/drogues-illicites-et-reglementees/heroine.html>

<sup>13</sup> Informations sur le fentanyl <https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/dependance-aux-drogues/drogues-illicites-et-reglementees/fentanyl.html>.

<sup>14</sup> Informations sur les surdoses d'opioïdes du département de la santé de l'État de New York [https://www.health.ny.gov/diseases/aids/general/opioid\\_overdose\\_prevention/overdose\\_facts.htm](https://www.health.ny.gov/diseases/aids/general/opioid_overdose_prevention/overdose_facts.htm).

<sup>15</sup> Informations sur l'utilisation de la naloxone du Guide canadien des antidotes <https://www.ciuss-capitalenationale.gouv.qc.ca/antidotes/naloxone-en-centre-hospitalier>.

Tableau 4.6 - Hypothèses de modélisation pour les éléments quantitatifs principaux manquants

Paramètre	Hypothèse	Raison
<b>Durée de traitement : ressource de l'accueil</b>	Temps d'accueil estimé entre 2 et 3 min, validation 1 à 2 min.	Peu d'achalandage, pas de rôle clinique ou de saisie de stats, dossiers à chercher et ranger.
<b>Durée des appels téléphoniques</b>	Le même temps que le traitement des usager·ère·s en Clinique.	On considère des caractéristiques similaires faute de données sur ces appels.
<b>Distribution des appels téléphoniques</b>	Proportionnel au choix de service, mais sans l'injection et le médecin.	Médecins en rotation, peuvent déléguer les dossiers critiques à l'infirmière clinicienne.
<b>Tâches connexes : Intervenant·e psychosocial·e</b>	1,5x le temps de traitement en moyenne.	Obligation professionnelle d'écrire des rapports, notes évolutives <sup>16</sup> et plans d'intervention.
<b>Tâches connexes : Infirmier·ère et médecin</b>	1x le temps de traitement respectif en moyenne.	Obligation professionnelle de notes de dossiers <sup>17</sup> , plans de traitements médicaux.
<b>Tâches en plus : Éducateur·rice</b>	0,5x le temps de traitement en moyenne.	Pas d'obligations professionnelles, mais doivent néanmoins laisser des traces.
<b>Besoin de la toilette</b>	Environ 20% des usager·ère·s, 2-5 min.	Le temps et le % sont des estimations.
<b>% et durée d'injection aux toilettes</b>	20% des usager·ère·s allant aux toilettes, durée TRIA(2,5,10) min.	La durée avant l'injection est estimée, le % élevé est pour obtenir suffisamment de données pour analyse.
<b>Délai de vérification par un·e intervenant·e</b>	2 à 5 min avant qu'un·e intervenant·e s'inquiète, 2 à 4 minutes avant une réponse ou forcer la porte.	Estimé à partir de ce que Shany Lavoie a communiqué, avant qu'un·e intervenant·e ou autre usager·ère remarque l'absence prolongée.

Les tableaux présentés résument les hypothèses quantitatives principales liées au fonctionnement du modèle et les raisons qui supportent ces hypothèses. D'autres hypothèses importantes et plus génériques sont assumées concernant la validité et la fidélité du modèle de la Clinique ainsi que des résultats obtenus. Ces hypothèses sont les suivantes :

- La ressource administrative est considérée comme non restrictive de la capacité, aucune information n'a été obtenue à ce sujet. Sa charge est donc limitée à moins de 50%.
- Les services reçus par un·e usager·ère sont indépendants et requièrent de saisir et relâcher la ressource à chaque reprise.
- L'infirmier·ère clinicien·ne de la Clinique est considéré·e comme un·e infirmier·ère, puisqu'aucune donnée n'est disponible concernant son travail spécifique.
- Les mécanismes de changement des états internes des usager·ère·s et ressources ne sont pas fidèles à la réalité, mais les changements qu'ils provoquent sont représentatifs.

<sup>16</sup> Voir <https://numerique.banq.qc.ca/patrimoine/details/52327/4048119> en page 36 pour les obligations des travailleurs sociaux sur les notes évolutives, [https://cdn.ca.yapla.com/company/CPYUnpNsL3t4Kl7wd5yIo2fxq/asset/files/\\_Guides-sexo/guide-tenue-dossiersvf.pdf](https://cdn.ca.yapla.com/company/CPYUnpNsL3t4Kl7wd5yIo2fxq/asset/files/_Guides-sexo/guide-tenue-dossiersvf.pdf) en page 13 pour les obligations des sexologues.

<sup>17</sup> Voir <https://numerique.banq.qc.ca/patrimoine/details/52327/3660034> en page 13 pour les obligations concernant les notes de dossiers issues par le Conseil des Infirmières et Infirmiers et par le Collège des Médecins.

- Les distributions statistiques utilisées sont des approximations représentatives de la réalité.
- La clinique ouvre à 10h et vide progressivement son système vers 17h30.
- Un nombre suffisant de répliques aléatoires des simulations devrait permettre d'obtenir des résultats plus généralisables à la Clinique.

Ces hypothèses encadrent ainsi le fonctionnement du modèle construit, qui est présenté dans la section qui suit avec les résultats issus des scénarios. Ces hypothèses ne sont pas exhaustives, mais sont les plus essentielles pour la conception du modèle.

#### 4.1.2 Le modèle de simulation issu de la démarche de conception

Bien que présentées de manière séquentielle, la définition fonctionnelle et technique ainsi que la conception du modèle de simulation sont intimement reliées, et passent toutes deux par une démarche itérative. Les modifications apportées lors de la modélisation ont déjà été intégrées dans la section précédente, et donc seul le modèle final est présenté ici pour des raisons de simplification. Il est toutefois à noter que le mécanisme d'intervention auprès des usager·ère·s agité·e·s ou agressif·ve·s a été simplifié par rapport à l'objectif initial, le but étant surtout de capturer le temps utilisé par les ressources et la capacité du prototype à représenter ces interventions, tandis qu'il est moins pertinent de représenter la démarche exacte qui de toute manière n'est pas connue.

##### 4.1.2.1 Présentation du modèle de simulation de la clinique

Outre les composantes fonctionnelles du modèle présentées dans la définition fonctionnelle et technique en sous-section 4.1.1.5, le modèle comporte également des composantes intermédiaires qui sont aussi nécessaires à la modélisation, la visualisation, et la réplique des opérations pour obtenir des statistiques interprétables. La Figure 4.9 qui suit montre les composantes intermédiaires de modélisation et de visualisation des opérations

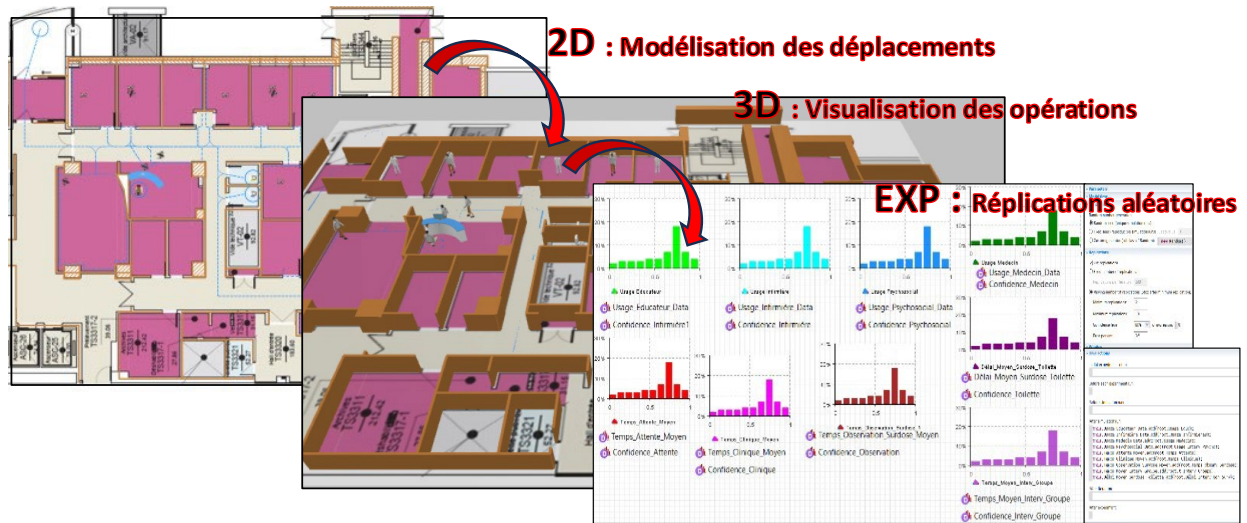


Figure 4.9 - Composantes intermédiaires de modélisation et visualisation pour le modèle de simulation

Par ailleurs, la Figure 4.10 à la page suivante montre les principales composantes fonctionnelles du modèle de simulation décrites précédemment. Toutes les composantes indiquées dans la Figure 4.10 font partie des deux scénarios modélisés à l'exception de la composante #5, qui elle se trouve uniquement dans le scénario B. Les objectifs en termes de modélisation semblent d'ailleurs avoir été atteints : les processus opérationnels semblent représenter de manière fiable la réalité telle que décrite par Guillaume Anctil et Shany Lavoie, mais correspond aussi aux données historiques obtenues. En conséquence, ce qui est le plus intéressant en regard du modèle sont les résultats qui sortent des scénarios et des réplications aléatoires. Les résultats détaillés des réplications sont présentés en ANNEXE C, mais la sous-section qui suit présente un aperçu des résultats et les interprétations qui peuvent en ressortir.



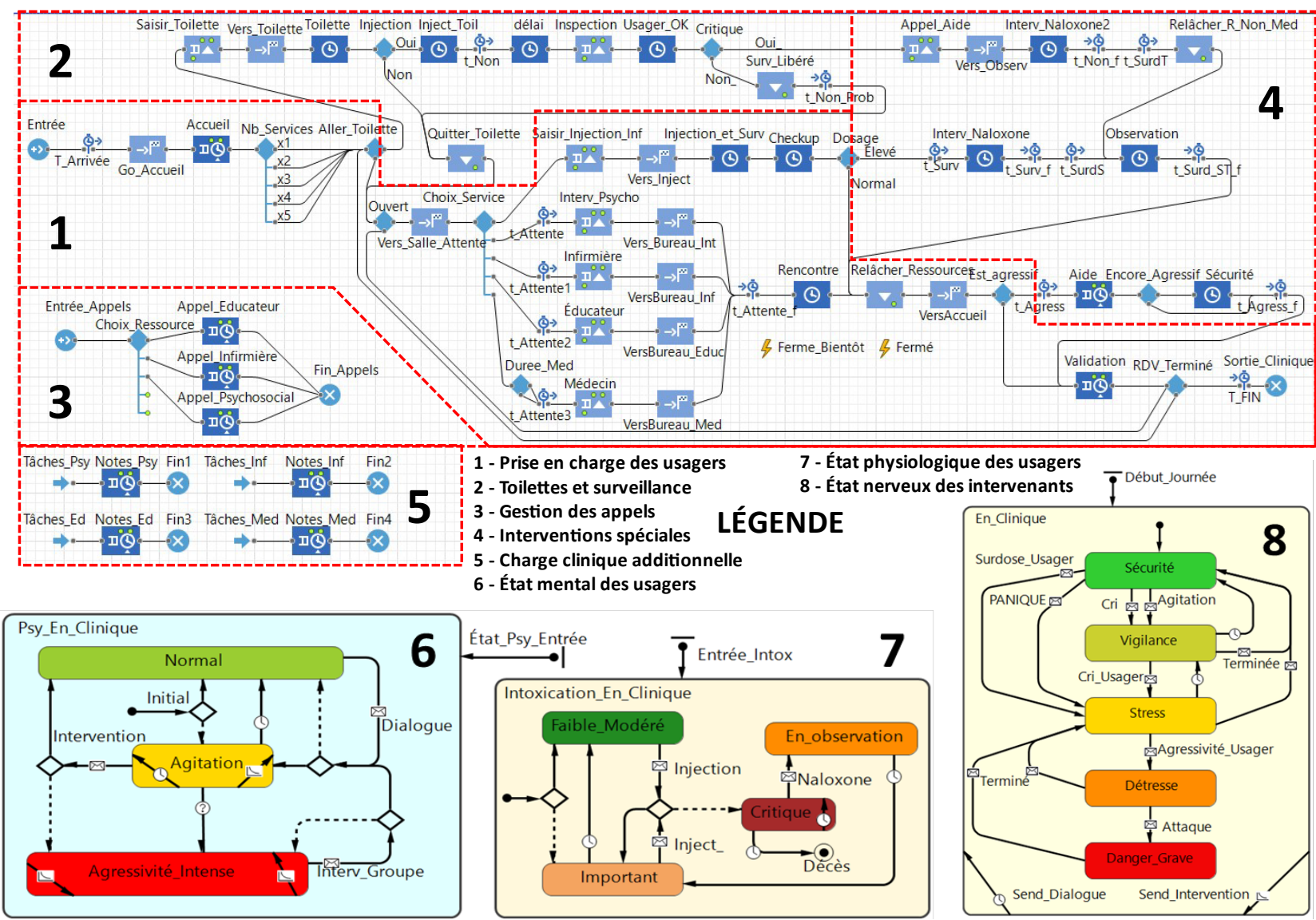


Figure 4.10 - Modèle de simulation avec ses composantes fonctionnelles

#### 4.1.2.2 Présentation des résultats des scénarios

Afin d'obtenir des résultats interprétables à partir du modèle de simulation, chaque scénario a été répliqué 500 fois avec des paramètres aléatoires différents, produisant ainsi des résultats d'étendue variable qui permettront de produire des indicateurs de performances représentatifs des situations variées de la Clinique. Le Tableau 4.7 qui suit présente un résumé des statistiques issues des opérations régulières, incluant le temps d'observation des usagers en surdose, qui peuvent être issus autant d'injections supervisées que non supervisées.

Tableau 4.7 - Résumé des résultats d'opérations régulières obtenus avec intervalles de confiance<sup>18</sup>

Statistiques		Scénario de base		Scénario avec tâches connexes	
		Résultat	IC (95%)	Résultat	IC (95%)
Utilisation de la ressource	<i>Éducateurs</i>	56,2%	+/- 1,9%	78,2%	+/- 1,9%
	<i>Infirmières</i>	39,3%	+/- 1,2%	76,3%	+/- 1,8%
	<i>Intervenant psychosocial</i>	38,1%	+/- 1,2%	79,7%	+/- 1,7%
	<i>Médecin</i>	53,4%	+/- 1,7%	80,6%	+/- 1,7%
Temps moyen	<i>Attente de RDV</i>	6,6 min	+/- 0,42 min	6,9 min	+/- 0,48 min
	<i>Passage en Clinique</i>	1,07 hrs	+/- 0,017 hr	1,08 hr	+/- 0,017 hr
	<i>Observation des surdoses</i>	0,91 hrs	+/- 0,107 hr	0,902 hr	+/- 0,107 hr

Un coup d'œil à ces résultats illustre surtout la portée de l'obtention des informations additionnelles sur les opérations. Dans le scénario A, les ressources peuvent avoir l'air peu occupées avec des taux d'utilisation des ressources qui oscillent entre 38% et 56%. Le temps passé dans la Clinique ainsi que le temps dédié à l'attente d'une ressource sont satisfaisants, et l'observation des surdoses est surtout pour illustrer la pertinence de cette information additionnelle. Le scénario B révèle toutefois qu'avec sensiblement les mêmes temps moyens pour les usagers, les ressources sont beaucoup plus occupées à cause de tâches connexes actuellement invisibles. Le Tableau 4.8 suivant présente les données sur les interventions spéciales, qui de leur côté ne sont pas affectées par l'ajout de tâches connexe, interrompues pour les urgences.

<sup>18</sup> Marge d'erreur du résultat. Par exemple, une moyenne de 1,07 heure avec une IC (95%) de +/- 0.017hr indique qu'on est à 95% certain que le résultat est entre 1.053 heure et 1.087 heure.

Tableau 4.8 – Ventilation de la durée des interventions spéciales par les intervenant·e·s

Durée d'intervention pour agressivité			Délai avant traitement d'une surdose non supervisée		
Intervalle (hrs)	Nb. de simulations		Intervalle (hrs)	Nb. de simulations	
	Scénario A	Scénario B		Scénario A	Scénario B
0 - 0,1	376	384	0 - 0,1	357	345
0,1 - 0,2	63	64	0,1 - 0,2	140	154
0,2 - 0,3	39	36	0,2 - 0,3	1	1
0,3 - 0,4	17	10	0,5 - 0,6	1	0
0,4 - 0,5	5	6	0,9 - 1	1	0
Moyenne :	0,054 +/- 0,009	0,049 +/- 0,009	Moyenne :	0,046 +/- 0,007	0,047 +/- 0,006

Malgré leur rareté, les opérations spéciales ont un impact important sur le bien-être des usager·ère·s et employé·e·s, et les données sont donc importantes. Bien que la moyenne de 0,05 heure par jour pour les interventions avec des usager·ère·s agressif·ve·s semble peu influente, cela ne représente pas la durée réelle des interventions, qui oscille plutôt entre 6 et 30 min lorsqu'elles surviennent. Le nombre de cas d'agressivité est de peu d'importance ici puisqu'il est issu de paramètres 100% fictifs, mais avec l'ajout de données IoT sur ces interventions, il serait possible de les intégrer aux prévisions et d'estimer l'influence qu'elles ont sur les opérations.

Il en va de même pour la détection des surdoses. Celles-ci seraient détectées entre 0 et 12 minutes après le passage à l'état critique, ce qui semble peu à première vue. Toutefois, le fentanyl pur peut tuer en 2 minutes seulement<sup>19</sup>, contre jusqu'à 1 à 3 heures pour d'autres opioïdes. Sachant que le fentanyl se retrouve de plus en plus dans les drogues de rue, ces 12 minutes avant une première action peuvent être cruciales. À ce titre, une intervention plus rapide serait bienvenue, tout comme un système évitant que les interventions critiques dépendent autant de la surveillance continue par les collègues. À ce titre, le sous-chapitre suivant présente la deuxième partie du prototype, soit l'infrastructure IoT, qui permettrait de capturer des données en temps réel, d'alimenter la Clinique en informations dont elle ne dispose présentement pas, et de réagir plus rapidement en cas de besoin.

---

<sup>19</sup>Informations sur le fentanyl <https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/dependance-aux-drogues/drogues-illicites-et-reglementees/fentanyl.html>.

## 4.2 La composante IoT pour le prototype de DT de la clinique

Ce sous-chapitre détaille l'infrastructure IoT proposée pour le prototype de DT de la Clinique, l'objectif étant surtout de montrer le potentiel de l'IoT dans la situation, autant pour nourrir le modèle de simulation que pour l'apport de l'infrastructure elle-même à la Clinique. La section 4.2.1 aborde et justifie les besoins spécifiques de la Clinique en termes d'IoT ainsi que le rôle que viennent jouer les antennes, les capteurs et le middleware identifiés dans le Chapitre 3. La section 4.2.2 détaille les étapes de test et démonstration de la solution IoT de base dans le Laboratoire IoT de l'UQÀM pour illustrer comment cette infrastructure pourrait être implantée dans la Clinique et comment les données pertinentes collectées pourront être utilisées par le modèle de simulation de la Clinique. Finalement, la section 4.2.3 présente les autres opportunités IoT pour la Clinique selon les problèmes abordés dans la problématique au Chapitre 1.

### 4.2.1 Identification des besoins spécifiques en IoT de la Clinique Relais

Les technologies IoT sont nombreuses et ont surtout des capacités extrêmement variées : il s'agit donc d'identifier les technologies appropriées pour collecter et transmettre des données aux modèles de simulation afin de simuler des scénarios en vue de réduire la charge sur les ressources humaines. Les besoins de la Clinique en cohérence avec le scénario B sont les suivants :

- Capturer plus précisément la durée des traitements, les déplacements, et le temps d'attente ainsi que la détection de l'utilisation d'une ressource humaine.
- Mesurer le travail indirect des ressources pour le compte des usager·ère·s, idéalement de manière à savoir pour quel usager·ère le travail est effectué.
- Localiser des usager·ère·s et des employé·e·s en continu pour faciliter l'intervention ciblée et retirer une partie de la charge de surveillance des intervenant·e·s.

Deux types de technologies IoT permettent de répondre à ces trois besoins, au moins partiellement : les systèmes de lecture RFID passifs de Ultra Haute Fréquence (UHF), qui permettent la détection d'un identifiant dans une zone précise d'intérêt, et les systèmes de localisation en temps réel ou RTLS (*Real Time Location Systems*) qui permettent de positionner précisément un identifiant dans un espace donné. Pour ce faire, nous avons misé sur des étiquettes RFID passives UHF équipées de tags RFID Dogbone détectées par des lecteurs RFID fixes (Impinj R420 et antennes RFID Time-7) ainsi que par le lecteur RTLS Impinj xArray.

Les données collectées sur l'identification et la localisation des patient·e·s (équipé·e·s de tags/blades) sont automatiquement envoyées à la plateforme logicielle ClearStream de PTS pour le traitement et l'entreposage. Ces données peuvent ensuite être récupérées par le modèle de simulation ainsi que d'autres composantes éventuelles du jumeau numérique. Le système de lecture RFID fixe permet quant à lui de détecter l'entrée, la présence et la sortie d'un·e usager·ère dans une salle spécifique fermée. Pour limiter la complexité du déploiement, chaque antenne du lecteur peut être dédiée à un bureau ou une salle d'examen.<sup>20</sup>

Le lecteur RTLS Impinj xArray installé au plafond et dont les antennes sont intégrées est plus approprié pour la zone ouverte à l'entrée de la Clinique qui inclut l'accueil, la salle d'attente et potentiellement le bureau du gardien de sécurité. En plus de détecter la présence des patient·e·s et/ou du personnel, ce lecteur permet d'obtenir l'emplacement de l'étiquette. Cela permet également de mieux saisir les déplacements et arrivées des usager·ère·s et ressources dans cette zone, plus difficilement délimitable puisqu'elle est ouverte.

Ainsi, la section suivante aborde la démonstration de l'utilisation et de l'implantation de la solution IoT proposée, à travers les plateformes ItemTest de Impinj et ClearStream de PTS qui permettront de visualiser différents aspects de l'implantation.

#### 4.2.2 Conception et design de la solution d'IoT proposée

La section qui suit présente la démarche de la conception et de design de la solution proposée ainsi que son fonctionnement. La majeure partie du travail effectué est effectuée dans le programme ClearStream, et la démarche de démonstration sera donc illustrée à travers une série de figures montrant les étapes de design et de tests virtuels puis réels.

La première étape à l'ouverture de ClearStream est le design de l'environnement virtuel : il s'agit d'utiliser le « Virtual Site Survey » pour recréer l'espace désiré pour tester la solution. La Figure 4.11 ci-dessous illustre les étapes de design initial.

---

<sup>20</sup> Ce système pourrait aussi permettre de suivre les dossiers d'usager·ère·s entrées/sorties des différents bureaux.

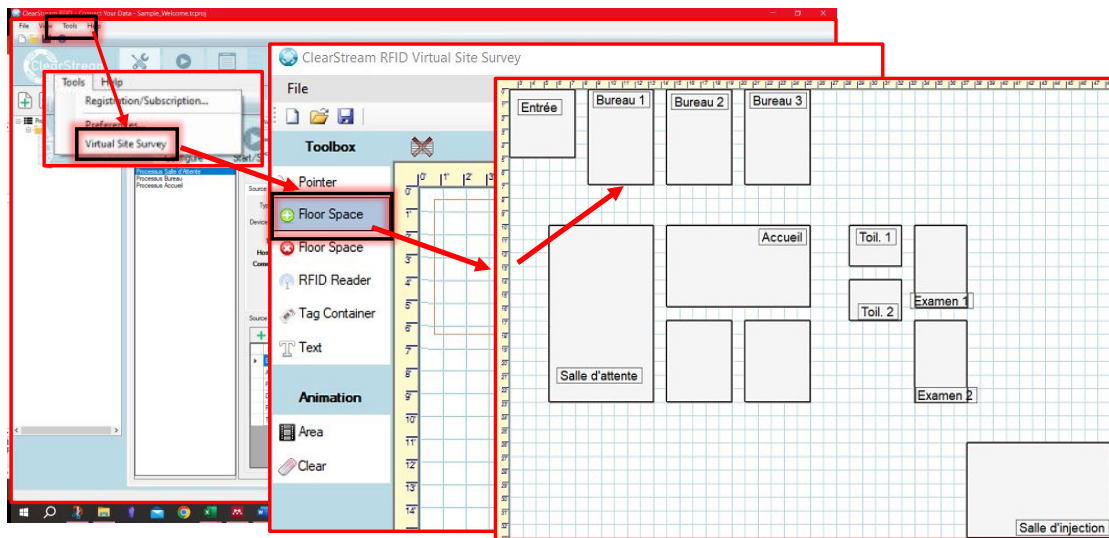


Figure 4.11 - Étapes de création de l'environnement de test de la solution IoT

Une fois sur l'espace virtuel de test et design, il s'agit donc de recréer les espaces en étant le plus fidèle possible comme sur la figure précédente, jusqu'à ce que les zones désirées soient représentées. Pour la démonstration, seules les zones de l'accueil, la salle d'attente, et les trois premiers bureaux sont utilisés, puisqu'il s'agira exactement de la même chose pour les autres zones. Par la suite, une fois l'environnement représenté, il faut créer l'infrastructure virtuelle, c'est-à-dire les lecteurs et antennes. La Figure 4.12 ci-dessous montre les étapes pour y parvenir.

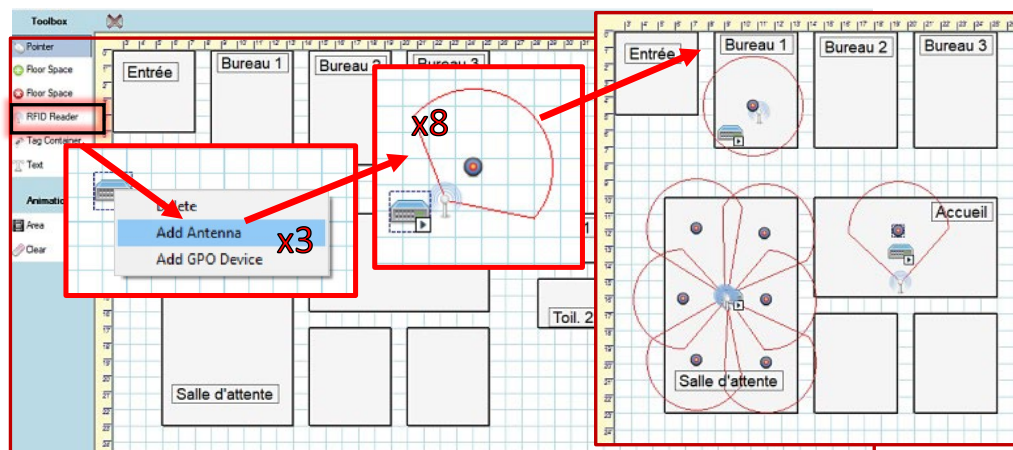


Figure 4.12 - Étapes d'ajout et d'organisation de l'infrastructure IoT virtuelle

Dans cette partie de la conception, il s'agit d'abord d'ajouter des lecteurs pour les zones d'intérêt, puis d'ajouter les antennes et de les y positionner: le rayon rouge représente la zone de lecture des étiquettes par les antennes et le lecteur correspondant. Il faut ensuite retourner sur l'interface

principale du programme afin d'associer l'environnement virtuel aux lecteurs et antennes pour que ClearStream puisse utiliser l'environnement test comme source de données. La Figure 4.13 suivante illustre les étapes de configuration des lecteurs et antennes virtuels.

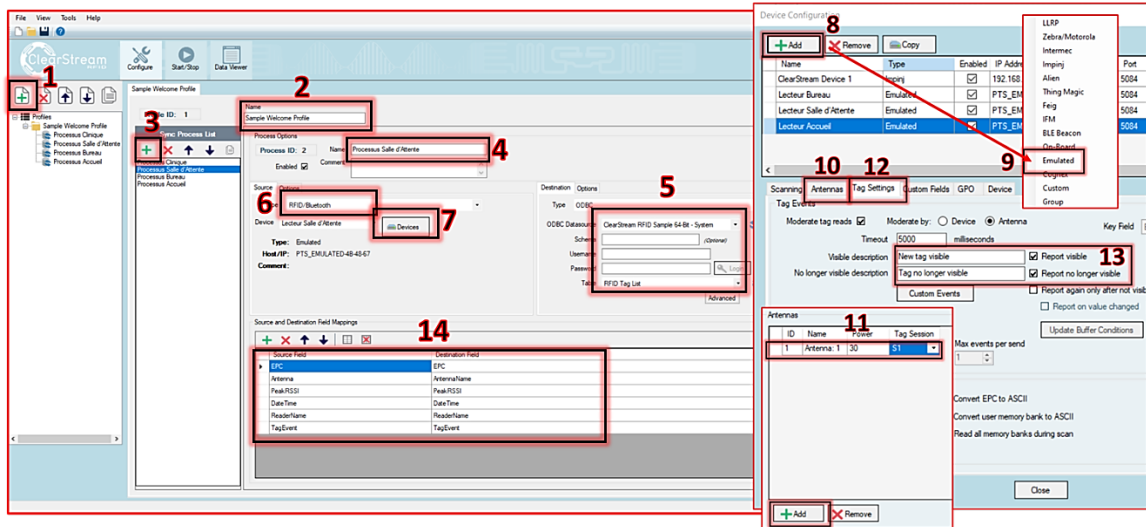


Figure 4.13 - Illustration des étapes de configuration des lecteurs et antennes de l'environnement virtuel

Les étapes de la figure 4.13 sont toutes nécessaires à la configuration, et il faut répéter les étapes 3 à 14 pour chaque lecteur/zone utilisé (les étapes 8 à 13 peuvent toutefois être faites en simultanément) :

- 1 & 2 : Créer un profil et lui donner un nom.
- 3 & 4 : créer un processus pour chaque lecteur et lui donner un nom cohérent.
- 5 : Déterminer la base de données souhaitées ainsi que la structure de données appropriée.
- 6 & 7 : Choisir le type d'étiquette et ouvrir la fenêtre de configuration des lecteurs/antennes.
- 8 & 9 : Ajouter un lecteur de type « *emulated* » (virtuel) avec un nom. S'assurer dans la colonne « *Device ID* » de l'associer au bon numéro de lecteur dans l'environnement virtuel.
- 10 & 11 : Dans l'onglet « *Antenna* », ajouter les antennes au lecteur pour qu'elles correspondent aux antennes de l'environnement virtuel, et leur donner un nom au besoin.
- 12 & 13 : Dans l'onglet « *Tag Settings* », choisir les lectures à extraire et leur nom au besoin.
- 14 : Choisir les informations qui seront colligées dans la base de données par ClearStream.

Une fois le tout complété, les antennes et lecteurs virtuels sont prêts à émuler la capture de données dans l'environnement virtuel de la Clinique : la Figure 4.14 qui suit illustre ce démarrage, qui une fois fait, permet la démonstration du fonctionnement de l'infrastructure dans la section qui suivra.

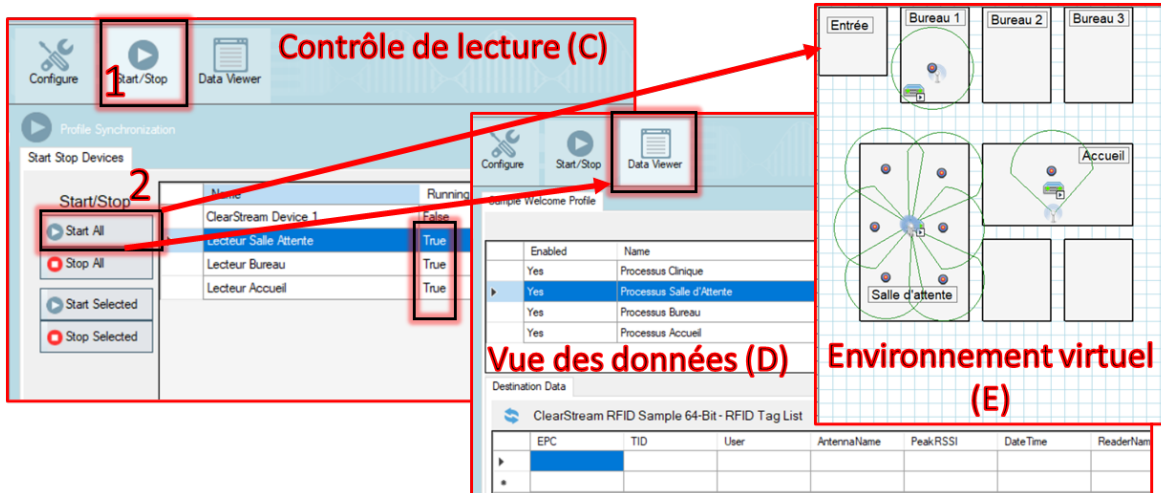


Figure 4.14 – Vue en parallèle des trois fenêtres au démarrage de la capture virtuelle des données

### 4.2.3 Démonstration de la solution d'IoT proposée

Une fois la capture des données démarrée, il faut aussi des étiquettes à lire : l'environnement virtuel permet de créer des tags virtuels sous la forme d'une boîte déplaçable dans les zones de captures. La Figure 4.15 qui suit présente cette démarche en parallèle avec des tests réels dans le Laboratoire IoT de l'UQÀM pour tester la capture de données avec l'antenne Time-7 et le lecteur Impinj R420.

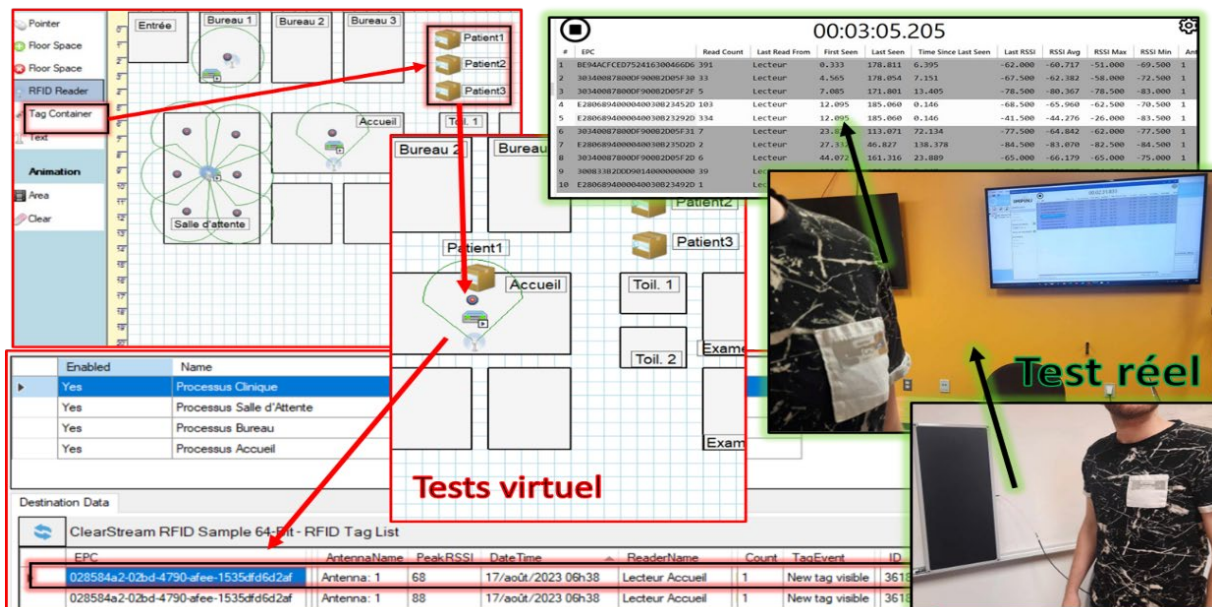


Figure 4.15 - Tests virtuels et réels de capture de données avec les lecteurs RFID / RTLS

On peut ensuite tester la salle d'attente, et voir s'afficher les étiquettes qui changent d'antenne à travers le déplacement. On peut voir l'ajout d'un nouvel identifiant à l'accueil, comme le montre



la Figure 4.16 suivante, qui montre également le test dans la réalité physique avec le déplacement du point rouge à l'écran d'affichage, et le lecteur xArray lui-même dans l'encadré jaune.

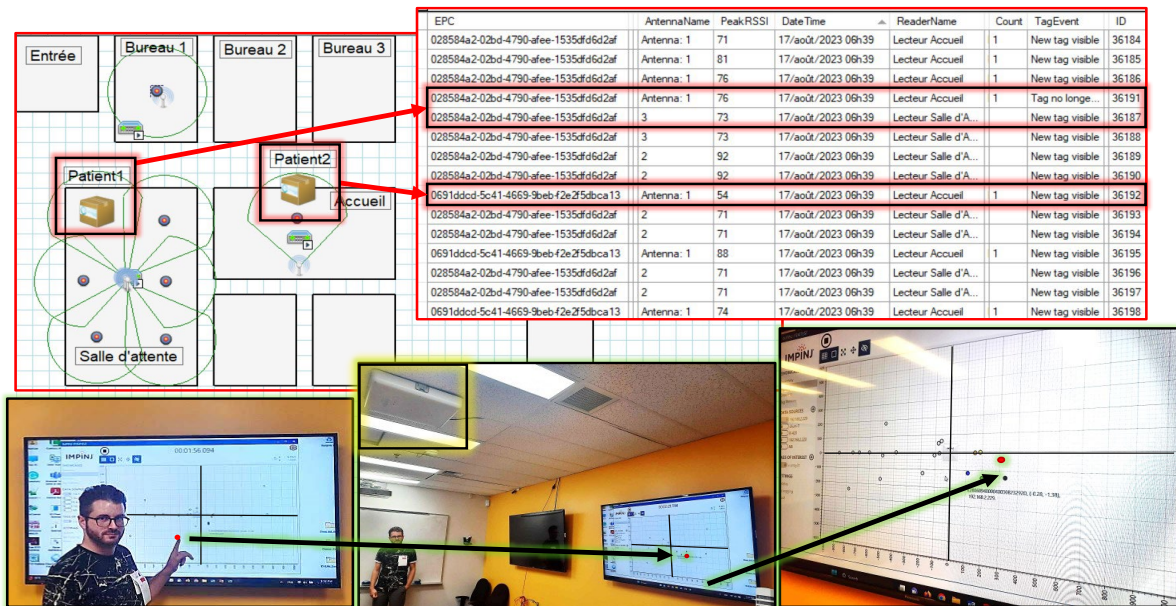


Figure 4.16 - Tests réels et virtuels de la capture de données dans la salle d'accueil avec le lecteur RTLS

Finalement, ces étapes peuvent être reproduites jusqu'à ce que toutes les étapes soient terminées : la Figure 4.17 qui suit présente la fin de ce processus avec l'arrêt de détection de tous les identifiants.



Figure 4.17 - Répétition et fin des tests de capture virtuelle des données

Les données colligées tout au long de la capture sont dans ce cas-ci visible sur ClearStream, mais peuvent aussi aller directement dans une autre base de données, qui peuvent ensuite être prétraitées,

fusionnées et analysées pour être utilisées par d'autres technologies, structures ou composants de système, dans ce cas-ci le logiciel de simulation AnyLogic.

La Figure 4.18 qui suit montre un aperçu des utilisations disponibles : génération d'arrivées ou de distributions statistiques aléatoires, fonctions basées sur des matrices, et construction d'horaires n'en sont que quelques exemples.

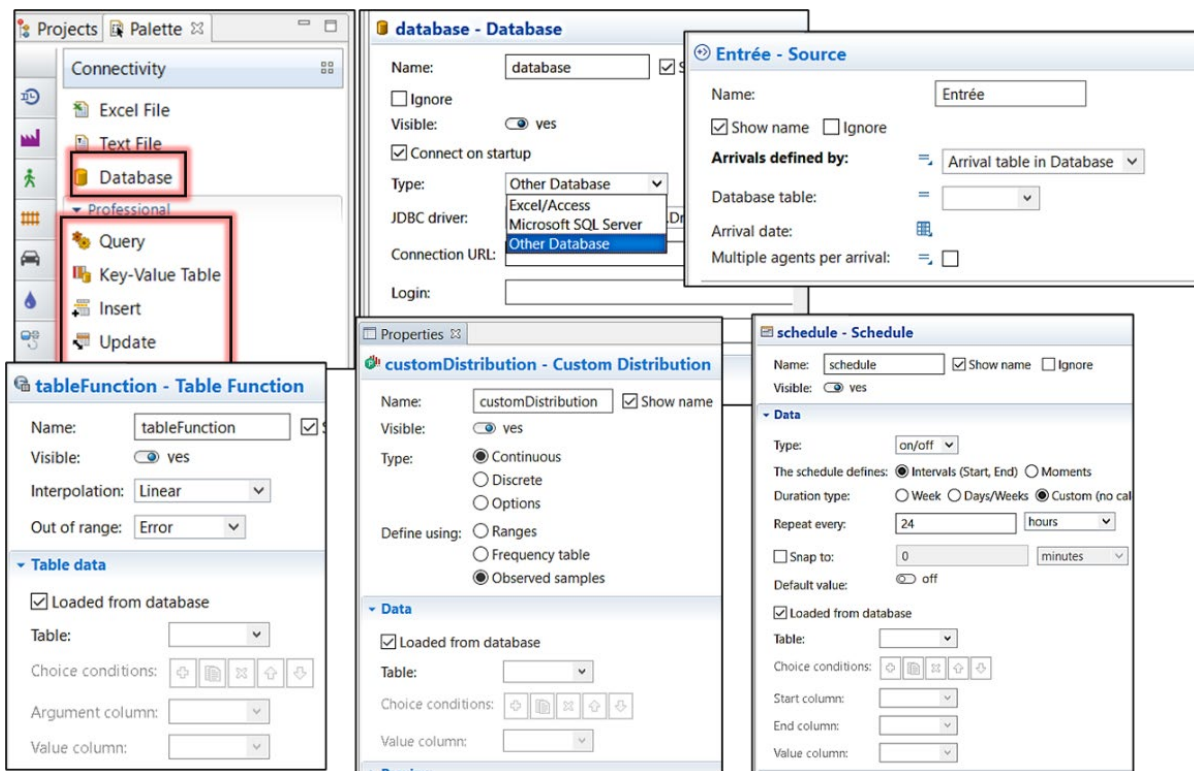


Figure 4.18 - Applications et utilisations des bases de données sur AnyLogic

Les modules « *Query* », « *Key-value Table* », « *Insert* » et « *Update* » peuvent par la suite venir bonifier grandement la connectivité et le dynamisme du modèle de simulation.

### 4.3 Capacité démontrée du modèle et propositions d'améliorations

La démonstration effectuée du modèle de simulation et de l'infrastructure IoT pour la Clinique Relais démontre le potentiel de la solution pour la Clinique, même si tous les problèmes ne sont pas résolus dans le cadre de ce travail. La section 4.3.1 qui suit aborde brièvement les capacités du modèle de prototype proposé, tandis que la section 4.3.2 propose des additions possibles au prototype pour répondre aux besoins opérationnels identifiés concernant la capacité.

### 4.3.1 Capacité limitée du prototype en fonction de besoins ciblés

Le modèle de simulation conçu et testé illustre la nécessité d'avoir un modèle représentatif des opérations réelles, qu'elles soient valorisées et comptabilisées par le système de gestion en place ou non. Les éléments qui en font partie ainsi que les scénarios testés étaient nécessaires pour commencer à parler d'un DT de niveau 2 de maturité au minimum, soit une représentation virtuelle fidèle de la Clinique, puisqu'il y a présentement trop d'informations manquantes pour que ce soit le cas : ces informations doivent être obtenues. Le modèle permet d'étudier et évaluer avec plus de précision les risques pour les usagers et le personnel de la Clinique, comme les surdoses et les crises d'agressivité, mais permettra éventuellement de mieux les prévenir avec un modèle plus complet et des modèles ABS plus détaillés.

L'utilisation des technologies de capture et de connexion des données en temps réel proposée permet justement d'obtenir automatiquement ces données sur les opérations réelles de la Clinique, et forme une base solide pour la gestion de ses opérations. Les données collectées permettront d'obtenir un jumeau numérique de la Clinique conjointement avec le modèle de simulation ainsi que la base de données et la connexion qui les unirait, car les informations sur le système seraient beaucoup plus complètes. Ces éléments de base sont essentiels pour une version d'un prototype qui répond à certaines préoccupations des gestionnaires de la clinique, et permettraient d'obtenir au minimum un DT de niveau de maturité 3, qui avec des ajouts supplémentaires pourrait atteindre un niveau 4 si la Clinique et le RSSSQ le jugent possible et souhaitable.

Comme mentionné, les données IoT et le modèle de simulation du système opérationnel devraient permettre à la Clinique d'évaluer et prévoir plus aisément sa capacité. Elles devraient également permettre de réduire le travail administratif en colligeant automatiquement les statistiques et données d'utilisation de la Clinique, mais aussi plus simplement le parcours clinique des usagers. Les ressources devraient être moins souvent en état de surveillance si un système effectue la surveillance pour elles et permet de le visualiser en permanence, et il en va de même pour la complexité et l'instabilité des opérations si le modèle permet d'en comprendre et d'en expliquer une partie. Toutefois, il y a encore des problèmes qui pourraient être améliorés. La Figure 4.19 qui suit illustre la réponse estimée aux problèmes identifiés dans le diagramme Ishikawa présenté dans la problématique de la Clinique au Chapitre 1. Les problèmes pour lesquels l'amélioration devrait être nette sont en vert; en jaune, les problèmes que la solution initiale de base

devrait aider à réduire; en orange, les problèmes non ciblés par le prototype, mais qui pourraient l'être par une version améliorée et plus mature; et en rouge, les problèmes pour lesquels aucune solution technologique ne semble envisageable.

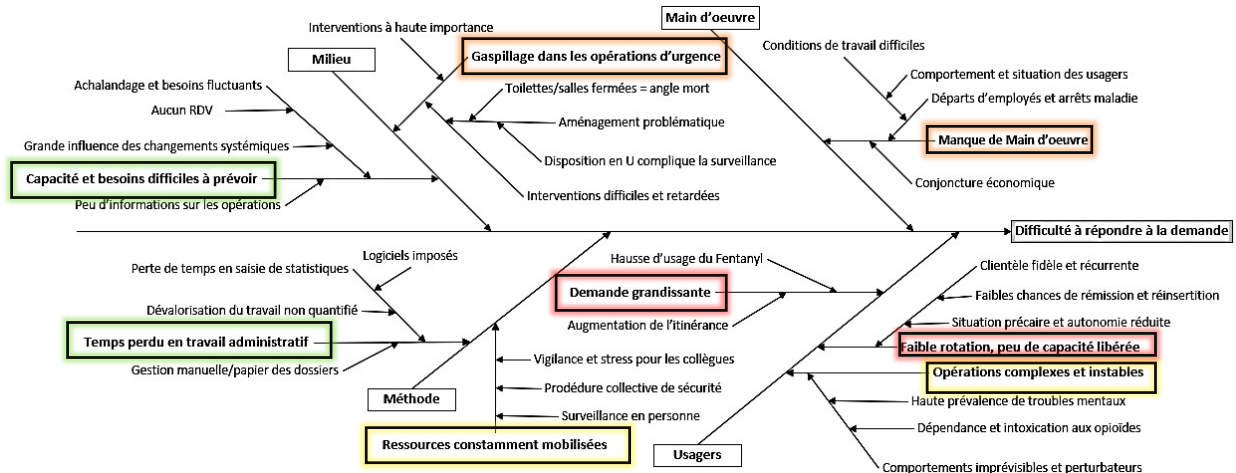


Figure 4.19 - Diagramme Ishikawa des problèmes ciblés par le prototype proposé

Tel que visible sur le diagramme, la couverture des problèmes est loin d'être complète : la section 4.3.2 qui suit détaille donc les ajouts potentiels au prototype qui pourraient y répondre mieux.

#### 4.3.2 Proposition d'élaboration du prototype dans la lignée de maturation du prototype

Mis à part l'identification, les suivis des déplacements et la localisation automatique des patients et du personnel rendus possibles par l'utilisation des technologies RFID passives, d'autres technologies IoT ont un potentiel de résolution des autres problèmes. Nous avons d'abord pensé aux technologies Bluetooth Low-Energy (BLE)<sup>21</sup>, aussi compatibles avec la plateforme ClearStream (de PTS) et avec une autre plateforme logicielle (Pareto de reelyActive)<sup>22</sup> disponible au laboratoire IoT de l'UQÀM.

Dans un premier cas d'utilisation identifié à la clinique, une solution IoT basée sur des boutons de signalement BLE pourrait permettre de signaler directement et rapidement un besoin d'assistance. Ces boutons peuvent avoir trois ou quatre fonctions programmées et servir à signaler un cas

<sup>21</sup> Plusieurs dispositifs discutés dans ce chapitre sont commercialement disponibles chez des fournisseurs tels que <https://www.minew.com/beacon-sensor/>

<sup>22</sup> Voir : <https://www.reelyactive.com/pareto/anywhere/>

d'agitation d'utilisateur au cours d'une rencontre, une agressivité plus intense, ou une surdose. Cette information pourrait être diffusée en temps réel aux collègues, et permettrait aussi d'identifier directement le nombre de cas de chacune de ces interventions. La valeur ajoutée serait très importante pour les usagers, incluant dans le cas de surdoses, puisque cela pourrait réduire le délai d'intervention. Ainsi, la mobilisation constante des ressources serait largement réduite, il y aurait moins de gaspillage dans les interventions d'urgence, et la complexité des opérations pourrait être réduite un peu. À noter que des solutions plus simples sont aussi envisageables telles que le recours à un capteur BLE qui indique l'ouverture d'une porte par un·e intervenant·e, et donc d'une situation potentielle de stress. Cette application plus simple laisse toutefois plus de place à l'interprétation par le système et à des erreurs, et il faut donc sélectionner celle qui convient le mieux.

Dans un autre cas d'utilisation identifié à la clinique, un système de détection et de réactivité pour les toilettes pourrait détecter une chute au sol ou un arrêt complet de mouvement. Cela requiert notamment un tag BLE équipé d'un accéléromètre. Pour la détection de changement de rythme cardiaque, c'est aussi possible, mais plus intrusif auprès des usagers. Ces options technologiques demandent aussi le réaménagement des espaces pour une intervention rapide avec l'installation d'un système de débarrage automatisé des portes de toilette, et le remplacement par un type de porte qui ouvre vers l'extérieur. Le tout pourrait réduire le gaspillage dans les interventions spéciales, le niveau de surveillance requis, et ainsi réduire la complexité du système. Chacun de ces ajouts, incluant les éléments de base du prototype, pourrait aussi potentiellement améliorer les conditions de travail et donc la rétention de main-d'œuvre.

Outre ces deux cas d'utilisation dont la problématique a été identifiée par les intervenant·e·s de la clinique, il en existe plusieurs autres pertinentes dans quel cas le recours à un jumeau numérique s'avèrerait un outil approprié pour la Clinique et pour le RССSQ. Par ailleurs, au-delà de l'amélioration de la performance de gestion possible par le recours à un DT, il faut prendre en compte d'autres enjeux dont : l'éthique, la sécurité des données et l'intrusivité. À cet effet, le chapitre suivant aborde les jeux, défis et limites liés à cette recherche et au DT en santé et services sociaux.

## **CHAPITRE 5**

### **DISCUSSION : LIMITES, ENJEUX ET OPPORTUNITÉS**

Ce chapitre vise à récapituler et évaluer les contributions du présent mémoire pour la recherche et l'industrie de la santé et des services sociaux afin d'en faire ressortir d'un côté les nouveautés, mais aussi de l'autre les limites et les enjeux importants. La question principale de recherche était de « déterminer si le *Digital Twin* pourrait avoir la capacité d'automatiser et intégrer les données pour répondre aux besoins administratifs et opérationnels du Réseau de la Santé et des Services Sociaux du Québec ». L'objectif de recherche principal proposé pour répondre à cette question était donc de « démontrer le potentiel du *Digital Twin* pour automatiser et intégrer les données des systèmes de soins afin de répondre aux besoins administratifs et opérationnels du Réseau de la Santé et des Services Sociaux du Québec ainsi que de la Clinique Relais ». À ce titre, le sous-chapitre 5.1 permettra de revenir sur les sous-objectifs de la recherche et d'en évaluer l'atteinte. Le sous-chapitre 5.2 vise à répertorier les principaux enjeux soulevés dans la littérature concernant le jumeau numérique en santé et services sociaux, que ce soit lié à la nature de la technologie elle-même ou au contexte d'application en santé.

#### **5.1 Objectifs, contributions, limites et opportunités de la recherche**

Pour évaluer si l'objectif principal a été atteint et s'il a permis d'obtenir une réponse satisfaisante à la question principale, il s'agit d'évaluer l'atteinte de chacun des sous-objectifs de recherche proposés pour ensuite déterminer si une réponse convaincante a été obtenue. La section 5.1.1 de ce sous-chapitre traite donc du premier sous-objectif, qui concerne principalement la revue de littérature exploratoire ainsi que la caractérisation et la classification des jumeaux numériques dans l'industrie. La section 5.1.2 aborde le deuxième sous-objectif de recherche concernant la classification et la création d'une typologie du jumeau numérique en santé. La section 5.1.3 servira ensuite à évaluer le troisième sous-objectif, relié à la conception du prototype et à la démonstration de son potentiel pour la Clinique. Finalement, la section 5.1.4 synthétise la portée des contributions liées à chaque sous-objectif fin d'obtenir une réponse à la question principale de recherche.

### 5.1.1 Évaluation de la classification et de la caractérisation exploratoire du DT

Le premier sous-objectif visait à combler une incertitude concernant ce qu'est le jumeau numérique et ce qu'il peut ou non faire pour le secteur des services, et principalement la santé. Plus précisément, il s'agissait « d'identifier les caractéristiques, structures, fonctions, et classifications existantes du *Digital Twin* dans la littérature pour générer une typologie claire des DT qui permette d'organiser les modèles existants et de cibler les fonctions et services appropriés ».

Le travail effectué dans le sous-chapitre 2.2 de ce mémoire semble avoir répondu à l'objectif proposé : les deux classifications proposées initialement, soit la classification par niveau de maturité et la classification par niveau hiérarchique, semblaient bien intégrer l'ensemble des autres types de classifications, et permettait une certaine flexibilité sur l'intégration des fonctions aux modèles. S'y ajoute la classification par fonction principale des modèles, qui semble plutôt être ressortie dans l'analyse en santé, mais avait été abordée dans le secteur manufacturier, et permet de savoir ce qu'un modèle vise à accomplir. On obtient donc une classification à trois critères en plus du secteur qui permet essentiellement de savoir toutes les informations nécessaires sur un DT donné, comme l'illustre le Tableau 5.1 suivant :

Tableau 5.1 - Modèle de classification final à trois critères des jumeaux numériques

<b>Classification</b>	<b>Information</b>	<b>Exemple 1</b>	<b>Exemple 2</b>
<b>Secteur</b>	Domaine d'activité, d'affaires, ou objet générique.	Vente de détail : magasin grande surface.	Énergie : Transformation électrique d'une éolienne.
<b>Niveau hiérarchique</b>	Quel type d'entité : une unité, un procédé, un système, ou un système de système.	Système : modélisation des ressources et processus opérationnels.	Procédé : processus de transformation électromécanique.
<b>Application</b>	Planification et contrôle, Gestion de l'état, Design d'espace et d'activité, gestion du cycle de vie.	Planification et contrôle : allocation des employé·e·s et des chariots de restockage.	Gestion de l'état: maintenance et performance de la turbine.
<b>Niveau de maturité</b>	Niveau de 0 à 5, définit les capacités et le niveau d'intégration.	Données en temps réel, instructions directives, modèle virtuel interactif : Niveau 4.	Modèle alimenté et visible en temps réel, prédiction des maintenances : Niveau 3.

En ce qui concerne la caractérisation et les structures du DT, une définition a été retenue qui permettait à la fois une flexibilité intersectorielle tout en étant stricte sur le résultat : le DT n'est en effet pas restrictif en termes de ce qui le compose, mais plutôt en termes de ce qu'il doit pouvoir faire pour représenter fidèlement la réalité physique d'intérêt. Finalement, le modèle à cinq dimensions de Qi et al. (2021) avait été retenu pour sa couverture complète des technologies et

structures requises du DT, et permettait plutôt de comprendre la composition du DT que de les classer : ces structures sont intimement liées à la définition retenue, mais d'un point de vue d'infrastructure plus que de concept.

Somme toute, il reste à évaluer si cette classification s'applique bel et bien à tous les modèles dans tous les secteurs : c'est une idée ambitieuse, mais qui à ce stade-ci fait sens. Néanmoins, la couverture de littérature des autres secteurs dans ce travail est très limitée, il s'agit donc purement d'une hypothèse, qui a surtout servi à analyser les modèles en santé.

### 5.1.2 Évaluation de la typologie et classification du jumeau numérique en santé

Le deuxième sous-objectif de la recherche dépendait d'une atteinte satisfaisante du premier sous-objectif, qui a ainsi été considéré comme atteint. Le deuxième sous-objectif était le suivant :

« Analyser, classer et évaluer les propositions de jumeaux numériques dans la littérature sur la santé et les services sociaux pour en faire ressortir le niveau de progression ainsi qu'une typologie spécifique permettant de cibler les fonctions et services pertinents pour le RSSSQ ainsi que la Clinique ».

Il semble que l'atteinte de cet objectif ait également été réussie, du moins dans les limites des références et des applications répertoriées. La typologie des jumeaux numériques proposée colle avec celle qui a été retenue pour les jumeaux numériques en général, et a permis d'identifier certaines tendances et capacités de jumeaux numériques qui ont permis d'inspirer le prototype pour la Clinique Relais. Il s'agissait aussi d'une opportunité d'évaluer le niveau de développement approximatif du jumeau numérique en santé : le Tableau 5.2 offre un portrait du niveau de maturité des modèles proposés dans la littérature.



Tableau 5.2 - Portrait de la maturité des cas de DT en santé dans la littérature

Niveau	Application	Nb. d'articles identifiés					Maturité répertoriée				
		1-3	4-6	7-8	9-10	10+	0-1	2	3	4	5
Santé personnalisée	Diagnostic et progression d'anomalies										
	Régulation d'activités et pratiques de santé personnelle										
	Modélisation fonctionnelle pour interventions										
	<b>Gestion du cycle de vie de la santé humaine</b>										
Procédures en santé	Procédures de diagnostic et évaluation										
	Design de procédures et de conditions										
	Régulation des processus opératoires										
	<b>Régulation dynamique des processus de soins</b>										
Système de gestion de santé	Intégration du parcours clinique des usagers										
	Gestion de ressources matérielles et d'aménagement										
	Allocation des ressources médicales										
	<b>Gestion intégrale des systèmes de soins de santé</b>										
Santé écosystémique/ publique	Intégration des individus et systèmes fonctionnels										
	Plans de contingence et adaptation structurelle										
	Coordination des systèmes de ressources										
	<b>Gestion de santé publique et écosystémique</b>										

La typologie proposée des jumeaux numériques ainsi que leur analyse ont déjà été explicitées : il en ressort néanmoins une nette dominance des modèles et articles couvrant les soins personnalisés, qui est également le seul niveau hiérarchique pour lequel des modèles de gestion globale ont été proposés. Néanmoins, la généralisabilité de cette typologie complète est réduite pour l'instant aux articles répertoriés : certaines applications hypothétisées en santé n'ont pas été répertoriées dans la littérature, incluant les applications de gestion globale dans trois des niveaux hiérarchiques. Il s'agirait donc d'étendre cette classification et de la tester avec d'autres articles en santé, mais aussi éventuellement dans les autres secteurs. La classification par application semble déjà essentiellement applicable dans le secteur manufacturier, puisqu'elle en provient, mais il serait intéressant de voir si elle s'appliquerait dans d'autres secteurs de production et de services ou même dans l'extraction, considérant que l'extraction concerne des matières inertes très simples ou même des formes immatérielles telles que l'énergie.

En ce qui concerne la Clinique, d'un point de vue santé elle semblerait correspondre à un DT de système de gestion de santé, avec la nuance qu'elle intègre aussi des services sociaux. Les deux focus du modèle proposé sont surtout l'intégration du parcours clinique et la gestion et l'allocation des ressources intervenantes. D'ailleurs, le troisième sous-objectif traite spécifiquement de la Clinique, et la section suivante traitera donc du prototype proposé au chapitre 4.

### 5.1.3 Évaluation du potentiel du prototype proposé pour la Clinique Relais

Le troisième sous-objectif concernait la Clinique spécifiquement afin de l'utiliser comme banc d'essai de la technologie du DT pour une application au RSSSQ :

« Utiliser les informations disponibles sur la Clinique Relais pour concevoir et modéliser un prototype de jumeau numérique qui puisse démontrer le potentiel du DT à répondre aux besoins de la Clinique et du RSSSQ, et ce, en considérant que les données captées par le prototype pourront être utilisées pour de futures améliorations des fonctions et capacités ».

Encore une fois, cet objectif semble avoir été atteint puisque le prototype semble prometteur en termes de capacité, de pouvoir explicatif et prédictif, et de support à la décision et au bien-être du personnel. Il faut toutefois considérer que l'accent initial était d'office opérationnel, puisqu'il y a peu d'opportunités pour le DT de santé personnalisée considérant que les usager·ère·s de la Clinique sont sans connexion la vaste majorité du temps et que leurs conditions peuvent être extrêmement variables.

Aussi, une limite potentielle importante est l'acceptabilité des capteurs et tags IoT pour le personnel et les usager·ère·s de la Clinique. Pour les premiers, les capteurs et mesures proposées pourraient constituer une intrusion dans leurs pratiques et dans leur autonomie : il s'agit d'une question qui devrait être posée aux différentes ressources humaines avant de procéder à une quelconque implantation. Pour les usager·ère·s, le même genre d'enjeu se pose, mais également l'inconfort à l'idée d'être suivi·e·s à travers la Clinique considérant leur état mental et physique instable, et le fait que plusieurs puissent ne pas avoir l'habitude de données captées sur leurs activités, ce qui est déjà le cas pour la plupart des personnes ayant un téléphone intelligent. D'autres enjeux plus de même nature seront discutés dans le sous-chapitre 5.2 qui suit.

Le manque de données sur les opérations de la Clinique est encore plus marqué pour les procédés spécifiques de traitements médicaux et d'accompagnement en services sociaux. Ainsi, un modèle axé sur cette division n'aurait pas tenu la route, et la question de la santé publique ou écosystémique dépasse largement la Clinique, bien qu'elle ait de toute évidence une influence majeure sur les usager·ère·s, comme mentionné dans le Chapitre 1. Il s'agit également, sous toute réserve de ce qui a été vu à ce jour, du premier cas d'application du jumeau numérique dans les services sociaux,

et le résultat semble assez probant : les enjeux de comportements particuliers, de santé mentale et d'accompagnement semblent soulever des défis et enjeux intéressants pour la recherche sur le jumeau numérique.

Toutefois, cela ne signifie pas pour autant qu'au-delà des additions potentielles suggérées au sous-chapitre 4.3, il n'y en ait pas d'autres qui puissent provenir des autres niveaux d'abstraction : c'est précisément le point de la sous-section 2.3.6.3 concernant les applications potentielles pour la Clinique issues de la littérature. En soi, le prototype et les additions futures proposées semblent bien répondre à la problématique de la Clinique et pourraient apporter une grande valeur ajoutée étant donné l'instabilité et la complexité de certaines opérations, mais aussi considérant les ressources très limitées qui sont disponibles. Toutefois, il reste aussi à savoir si le prototype est exportable vers le RССSQ : la prochaine section vise à synthétiser les résultats issus des contributions de cette recherche afin d'obtenir cette réponse et d'évaluer les capacités du jumeau numérique.

#### 5.1.4 Synthèse de l'apport de la présente recherche pour le RССSQ

Pour donner suite à l'analyse des contributions ayant répondu aux sous-objectifs de ce mémoire, il semble raisonnable de dire que oui, la présente recherche a permis de « démontrer le potentiel du *Digital Twin* pour automatiser et intégrer les données des systèmes de soins afin de répondre aux besoins administratifs et opérationnels du Réseau de la Santé et des Services Sociaux du Québec ainsi que de la Clinique Relais ».

La recherche exploratoire a laissé transparaître une grande capacité du jumeau numérique à s'adapter et à supporter un système de gestion donné, et la caractérisation effectuée en sous-chapitre 2.2 positionne le DT comme un outil puissant d'aide à la décision et de gestion des données. La flexibilité de la définition retenue ainsi que des modèles de classification et de qualification laissent place à une grande ouverture pour des systèmes ambitieux avec de nombreuses fonctions pour améliorer la productivité et le bien-être des usager·ère·s.

La typologie des jumeaux numériques en santé a pour sa part apporté une variété de possibilités en termes de composantes du modèle, de capacités et d'utilisations appropriées en santé, et laisse croire que même s'il pourrait manquer certaines composantes ou certains types de modèle pour supporter la typologie, il n'en reste pas moins qu'il y a largement de quoi construire un modèle de

DT complexe avec des capacités allant bien au-delà de celles du système actuel de gestion des informations de santé et de services sociaux au Québec.

Finalement, le prototype proposé pour la Clinique a permis d'appliquer directement le concept dans le contexte québécois et d'en tester le potentiel, même si l'implantation n'a pas été faite. Les quelques modules intégrés dans le modèle de simulation et dans l'infrastructure IoT permettraient déjà de cibler de nombreux problèmes et seraient plutôt faciles à transposer dans d'autres types de systèmes ou bâtiments tels que des hôpitaux. Le niveau de complexité du modèle serait certainement beaucoup plus élevé et la quantité d'infrastructures IoT physiques requise serait sans doute exponentielle, mais cela semble néanmoins plausible.

Toutefois, le fait que le DT semble avoir la capacité d'automatiser et d'intégrer les services du RSSSQ ne signifie pas pour autant qu'il est souhaitable qu'il le fasse : il existe de nombreux enjeux concernant le jumeau numérique et les systèmes numériques en général, que ce soit en santé ou dans d'autres secteurs. Ainsi, le prochain sous-chapitre aborde brièvement le questionnement du DT comme est un outil souhaitable et éthiquement approprié pour l'intégration numérique du RSSSQ québécois, afin de ne pas se baser uniquement sur sa capacité à la faire pour prendre une décision.

## **5.2 Enjeux et défis éthiques concernant le DT en santé et services sociaux**

Ce sous-chapitre aborde brièvement les enjeux, problèmes et défis éthiques posés par le jumeau numérique dans la santé et les services sociaux. Les articles lus au cours de cette recherche ont pour la vaste majorité une vision très positive et optimiste du jumeau numérique, ce qui n'est pas surprenant puisqu'il s'agit dans la plupart des cas d'articles qui visent à faire progresser le jumeau numérique dans la montée de sa popularité comme concept. En revanche, certaines références répertoriées ont également posé des mises en garde et soulevé des enjeux concernant le jumeau numérique, sans compter les enjeux déjà existants concernant le monde numérique. Le premier type d'enjeu et sans doute le plus répertorié dans les articles lus est celui lié aux données, et ces enjeux seront abordés dans la section 5.2.1. Le deuxième type concerne plutôt les problèmes liés à l'équité, la diversité et l'inclusion (EDI) qui sont associés aux outils numériques dont le DT fait partie : ces enjeux seront traités dans la section 5.2.2. Finalement, le troisième type d'enjeux est lié

à l'impact environnemental de la transition numérique et les technologies associées, enjeux qui seront couverts par la section 5.2.3.

### 5.2.1 Les enjeux d'intrusivité, de propriété et de sécurité liés aux données

Des enjeux liés aux données ont été soulevés à maintes reprises dans les articles sur le jumeau numérique en santé, ce qui n'est pas surprenant considérant la sensibilité des données liées à la santé personnelle des individus, ce qui peut par ailleurs inclure des données de nature biométriques dans certains cas, données qui sont aussi utilisées dans des contextes de sécurité. Les enjeux principaux sont ceux de la sécurité des données, de l'intrusivité ou de l'ubiquité du jumeau numérique, et le problème que ces deux enjeux peuvent représenter pour le respect de la vie privée et de la propriété sur les données. En effet, un vol de données issu d'un problème de sécurité est autant un enjeu de perte de propriété, d'intrusion dans les informations personnelles que de perte de fiabilité du DT.

De nombreux articles ont soulevé l'importance de la sécurité des données, du respect de la vie privée et du droit de propriété sur les données en santé pour assurer un DT fonctionnel ainsi que pour favoriser l'adoption du concept (Ahmadi-Assalemi *et al.*, 2020 ; Alazab *et al.*, 2022 ; Gámez Díaz *et al.*, 2020b ; Peng *et al.*, 2020 ; Sahal *et al.*, 2022 ; Sharma *et al.*, 2022 ; Shengli, 2021 ; Topol, 2019 ; Verma, 2022).

Plusieurs auteur·rice·s ont aussi abordé le même sujet à partir du point de vue spécifique du jumeau numérique en santé, incluant la protection contre le vol, l'altération ou la perte de données sensibles et confidentielles. Certains sont allés jusqu'à développer des cas d'études et cadres d'applications axés principalement sur la sécurité et le respect de la vie privée pour le DT en santé ((Akash et Ferdous, 2022 ; EL Azzaoui *et al.*, 2021 ; Zhang *et al.*, 2020 ; Zhang et Tai, 2022), tandis que d'autres cas en ont fait une composante essentielle de leurs modèles (Laaki *et al.*, 2019 ; Pang *et al.*, 2020 ; Saracco *et al.*, 2020 ; Zhao *et al.*, 2021). Dans tous les cas, les auteur·rice·s soulèvent l'importance d'un système de sécurité fort et résilient autour du DT afin d'en assurer la fiabilité et l'intégrité, que ce soit via le Blockchain ou des mécanismes de détection des risques et failles de sécurité. Un enjeu soulevé est aussi la perte de contrôle et de propriété des données (Huang *et al.*, 2022 ; Pratt *et al.*, 2022 ; Schwartz *et al.*, 2020) : comment s'assurer que les données fournies peuvent être récupérées et qu'elles continuent d'appartenir à l'individu·e?

Finalement, certains articles se sont attardés uniquement aux enjeux éthiques du jumeau numérique et n'ont eu d'autre choix que d'aborder ces concepts qui semblent de plus en plus apparents (Bruynseels *et al.*, 2018 ; Drummond et Coulet, 2022 ; Huang *et al.*, 2022 ; Iqbal *et al.*, 2022 ; Popa *et al.*, 2021 ; Schwartz *et al.*, 2020). La sécurité des données semble en effet cruciale, mais encore faut-il l'assurer. Dans le cas du RSSSQ québécois, il s'agit de savoir si le gouvernement est à même de protéger les données des citoyens considérant que le système actuel est encore peu ou pas connecté : sauront-ils assurer la transition vers le DSN de manière sécuritaire?

### 5.2.2 Les enjeux d'équité, diversité et inclusion (EDI) dans les outils numériques

La transition numérique peut représenter un risque lorsqu'il s'agit d'enjeux d'EDI, qui concernent généralement les populations marginalisées, minoritaires, ou simplement moins privilégiées qui peuvent être oubliées dans les décisions et dans la prise en charge de la « normalité ». Plusieurs articles ont abordé des enjeux d'EDI concernant la transition numérique, avec une portée ou une conséquence différente dans chaque cas.

Un des enjeux les plus notables liés à la diversité et l'inclusion semblent être l'existence de biais liés à la diversité de genres, de cultures, de races et d'orientations sexuelles dans les algorithmes et designs de systèmes (Dixon et Holmes, 2022 ; Fountain, 2022 ; Huang *et al.*, 2022 ; Pratt *et al.*, 2022 ; Schwartz *et al.*, 2020). Il semblerait en effet que beaucoup d'algorithmes sont à risque d'utiliser une information liée à la diversité pour émettre un diagnostic, tandis que dans d'autres cas, l'entraînement de l'algorithme a été fait sur une population non représentative et manquant de diversité, ce qui pose des problèmes majeurs lors de son utilisation.

Un autre problème est celui de l'accessibilité aux plateformes pour les personnes ayant une incapacité, un écart de littéracie, ou faisant partie de classes socioéconomiques désavantagées (Dixon et Holmes, 2022 ; Drummond et Coulet, 2022 ; Iqbal *et al.*, 2022 ; Loignon *et al.*, 2021 ; Popa *et al.*, 2021 ; Pratt *et al.*, 2022 ; Schwartz *et al.*, 2020), certains groupes marginalisés ou ayant des problématiques particulières se retrouvant avec une difficulté supplémentaire pour utiliser les plateformes numériques, que ce soit lié par exemple à une incapacité visuelle, le manque de moyens financiers, ou simplement une difficulté à comprendre les informations sur la plateforme. Cet enjeu est particulièrement criant dans le cas de la Clinique Relais, dont les usager·ère·s sont majoritairement à la rue et n'ont pas d'accès aux services numériques.

Un autre risque posé, qui peut découler autant de l'enjeu d'accessibilité que de celui de la sécurité et de la propriété des données, est le risque de perte de liberté de choix concernant l'adhésion aux plateformes numériques ainsi que le partage et la propriété des données (Huang *et al.*, 2022 ; Pratt *et al.*, 2022 ; Schwartz *et al.*, 2020). Cette perte de liberté de choix est associée également à un risque de création de classes et d'iniquités supplémentaires. En effet, une personne qui refuserait l'adhésion à une plateforme de santé numérique ou encore la capture de ses données personnelles pourrait se voir désavantagée pour l'accès aux soins si le système tient pour acquise l'acceptation de ces conditions. Une autre personne qui ne souhaiterait pas partager ses données, mais se retrouverait dans une situation financière difficile, pourrait se voir « forcée » de vendre ses données en échange de compensation financière, ou se contraindre à aller contre sa volonté afin d'obtenir des soins de santé.

Cela pourrait tout à fait être le cas des usager·ère·s de la Clinique, qui sont déjà en situation précaire et pour qui la Clinique est parfois la seule source de services stables : une transition numérique pourrait les obliger à aller contre leur gré, étant une de leurs rares sources de support. C'est sans compter que les usager·ère·s sont à haut risque de troubles mentaux et que l'anxiété, la paranoïa et d'autres troubles pourraient augmenter leur inconfort à l'idée d'étiquettes, de capteurs, d'antennes et d'autres infrastructures technologiques. Il est très difficile d'estimer sans risque de biais comment ces personnes en situation particulière comprendraient et accepteraient ce genre d'intrusion, et outre l'idée de bien prendre le temps de discuter et présenter les technologies utilisées et leurs conséquences ou avantages, il n'est pas vraiment possible d'assurer leur collaboration sans risquer de les y contraindre.

À cet égard, Pratt *et al.* (2022) ont procédé à une démarche intéressante d'identification et de définition de normes d'équité dans le design et l'implémentation de technologies digitales, initialement pour une application de traçage pendant la pandémie de Covid-19, mais qui s'applique très bien à d'autres technologies numériques. Le Tableau 5.3 présente une version abrégée et condensée de ces normes telles que définies, qui peuvent faire partie d'une démarche d'acceptabilité sociale par les groupes marginalisés.

Tableau 5.3 - Normes d'inclusion de design et d'implantation de technologies numériques (Pratt *et al.*, 2022)

Norme ou critère à respecter	Explication et engagement
Processus participatif équitable	Assurer la participation du plus de groupes d'intérêts possible, en assurant particulièrement l'inclusion des groupes les plus marginalisés.
Design basé sur des valeurs diverses	Engagement et intégration publique de valeurs telles que la vie privée, le bien-être, la liberté, la solidarité, et autres, tout au long du processus.
Accès égal au processus de design et à la technologie	L'accessibilité est assurée pour les groupes marginalisés, désavantagés, ou atypiques au cours du processus de design ET pour la technologie finale.
Réduction des inégalités dans le design et l'accès	Efforts de réduction active des inégalités tout au long de la démarche de développement de la technologie, et éviter d'exacerber la marginalisation des groupes déjà marginalisés.
Protection des droits humains et de la vie privée	Assurer la balance de pouvoir sur les données personnelles et exclure les compagnies ayant un historique de non respect des droits humains
Égalité d'accès aux outils	Assurer que l'accès est gratuit, facile, et accessible à tous, et faire le nécessaire lorsque ce n'est pas le cas.
Engagement public clair sur les enjeux	Les problèmes potentiels, limites et obligations sont ouvertement communiquées et divulguées.
Impact social évalué tout au long du déploiement	Suivre l'impact de la technologie à travers son implantation pour assurer que les bénéfices et charges soient répartis équitablement

Ainsi, il est essentiel dans la démarche de design et d'implantation du DSN que le MSSS suive au moins ces pratiques afin d'assurer un minimum d'inclusivité des solutions, et ils devront tenir compte des différents risques liés à l'EDI lors du design de la plateforme et de la solution numérique. Tous ces critères et tous les risques identifiés peuvent très bien s'appliquer au jumeau numérique, qui requiert tout de même d'être très à l'aise avec la capture de données sur soi, peu importe le niveau hiérarchique en santé ou services sociaux.

### 5.2.3 L'impact environnemental de la transition numérique

Afin de pouvoir évaluer réellement l'impact positif que le DT pourrait avoir sur le secteur de la santé et des services sociaux, il est nécessaire d'évaluer l'impact environnemental qu'il pourrait avoir, surtout dans le cas d'une implantation d'envergure pour le RSSSQ québécois. L'impact écologique des activités numériques est souvent sous-estimé : il est estimé que le secteur des technologies numériques aurait été responsable d'environ 5% des émissions de gaz à effet de serre (GES) sur la planète<sup>23</sup> en 2022; à titre comparatif, c'est un peu plus de deux fois les émissions du

<sup>23</sup> <https://greenly.earth/en-us/blog/ecology-news/everything-you-need-to-know-about-green-it-in-2022>



secteur de l'aviation (2%<sup>24</sup>) qui a d'ailleurs diminué légèrement depuis 2020, c'est-à-dire le début de la pandémie. Dans ce contexte, il est essentiel pour le jumeau numérique, une technologie à forte consommation de produits électroniques et de données, d'être évalué sur son empreinte écologique, et potentiellement de savoir quoi prendre en compte dans son implantation.

Certains discours reçus peuvent être contradictoires : des articles comme celui de Schmidt et Bohnet-Joschko (2022) suivent l'idée commune et orientent vers la numérisation des processus pour diminuer l'empreinte écologique du secteur de la santé, tout comme beaucoup des articles lus dans le cadre de cette recherche, tandis que d'autres indiquent clairement que le numérique, et en particulier le transit et le stockage de données, est une source importante de pollution (Al Kez *et al.*, 2022 ; Drummond et Coulet, 2022 ; Moreau *et al.*, 2021 ; Siddik *et al.*, 2021). En particulier, les modèles d'IA et les bases de mégadonnées sont des sources d'émissions importantes de GES, l'entraînement d'un modèle d'IA de bonne taille étant associé à des émissions catastrophiques (Drummond et Coulet, 2022). La conclusion d'autres auteur·rice·s étant finalement que le numérique n'est pas une solution durable et écologique si ce n'est que pour numériser le système et son fonctionnement actuel : il faut donc changer les modèles de pensées et la manière de fonctionner (Moreau *et al.*, 2021), et songer à intégrer le calcul des émissions de GES dans l'évaluation des technologies en santé. Dans cette optique, le concept de sobriété numérique prend toute son importance, et le Gouvernement du Québec lui-même souhaite lui-même orienter la population dans cette direction<sup>25</sup> : profiter au mieux des avantages du numérique en réduisant au maximum ses impacts négatifs, ce qui implique donc l'efficacité et la réduction du transit de données. Le DT peut aussi être un outil d'optimisation : il est donc plausible qu'il puisse aussi réduire l'impact écologique d'un système, voire réduire sa propre empreinte écologique. Dans cette optique, le jumeau numérique est un concept à proposer avec vigilance : les modèles pourraient être développés de manière sobre, mais peut-être n'atteindraient-ils alors pas le niveau 4 de maturité requis pour parler d'un jumeau numérique mature. En revanche, cela ne signifie pas qu'un tel modèle ne serait pas pertinent ou même parfaitement fonctionnel : le MSSS et le RSSSQ, s'ils décident d'aller vers le DSN et des systèmes tels que le jumeau numérique, doivent tenir compte

---

<sup>24</sup> <https://www.iea.org/energy-system/transport/aviation>

<sup>25</sup> <https://www.ethique.gouv.qc.ca/fr/actualites/ethique-hebdo/sobriete-numerique-avantages-et-limites-d-une-demarche-individuelle/>

de ces facteurs, puisqu'un « monstre » tel que le RSSSQ a un potentiel d'émissions de GES très élevé s'il décide de migrer massivement vers le numérique, mais cette même taille implique aussi que les réductions potentielles pourraient être très importantes si le DT est conçu, implanté et utilisé de façon écoresponsable.

Ainsi, il apparaît comme la responsabilité du RSSSQ de prendre en compte tous ces enjeux liés à la sécurité des données, à l'EDI, et à l'impact environnemental dans la décision d'une éventuelle implantation du DT ou d'un autre assemblage technologique similaire. Le jumeau numérique a donc la capacité de faire ce dont le gouvernement a besoin, mais il n'y a pas de réponse claire quant à savoir s'il s'agit de la meilleure décision : la conclusion à la page qui suit vient donc faire la synthèse des éléments soulevés et ouvrira des pistes de réflexions pour la suite.

## CONCLUSION

La question de recherche qui a guidé ce mémoire consistait à savoir « comment déterminer si le *Digital Twin* pourrait avoir la capacité d'automatiser et intégrer les données pour répondre aux besoins administratifs et opérationnels du Réseau de la Santé et des Services Sociaux du Québec ».

La réponse finale à cette question semble être qu'il s'agissait d'abord de s'assurer de bien comprendre la technologie pour identifier ses caractéristiques et ses capacités. C'est cette démarche qui a été accomplie au sous-chapitre 2.2. Une fois que ce fut fait, il s'agissait ensuite d'identifier les différentes applications possibles dans le secteur afin d'identifier les modèles qui permettent de répondre aux besoins du RССSQ pour éventuellement reproduire les caractéristiques de ceux-ci : c'est à ces fins que la démarche du sous-chapitre 2.3 a été complétée. Par exemple, la solution de gestion intégrale des systèmes de soins, identifiée dans la typologie des jumeaux numériques en santé dans le Tableau 2.9 semble équivalente à ce que recherche le Gouvernement du Québec pour le Dossier Santé Numérique : une solution intelligente qui permette à la fois la gestion des ressources médicales, la coordination des espaces et des flux de ressources matérielles, et l'intégration des parcours cliniques, le tout développé avec en addition des composantes liées à la santé écosystémique afin de coordonner l'ensemble des systèmes et établissements du RССSQ.

Les chapitres 3 et 4 ont servi par la suite à vérifier l'applicabilité des solutions proposées dans un des établissements du réseau pour ensuite vérifier si cette application et les résultats qui en ressortent sont généralisables ou non. Il s'agissait également d'une bonne occasion de contribuer à la recherche en proposant une démonstration d'un DT de système de gestion de soins de santé qui intègre deux applications, soit l'allocation des ressources médicales et intervenantes ainsi que l'intégration du parcours clinique des usager·ère·s. Il s'agissait également un test de l'applicabilité pour les services sociaux, puisque aucun article à ce sujet n'avait été trouvé pour appuyer la démarche.

Comme mentionné à la toute fin du Chapitre 4, la capacité du DT à répondre aux besoins du Gouvernement semble démontrée, mais une autre question se pose : cet outil est-il éthiquement approprié? Il pourrait l'être, et c'est ce que les enjeux apportés dans la discussion au Chapitre 5 ont permis d'explorer, mais il semble désormais nécessaire pour le MSSS de faire une étude d'impact

sur le potentiel du DT, en prenant soin d'intégrer les populations concernées, les enjeux liés à l'environnement, et les problèmes potentiels concernant les données, qui d'ailleurs devront être clairement exposés aux futurs usager·ère·s. La suite de cette recherche semble donc s'orienter vers la nécessité d'évaluer davantage la technologie dans le RSSSQ, et pour ce faire, il lui faudra également étudier le processus d'implantation et d'adoption, qui n'ont pas été abordées dans la présente recherche. Il s'agit là d'une excellente occasion d'évaluer l'outil dans son utilisation réelle, et de pouvoir inclure les groupes marginalisés et les parties prenantes afin d'avoir une perception valide et fidèle de l'impact que pourrait avoir le jumeau numérique sur le Réseau de la Santé et des Services Sociaux.

## ANNEXE A : MATRICE D'ANALYSE DES CAS HORS GESTION DES SOINS

À noter que cette matrice était pour un usage d'analyse et non de présentation : elle pourrait être incomplète ou présenter des fautes de grammaire et d'orthographe.

Article	Niv. d'abst.	Sous-division	Type d'article	Entité d'intérêt	Précision	Objectif et Application	Entrée et circulation des données	Rétroact./ Actuation	Modèle virtuel clair	Maturité estimée	Notes et éléments manquants
Ahmed et al. (2022)	PV	Diagnostic et progression d'anomalies ou maladies	Case Study	Patient	Imagerie Médicale	Proposition et test d'un modèle d'intégration et d'analyse d'imagerie médicale, associé avec un système hypothétique de prédiction de maintenance de machines non explicité.	Imprécis	+/- précis	Oui	2	Bien que la proposition globale soit affiliée à la gestion de système, aucun élément n'est explicité. Le seul aspect présenté est l'IA pour la détection de la Covid-19 avec l'imagerie.
Akash et al. (2022)	PV	Autres	Use-Case Framework	Patient	Stockage de données, Sécurité (Blockchain)	Modèle basé sur le Blockchain pour gérer et sécuriser les données d'un patient concernant l'état pré-, per- et post-opération.	Automatisée et manuelle	Pas mentionné	Non	2	Axé sur le Blockchain, pas sur le DT, modèle virtuel/visuel absent outre un algorithme de fonctionnement.
Alcaraz et al. (2019)	PV	Santé personnelle	Case Study	Athlète	Modélisation de la démarche	Modèle de régression polynomial pour faciliter la modélisation de la marche/posture des athlètes via des centrales à inertie (instrument de mesure)	Manuelle	N/A	Oui	2	Modèle virtuel d'analyse et intégration des données liées à la démarche des athlètes. Pièce pour éventuel DT
Aubert et al. (2020)	PV	Physiologie et intervention	Case Study	Organe	Tibias	Tests de scénarios de traitement sur le tibias d'un patient à l'aide d'un DT.	Manuelle	Non	Oui	2	DM, pas d'IoT, copie statique.
Barat et al. (2021)	SP	Plans de contingence	Case Study	Ville	Modèles de propagation et tests d'interventions	DT basé sur la simulation complexe de propagation de virus, et tests d'hypothèses d'interventions	Générées	Non	Oui	2	DM très complexe, simulation AB. Pas de données réelles intégrées, modélisations avec paramètres

Barbiero et al. (2021)	PV	Diagnostic et progression d'anomalies ou maladies	Case Study	Patient	Global, Pression, (autres)	Prédire l'état médical d'un patient à l'aide d'un DT basé sur l'IA.	Manuelle	Non	Oui	2	Modèle virtuel avec données statiques, pas de connexion
Baricelli et al. (2020)	PV	Santé personnelle	Case Study	Athlète	Activité, Nutrition, etc.	Proposer un DT basé sur l'IA pour effectuer des recommandations aux coaches et athlètes.	Manuelle et automatisée	Human-in-the-Loop	+/-	4	Plus proche d'un CPS, modèle virtuel invisible, donc pas accès à une vision globale de l'athlète
Batch et al. (2022)	PV	Diagnostic et progression d'anomalies ou maladies	Case Study	Cancer	Détection de cancer	Modèle de détection de cancer basé sur un modèle de Deep Learning impliquant des images historiques pour détecter les métastases.	Manuelle	N/A	+/-	2	La proposition est pour la construction d'un DT de cancer des patients, mais c'est le modèle de DL qui est montré.
Bende et al. (2020)	PV	Diagnostic et progression d'anomalies ou maladies	Case Study	Cœur	Détection d'anomalies cardiaques et diagnostic personnalisé	Modèle de ML pour analyser les caractéristiques du cœur et du patient et détecter des anomalies en temps réel.	Automatisée	Non	Oui	3	Le modèle semble se nourrir de données en temps réel, mais est seulement "accessible", on est donc dans le sur demande.
Bjelland et al. (2022)	PV	Physiologie et intervention	Use-Case Framework	Intervention	Genou	DT pour la planification et la simulation de chirurgies du genou	Manuelle et semi-automatisée	Non	Oui	2	Pas de capteurs en temps réel, données saisies avant l'usage du modèle
Chakshu et al. (2019)	PV	Diagnostic et progression d'anomalies ou maladies	Case Study	Système Cardiovasculaire	Carotide	Détecter les sténoses de carotide des patients à l'aide d'un DT basé sur la capture visuelle de vibrations.	Manuelle et automatisée	Non	+/-	3	DS, entrée automatisée restreinte, temps réel non démontré.
Chakshu et al. (2021)	PV	Diagnostic et progression d'anomalies ou maladies	Case Study	Système Cardiovasculaire	Aorte Abdominale	Détecter les anévrismes de l'aorte abdominale à l'aide de mesures d'ondes de pression aortique	Automatisée	Non	+/-	3	DS proposé, mais pas démontré, on mentionne brièvement un capteur portable.
Chakshu et Nithiarasu (2022)	PV	Diagnostic et progression d'anomalies ou maladies	Case Study	Patient	Pneumonie et sévérité des symptômes	Le modèle agit en trois temps: 1-identification des patients à haut risque 2-Choix de ventilation ou non en fonction du cas et 3- Interruption de la ventilation lorsque besoin terminé	Manuelle, continue, +/- clair	Non	+/-	3	Le modèle s'apparenterait à un niveau 3, mais la capture des données n'est pas claire, on parle de données en continu, mais pas d'infrastructure IoT ou de connexion discutée
Corral-Acero et al. (2020)	PV	Physiologie et intervention	Use-Case Framework	Système Cardiovasculaire	Cœur	DT pour la représentation d'un cœur et la détection de l'hypertrophie du myocarde	Manuelle	Non	Oui	2	Pas de connexion en temps réel, modèle de simulation

Cox et al. (2020)	PV	Santé globale	Brevet	Patient	Générique, systèmes internes ou organes	Le brevet implique la modélisation et la capture de données concernant au moins un système/organe du patient pour MAJ du modèle.	Automatisée	Human-in-the-Loop	Oui	4	Modèle semble complet, mais pas démontré.
DELL technologies	PV	Diagnostic et progression d'anomalies ou maladies	Cadrage de cas	Santé publique	Maladies et traitements à l'échelle globale	Intégrer les données des patients à une banque de donnée globale permettant des analyses complexes et l'identification de groupes spécifiques pour tests de traitements.	Automatisée et manuelle	+/-	Oui	3	Vision globale des soins, utiliser les données individuelles pour traiter la population. Rétroaction sous forme de proposition pour traitements, donc non dynamique et avec forte latence
Diaz et al. (2021)	PV	Santé personnelle	Case Study	Athlète	Suivi posture et suivi de l'activité	Évaluer si l'entraîneur suit correctement l'entraîneur à l'écran via caméra vidéo et modèle de Shallow learning prédéterminé	+/-	Non, mais proposée d'ajout	Oui	2-3	On sous-entend une captation des données en temps réel, mais pas abordé. Pas de rétroaction incluse à ce stade.
DigiPredict	PV	Diagnostic et progression d'anomalies ou maladies	Industry Project	Patient	Infection, système cardiovasculaire, inflammations	DT de suivi et de prédiction de l'évolution des maladies dans le corps et au niveau des organes à partir de données biométriques en temps réel.	Simulées	Non	Oui	3	Modèle complexe et détaillé, la proposition est future, mais cohérente avec niveau 3 (on parle de données à la minute près).
Digital Body Total (SEMIC)	PV	Santé Globale	Industry Project	Patient	Physiologie globale, micro à macro	Proposent un DT de modélisation de l'humain de la cellule au système en passant par l'organe, pour effectuer des tests d'hypothèses.	Manuelles	Non	Oui	2	Pas de données en temps réel, modèle statique dans lequel on insère des données à tester.
El Azaoui et al. (2021)	SP	Suivi et régulation de la population	Use-Case Framework	Population, ville	Suivi de contagion et traitement en hôpitaux	Basé sur le blockchain, suivi des données liées à Covid-19 et des tests pour identifier personnes à risque, mais aussi attribuer un hôpital en fonction de leurs ressources disponibles.	Manuelles, p-ê autres.	Oui	+/-	3-4	L'enjeu est la capture des données, toutes des données qui semblent saisies manuellement, mais si le système est performant cela peut être un bon DS, avec rétroaction
Elayan et al. (2021)	PV	Diagnostic et progression d'anomalies ou maladies	Case Study	Patient	Cœur	Système de DT permettant le suivi du patient en temps réel et	Automatisée	+/- précis	+/-	3	Problème de modèle, données en temps réel (3), mais pas de modèle virtuel interactif/visuel,

						la détection d'anomalies du cœur.						donc plutôt un CPS, et encore.
Ferdousi et al. (2021)	PV	Diagnostic et progression d'anomalies ou maladies	Case Study	Usager	Détection du stress	Tests de détection du stress des individus en fonction de données physiologiques et rapportées grâce à un modèle de ML	Automatisée et manuelle	Non	+/-	3		Le modèle détecte le stress à partir de données qui seraient en temps réel, mais ne fait que classer, pas de visualisation ou de rétroaction. Pertinence?
Fernández-Álvarez et al. (2022)	PV	Physiologie et intervention	Use-Case Framework	Patient	Épaule et prothèse	Modèle d'intégration d'imagerie médicale pour la création d'un DT d'épaule afin de planifier une opération.	Manuelle	Non	Oui	2		Données intégrées manuellement, pas d'update, modèle de simulation en fait.
Frossard et al. (2019; 2022) et Saxby et al. (2022)	PV	Santé personnelle	Case Study	Vétérans	Design et ajustement de prothèses	Modèles d'analyse et représentation du vétéran et de sa prothèse pour de meilleurs ajustement et un suivi éventuel en temps réel	Automatisée	+/-	Oui	4		Frontière entre santé et service social, réhabilitation.
Gámez Díaz (2020)	PV	Santé personnelle	Use-Case Framework	Athlète	Générique/ Performance	Proposition d'un écosystème de DT pour l'intégration des données d'un athlète pour sa collaboration avec un coach.	Automatisée et manuelle, temporalité imprécise	Oui, feedback direct et indirect (coach)	Oui (a priori)	4		Il manque certains éléments de précision, mais cohérent avec le concept de DT.
Hagmann et al. (2021)	HP	Régulation de l'intervention	Case Study	Chirurgie	Pratique virtuelle de chirurgie pour débutants	Ajout de marqueurs visuels en réalité augmentée pour guider la performance d'une simulation de chirurgie	Automatisée	Oui	Oui	4		Pas de jumeau physique, donc même si le système est en temps réel et virtuel, il ne représente pas un patient ou une opération réelle.
He et al. (2021)	PV	Santé Personnelle	Use-Case Framework	Usager	Réduction du stress sur les vertèbres lombaires	Modélisation et intégration des données liées à la posture pour étudier le stress imposé aux vertèbres et visualiser le stress pour le réduire via RV.	Automatisée	Oui	Oui	4		Modèle prédictif de risque en temps réel, la personne peut voir le risque actuel et s'ajuster en conséquence.
Hirschvogel et al. (2019)	PV	Physiologie et intervention	Case Study	Système Cardiovasculaire	Cœur	Modèle pour représenter et prédire la progression d'une intervention sur le cœur via un implant.	Manuelle	Non	Oui	2		L'intervention et le modèle sont séparés, le modèle est statique, pas d'IoT.



Human DT (OnePlanet Research Center)	PV	Santé personnelle	Industry Project	Patient	Nutrition, Stress, (autres)	Projet de DT pour l'analyse et les recommandations personnalisées basées sur la nutrition.	Automatisées	Human-in-the-Loop	Oui	4	Projet, pas de précisions supplémentaires pour l'instant.
Jamshidi et al. (2022)	PV	Diagnostic et progression d'anomalies ou maladies	Use-Case Framework	Patient	Cancer et progression de l'état	Algorithme de traitement (classification) des données. Proposition d'intégration à un modèle prédictif et de tests de traitements.	Manuelle	Non	+/-	2	Aucune visualisation, purement algorithme de classification/détection. Visualisation implicite, update manuel lors des tests médicaux.
Laaki et al. (2019)	HP	Régulation de l'intervention	Case Study	Intervention	Chirurgie	Créer un modèle de DT permettant de réguler l'opération du robot de chirurgie à distance via VR	Automatisée	+/-	+/-	4	Plus un CPS et RV qu'un DT. Modèle virtuel de données absent, contrôle à distance direct plutôt que via DT.
Laamarti et al. (2020)	PV	Santé personnelle	Case Study	Athlète	Activité	Proposition de DT permettant le feedback vers l'athlète en fonction de son activité, via une application.	Semi-Automatisée (IoT incomplet)	Oui	Oui	4	Niveau 4 selon proposition, mais IoT incomplet. Données transférées puis traitées et retournées manuellement.
Lal et al. (2020)	PV	Diagnostic et progression d'anomalies ou maladies	Case Study	Patient	Sepsis (réponse inflammatoire)	Produire un DT qui anticipe le changement d'état du patient sur plusieurs aspects.	Manuelle	Non	Oui	2	DM, n'est pas connecté aux données, modèle de simulation à partir de données en progression temporelle. Toutefois, l'article ne traite pas d'alimentation en données.
Landolfi et al. (2018)	PV	Santé personnelle	Use-Case Framework	Patient	Ergonomie	DT d'un patient ET de son DAD pour ergonomie du patient et commande et optimisation des pièces du DAD	Automatisée	Human-in-the-Loop	Oui	4	Proposition très hypothétique, mais loop bien intégré, précurseur de cohérence du concept. DT as a service.
Laubenbacher et al. (2022)	PV	Physiologie et intervention	Use-Case Framework	Patient	Système immunitaire	Développer des modèles avancés du système immunitaire pour mieux planifier des thérapies et établir des prédictions statiques	Manuelle	Non	Oui	2	Modèle de simulation complexe de système immunitaire qui permettrait d'entrer les données pour mieux étudier le patient ciblé.
Li et al. (2022)	PV	Physiologie et intervention	Use-Case Framework	Cellule	Génome et traitements médicaux	Développement d'un modèle computationnel pour modéliser les traitements médicaux sur des cellules et le génome.	Manuelle	Non	Oui	2	Modèle complexe d'interaction de paramètres dans les cellules de patients, mais demeure un modèle de

											simulation, les données sont statiques.
<b>Lombardo et Ricci (2022)</b>	<b>PV</b>	<b>Santé globale</b>	Use-Case Framework	Patient	Santé globale, progression et traitement	Intégration des données des différents organes requis par le cas dans un DT de patient à distance permettant un traitement personnalisé.	Automatisée	Oui	Oui	4	Modèle virtuel existant, mais peu ou pas visuel. Par contre, bonne intégration des données en continu et temps réel, rétroaction avec actuateurs.
<b>Marchal (2016) VPH</b>	<b>PV</b>	<b>Santé globale</b>	Industry Project	Patient	Systèmes et organes, physiologie	Précurseur de DT, un ensemble de modèles d'organes et systèmes finement modélisés pour une éventuelle intégration de données.	Manuelle	Non	Oui	2	La proposition est pour le développement d'un ensemble de DM des systèmes et organes, le Virtual Physiological Human.
<b>Martinez-Velasquez et al. (2019)</b>	<b>PV</b>	<b>Santé personnelle</b>	Case Study	Patient/ Athlète	Cœur/ ECG (Autres).	Proposition d'un modèle de DT, accent de l'Article sur l'analyse d'ECG et la capacité de traitement rapide.	Automatisée	Human-in-the-Loop	Oui	4	Modèle proposé cohérent, par contre seule démonstration est le modèle de classification ECG.
<b>Milne-Ives et al. (2022)</b>	<b>PV</b>	<b>Santé globale</b>	Case Study	Patient	Risques de comorbidité de maladies et conditions	Développement de modèles génériques de patients (personas) permettant d'identifier des risques à partir de caractéristiques individuelles	Manuelle	Non	Oui	2	Modèles de ML, et génériques, pas d'attache physique au modèle généré. "Coquille vide" d'analyse de risques (cœur, santé mentale, etc.)
<b>Mohapatra et al. (2020)</b>	<b>PV</b>	<b>Santé personnelle</b>	Use-Case Framework	Patient	Ergonomie	DT de positionnement du corps au travail (sédentaire) et d'identification des risques.	Automatisée	Human-in-the-Loop	Oui	4	Proposition hypothétique et simplifiée, mais cohérente. Interaction avec modèle 3D possible.
<b>Mourtzis et al. (2021)</b>	<b>PV</b>	<b>Diagnostic et progression d'anomalies ou maladies</b>	Use-Case Framework	Patient	Cancer/ Physiologie	Idée de DT pour la détection de cancer à partir de données d'IRM	Automatisée, unique	Non	Oui	2	Les données sont captées une fois, après c'est un modèle de traitement de données et détection. Potentiel de DS avec données continues.
<b>Ogunseiju et al. (2021)</b>	<b>PV</b>	<b>Santé personnelle</b>	Case Study	Travailleur	Ergonomie	DT permettant identifier les risques des mouvements effectués par des travailleurs	Automatisée	Human-in-the-Loop	Oui	4	Modèle semble très bien! Peu de détails sur la tech derrière, mais proposition solide.
<b>Okegbile et al. (2022)</b>	<b>PV</b>	<b>Santé globale</b>	Use-Case Framework	Patient	Paramètres physiologiques	Proposition globale de DT de patient, intégrant des données en temps réel et	Automatisée	Human-in-the-Loop	Oui	3	Proposition, la seule validation est liée à la latence de

						des diagnostics conséquents.					communication IoT du modèle.
<b>Pang et al. (2020)</b>	<b>SP</b>	<b>Plans de contingence</b>	Case Study	Réseau de villes	Tests de plans d'interventions globaux	DT de collaboration de VI via l'apprentissage fédéré pour l'amélioration des interventions et plans de contingence	Automatisée	+/- précis	+/- précis	3	Potentiel de niveau 4, mais les rétroactions et les connexions sont peu explicitées.
<b>Peterson (2019)</b>	<b>PV + HP</b>	<b>Régulation de l'intervention</b>	Brevet	Intervention	Chirurgie	Le brevet proposé intègre les données au cours de la chirurgie pour MAJ du DT du patient et de l'opération	Automatisée	Oui, feedback direct	Oui	4	Modèle proposé semble complet, mais n'est pas prouvé, appliqué.
<b>Rahman et al. (2022)</b>	<b>PV</b>	<b>Physiologie et intervention</b>	Use-Case Framework	Patient	Mécanismes d'action et traitements médicaux	Modélisation des mécanismes d'action des médicaments et du corps humain afin d'effectuer des tests et prédictions sans affecter les êtres vivants	Manuelle	Non	Oui	2	Modèle de simulation complexe pour les mécanismes d'actions des médicaments.
<b>Rao et Mane (2019)</b>	<b>PV</b>	<b>Diagnostic et progression d'anomalies ou maladies</b>	Use-Case Framework	Patient	Foie	DT de détection et diagnostic de maladies du foie à partir de données biochimiques	Manuelle	Non	+/-	2	Modèle virtuel sans interaction, plutôt un algorithme de détection, pas d'IoT.
<b>Rodriguez-Aguilar et al. (2020)</b>	<b>SP</b>	<b>Régulation et partage des ressources</b>	Cadrage de cas	Établissement(s)/Santé Publique	Gestion des ressources médicales et plans de contingence	Proposition d'un modèle de gestion des ressources et patients d'un hôpital et du réseau de soins spécialisés	Automatisée et manuelle	Non	Oui	3	Proposition d'un modèle de simulation hybride avec les trois types de modélisations, pour l'intégration et la planification des besoins et des ressources d'hôpitaux en cas de crises sanitaires. Semble plutôt être un DS, pas de désir d'intervention immédiate.
<b>Sahal et al. (2022)</b>	<b>PV</b>	<b>Santé globale</b>	Use-Case Framework	Patient	Organes, Mental, Social, Activité Physique	DT de gestion globale du patient dans différentes sphères, association de DT imbriqués de la personne	Automatisée	Human-in-the-Loop	Oui	4	Proposition forte et globale, Personal DT ou PDT. Article met l'accent sur Blockchain, mais le tout est plutôt cohérent.
<b>Saracco et al. (2020)</b>	<b>SP</b>	<b>Suivi et régulation de la population</b>	Use-Case Framework	Population, ville	Données de santé personnelle, régulation des activités.	Proposition de l'intégration des données du Personal DT pour la gestion de la santé publique, les données étant utilisées pour la	Automatisée et manuelle	Non, informatif	Oui	3	Modèle intègre les données anonymes personnelles pour identifier les problèmes de population. Au besoin, briser anonymité pour identifier les contagions

						régulation de la population					et réguler les activités. Seulement informatif.
Senlis (2021)	PV	Santé globale	Use-Case Framework	Patient	Paramètres physiologiques	Proposition globale de DT de patient, intégrant des données en temps réel et des diagnostics consécutifs.	Automatisée	Human-in-the-Loop	Oui	4	Proposition non-validée, mais cohérente avec un DT. Très hypothétique.
Shamanna et al. (2020, 2021)	PV	Santé personnelle	Case Study	Patient	Nutrition, Glycémie, Poids et Pression	Proposition d'un DT analysant la nutrition et les données corporelles pour offrir un feedback sur la nutrition.	Semi-automatisée	+/-	+/-	2-3	Niveau 2 ou 3, les feedback immédiats ne semblent pas liées aux données biométriques, et les données biométriques sont accessibles avec long délai.
Subramanian (2020)	PV	Physiologie et intervention	Use-Case Framework	Organe	Foie, (autres)	DT modélisant le fonctionnement du foie et les effets de traitements et maladies sur celui-ci.	Manuelle	Non	+/-	2	Modèle de traitement des données et simulations statiques, mais pas de visualisation ou d'interaction.
Subramanian et al. (2022)	PV	Diagnostic et progression d'anomalies ou maladies	Case Study	Patient	Reconnaissance Émotions	DT d'intégration des émotions et des traitements appropriés.	Automatisée	Human-in-the-Loop	Non, juste base de données	3	Pas un DT ou même un DS/DM, Algorithme de détection des émotions qui communique seulement le résultat.
Swedish DT Consortium & Bjornsson et al. (2020)	PV	Physiologie et intervention	Industry Project	Patient	Médication	DT pour le test de médicaments sur des versions digitales d'un humain	Manuelle	Non	Oui	2	DM multiples d'un même patient pour tester de multiples médicaments et identifier le meilleur.
Talukder et al. (2021)	PV + HP	Outil de diagnostic médical	Use-Case Framework	Diagnostic Médical	Connaissances médicales pour le triage	Représenter le diagnostic médical dans un réseau de graphes représentant les connaissances médicales actuelles pour simuler le processus décisionnel médical.	+/- précis	+/- précis	+/-	2	Ne représente pas de jumeau physique, mais un archétype médical. Modèle d'IA pour le diagnostic médical, pas de visuel mais difficile de "visualiser" des connaissances.
Tardini et al. (2022)	PV	Physiologie et intervention	Use-Case Framework	Patient	Cancer et traitement	Modéliser le patient malade ainsi que les parcours de traitement possible pour obtenir le parcours optimal de traitement pour chaque patient.	Manuelle	Non	Oui	2	Double modélisation combinée, une de choix de traitement en fonction du profil, et un de prédiction du résultat en fonction du traitement choisi.

The Simulated Patient (Empa, Andrea Six)	PV	Diagnostic et progression d'anomalies ou maladies	Industry Project	Patient	Médication et douleur	DT pour les test de médicaments et traitements de la douleur.	Manuelle, automatisée dans le futur	+/- précis	Oui	4	Douleur rapportée manuellement, plan d'intégrer ECG et respiration.
Trobinger et al. (2021)	PV + HP	Outil de diagnostic médical	Case Study	Examen médical	Examen à distance et interaction	Proposition d'un DT de patient et de médecin permettant l'examen à distance via un échange tactile avec des robots jumelés faisant office de capteurs et d'actuateurs.	Automatisée	Oui	Oui	4	Le modèle proposé se qualifie surtout au niveau du patient, le modèle virtuel du médecin n'étant pas présenté. Toutefois, l'échange et le diagnostic semblent se faire en temps réel.
Verma (2022)	SP	Régulation et partage des ressources	Conceptual	Patient, Système, Ville	Données globales, intégration	Proposition sommaire d'un modèle étagé permettant d'intégrer les données des patients, des hôpitaux, et éventuellement de la ville autour.	Automatisée	Oui, HITL et automatisée	Oui, +/-	5	Proposition de CPS avec extension de DT pour la santé à différents niveaux. Le niveau le plus avancé visé atteint 5, système autorégulé
Voigt et al. (2021)	PV	Diagnostic et progression d'anomalies ou maladies	Use-Case Framework	Patient	Sclérose en Plaques (SP)	Proposition de DT pour améliorer les diagnostics, interventions et traitements des patients	Automatisée et manuelle	Human-in-the-Loop (+/-)	Oui	4	Dashboard propose des interventions personnalisées, rétroaction non dirigée, mais présente.
Wan et al. (2021)	PV	Diagnostic et progression d'anomalies ou maladies	Use-Case Framework	Patient	Tumeurs du cerveau	Algorithme d'identification des tumeurs dans des images de cerveau issues d'IRM.	Manuelle	Non	+/-	2	L'algorithme semble capable d'identifier les points sur l'image, mais ne les représente pas graphiquement, pas vraiment de "jumeau"
Wickramasinghe et al. (2022)	PV	Diagnostic et progression d'anomalies ou maladies	Use-Case Framework	Patient	Cancer/ Physiologie	DT d'intégration de données globales	Manuelle ou semi-automatisée	Human-in-the-Loop	Oui	2	Ce modèle passerait au niveau 4 s'il était capable d'intégrer des données en temps réel.
Xing et al. (2022)	PV	Physiologie et intervention	Use-Case Framework	Patient	Cœur	Modèle de synthèse d'imagerie de vitesse myocardique pour un DT de cœur.	Manuelle	Non	Non	2	Pas très bien compris, mais rien à voir avec la représentation d'un jumeau physique réel il me semble.
Zhang et al. (2020)	PV	Autres	Use-Case Framework	Patient	Sécurité	Modèle d'analyse des vulnérabilités de données d'un DT, appliqué à un algorithme de classification pour le cancer	Manuelle	Interaction	Oui	2	Pas axé sur le DT, très secondaire. Algorithme AI d'analyse des vulnérabilités du système appliqué à la RV d'un DM.

<b>Zhang et Tai (2022)</b>	<b>HP</b>	<b>Régulation de l'intervention</b>	Case Study	Intervention	Chirurgie	Modèle de réalité virtuelle pour l'intervention chirurgicale supporté par un algorithme de sécurité et détection des vulnérabilités.	VR Automatisée, Patient Manuelle	Rétroaction de performance d'opération	Oui	2	RV est avancée et intéressante, mais pas vraiment un DT, le patient n'est pas connecté, c'est un modèle reconstruit.
<b>Zhao et al. (2021)</b>	<b>SP</b>	<b>Suivi et régulation de la population</b>	Case Study	Citoyen	Suivi des cas de Covid-19 et identification des risques	Modèle de suivi et détection de risques liés aux cas confirmés de Covid-19 via les téléphones intelligents et balises Bluetooth par les autorités sanitaires	Automatisée	+/-	+/- clair	3	L'actualisation des risques et la MAJ du système requièrent un travail manuel des autorités sanitaire, mais le calcul et l'identification à partir du système est automatisée.
<b>Zimmerman et al. (2019)</b>	<b>PV</b>	<b>Santé globale</b>	Brevet	Patient	Générique, Systèmes internes	Brevet pour la modélisation complexe d'un patient pour effectuer les simulations à partir de données génétiques, historiques, d'imagerie, etc.	Manuelle	Human-in-the-Loop	Oui	2	Pas de connexion en temps réel, modèle de simulation.

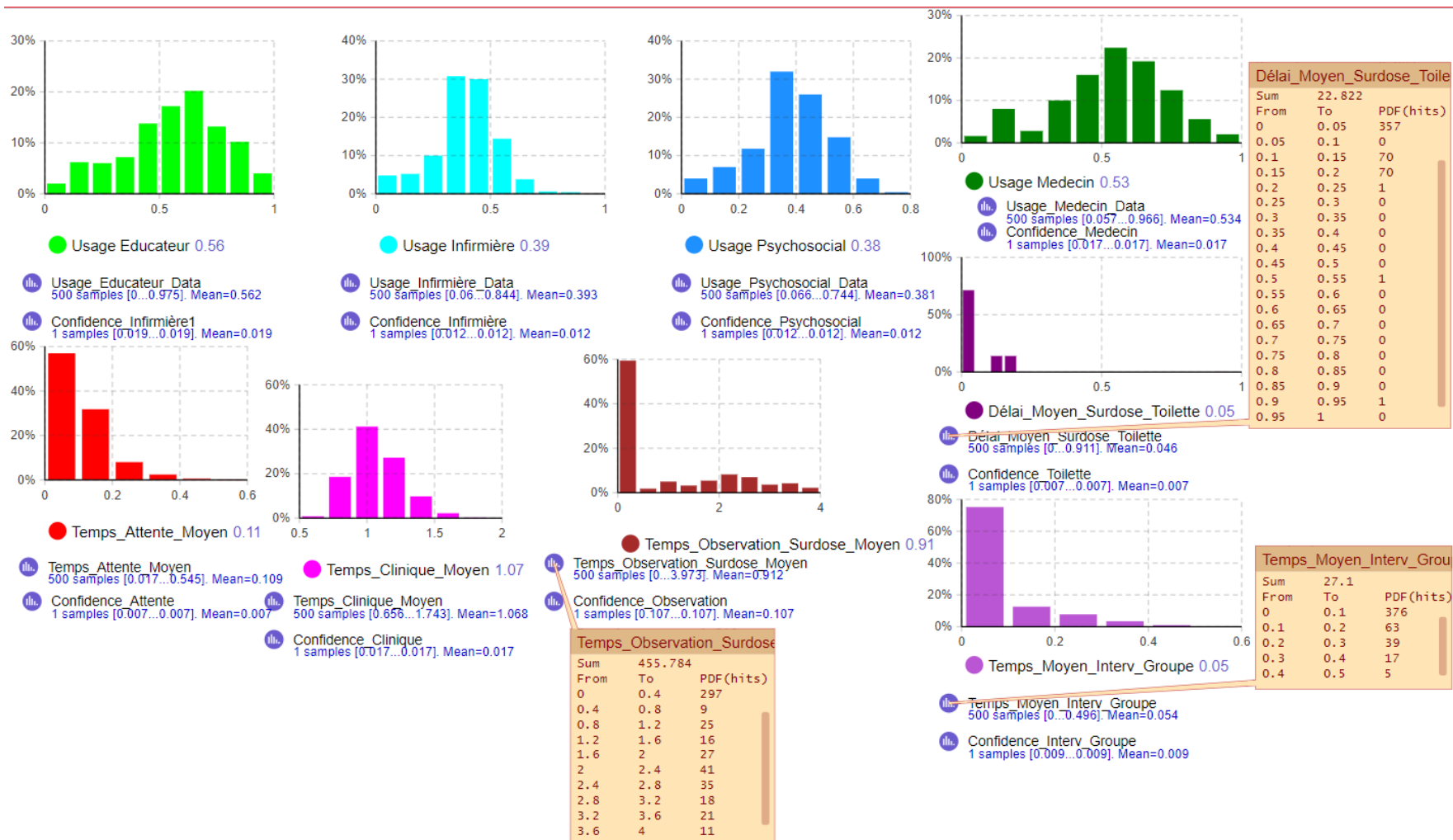
# ANNEXE B : MATRICE D'ANALYSE DES CAS EN GESTION DES SOINS

La matrice et son contenu sont malheureusement trop larges pour affichage lisible; pour les titres, voir l'aperçu en sous-chapitre 2.1.

Auteurs	Type d'article	Niveaux ciblés du modèle	Application principale	Suivi du patient	Focus du modèle	Détail	Gestion centralisée des données	Type de données	Traitement et analyse des données	Latence de connexion/capture	Capture/Entrée des données	Connexion intégrée	Détails de connexion	Visualisation et interaction	Design et Prototypage	Détails du modèle virtuel	Monitoring et Détection	Simulations et scénarios	Prédictions et pronostics	Évaluation et Diagnostics	Type de rétroaction	Rétroaction	Maturité estimée	Dimensions démontrées du DT (/5)	Axes couverts	Commentaires généraux
Augusto et al. (2018)	Cadrage et étude de cas	Établissements)	SPC	Parcours clinique	Parcours Clinique	Focus principal = ressources médicales humaines.	N/A	Paramètres estimés	Démontré	Sporadique	Manuelle	Démontré	Données de l'hôpital non fiables, donc seulement utilisées pour estimations.	Modèle de simulation	N/A	Pas de tableau de bord présent, pas d'optimisation de processus envisagé.	N/A	Démontré	N/A	N/A	N/A	N/A	2	Partielle (3 axes)	Modèle virtuel (simulation), base de données sporadiques manuelles et analyse de scénarios.	Modèle de simulation d'un hôpital, modifiable avec données sporadiques manuelles pour analyser des scénarios.
Croati et al. (2021), Croati et al. (2020)	Cadrage de cas	Établissements / Patients	SPC/PHM	Parcours Clinique et État	Parcours Clinique	Suivi de l'état du patient en lien avec les étapes et les ressources impliquées	Proposé	Primaires	Proposé	Temps (quasi) réel	Manuelle	Proposée	Les données sont entrées par des agents logiciels (i.e. employés) et l'entrée est immédiate	Résultats (Tableau de bord)	N/A	Tableau de bord plutôt vague à l'exception du statut du patient. Outil IA de support aux agents.	Proposé	N/A	Proposé	Proposé	Imprecis	Proposé	3	Proposition théorique	Aucune démonstration	Le modèle reçoit des infos en temps quasi réel, mais l'entrée et l'analyse sont manuelles. La rétroaction est plutôt informative que prescriptive, et implique des intermédiaires "manuels" très fréquents.
De Benedictis et al. (2022)	Étude de cas	Établissements)	SPC	Parcours clinique	Parcours Clinique	Application en industrie de gestion de santé (distanciation). Mais, proposition pour un hôpital.	Démontré	Primaires	Démontré	Temps (quasi) réel	Automatisée	Démontré	Données capturées avec latence de 4 secondes.	Vision globale et Résultats	N/A	Tableau de bord simple avec visuel de l'espace concerné	Démontré	N/A	Proposé	Imprecis	HITL- Prescriptif	Démontré	4	Complète (5 axes)	Modèle virtuel montrant réalité physique correspondante, connexions en temps quasi-réel, monitoring et calcul de risques, centralisation et traitement des données.	Modèle en temps réel, fonctionnel, avec rétroaction informative. Services basiques, mais un potentiel pour plus, est proposé (scénarios, analytique).
Hu et al. (2021)	Cadrage de cas	Établissements)	SPC	N/A	Espace et ressources matérielles	Identification et allocation de consommables en fonction des besoins des ressources médicales	Proposé	Primaires	Proposé	Imprecis	Automatisée	Proposée	Analyse d'image par CNN à partir de caméras, pas de tests ou prévisions.	N/A	N/A	Seul l'algorithme est détaillé	Proposé	Proposé	Proposé	N/A	Imprecis	Proposé	4	Partielle (1 axe)	Modèle de base d'utilisation et traitement des données.	Niveau 4 estimé, mais manque énormément d'information, seul l'algorithme de traitement des données est détaillé.
Karakra et al. (2022), Karakra et al. (2018, 2020)	Cadrage et étude de cas	Établissements)	SPC	Parcours clinique	Parcours Clinique	Focus sur le parcours clinique et les détails, ressources sont secondaires	Imprecis	Primaires et secondaires	Démontré	Imprecis	Automatisée	Proposée	IoT brièvement mentionné, mais le cas est 100% lié à la simulation.	Vision globale et Résultats	Via Modélisation	Visuel clair du système et des résultats	Proposé	Démontré	Démontré	N/A	Imprecis	Proposé	3	Partielle (3 axes)	Modèle virtuel complexe avec visuel, centralisation et traitement des données, suivi et prédiction d'état du système	Il manque de détails et de complexité autour de l'utilisation de données réelles. On suppose un niveau 3, mais un niveau 4 pourrait être atteint avec une rétroaction plus nette (l'info doit être plus que "disponible").
Hasting (2021) - Johns Hopkins Hospital (GE Healthcare)	Application industrielle	Établissements)	SPC	Parcours clinique	Ressources médicales	Centre de commande de gestion et d'allocation des lits ainsi que du transport des patients	Démontré	Primaires et secondaires	Démontré	Imprecis	Imprecis	Démontré	Il manque un peu de détail sur la source des données, mais le centre de commande semble fonctionner en temps réel.	Vision globale et Résultats	N/A	Il s'agit d'un énorme tableau de bord, avec les informations individuelles visibles. Pas de visibilité de l'espace en soi, mais tout est accessible et visible.	Démontré	Imprecis	Démontré	N/A	HITL- Prescriptif	Démontré	3	Complète (5 axes)	Tous les axes, le modèle virtuel et la nature des prédictions ne sont pas très clair, mais le modèle est éprouvé.	Le modèle semble mériter un niveau 4, les seuls enjeux étant le manque de prescriptivité du système, une équipe entière étant attelée à la lecture du tableau de bord pour coordonner les opérations.
Uu, WeiBo et al. (2020)	Étude de cas	Établissements)	SPC/PPLD	N/A	Espace et ressources matérielles	Design futur d'un hôpital et planification des services et de la logistique à l'intérieur pour le service aux usagers	N/A	Paramètres estimés	Démontré	N/A	Manuelle	Démontré	Modèle de simulation pur, pas de données réelles (prospectif).	Modèle de simulation	Via Modélisation	Visuel - modèle de simulation	N/A	Démontré	N/A	N/A	N/A	N/A	2	Partielle (2 axes)	Modèle virtuel de simulation et simulation de scénarios et de paramètres.	Modèle numérique (DM), simulation pure représentative d'un plan d'hôpital (planification d'espace et de processus).
Uu, Ying et al. (2019)	Cadrage et étude de cas	Établissements / Patients	SPC/PHM	Parcours Clinique et État	Soins personnalisés et ressources médicales	Suivi des patients et des ressources de l'hôpital, suivi et ajustement des traitements et de la gestion globale.	Proposé	Primaires et secondaires	Proposé	Temps (quasi) réel	Automatisée	Variable/ Partielle	Connexion semble démontrée pour un ECG, mais c'est tout. Par contre, proposition claire et IoT multi-usage et d'analyse en temps réel.	Vision globale et Résultats	Imprecis	Modèle proposé mais pas démontré pour une interface de services multiples. Télé-médecine proposée, autrement on ne sait pas ce qui est accessible.	Démontré	Démontré	Imprecis	Proposé	HITL- Prescriptif	Imprecis	4	Partielle (3 axes)	Réalité physique (ECG connecté), connexion avec serveur cloud (pas très clair), services de proposition de médicament (pas clair) et gestion de capacité d'hôpital.	Le modèle est proposé et est vraiment complet et bien intégré pour la gestion des personnes âgées, de leur santé, et des ressources associées, mais la démonstration manque de détail (ce que le modèle fait vs devrait faire).
Uu, Yining et al. (2022)	Étude de cas	Établissements)	SPC	Parcours clinique	Ressources médicales	Représentation de l'urgence et des patients, pour planification des ressources.	Non	Secondaires	N/A	Sporadique	Manuelle	Imprecis	Information entre système d'information de l'hôpital et DT, nature de connexion imprecise.	Vision globale et Résultats	Via Modélisation	Visualisation de l'espace et des patients, avec un modèle actif et un modèle prospectif.	Proposé	Démontré	Proposé	N/A	N/A	N/A	2-3	Partielle (3 axes)	Modèle virtuel de simulation, service de scénarios et prédiction. Réalité physique problématique car imprecise.	Il y a beaucoup de trous liés à la capture des données et à la connectivité. Connexions des données sporadiques de l'hôpital permettent-elles la visualisation du système tel que présenté?
Uu et al. (2021)	Cadrage de cas	Établissements / Santé Publique	SPC	Parcours clinique	Ressources médicales	Coordination des soins médicaux et des ressources intra- et inter-hospitaliers	Proposé	Primaires et secondaires	Proposé	Imprecis	Imprecis	Proposée	Connexion des informations entre hôpitaux via Blockchain	N/A	N/A	Pas d'explications sur le modèle	Imprecis	Imprecis	Proposé	Proposé	N/A	N/A	3	Proposition théorique	Aucune démonstration, proposition sommaire.	Proposition pour un système de gestion des données entre hôpitaux concernant les données des patients et ressources médicales.
Moorfields Eye Hospital, Cambridge University (2022)	Cadrage et étude de cas	Établissements / Patients	SPC	État du patient	Parcours Clinique	DT pour accompagner les patients avec des troubles oculaires dans leur accès et navigation du système de soins	Proposé	Primaires et secondaires	Proposé	Temps (quasi) réel	Automatisée et manuelle	Proposée	Très générique, mais on parle d'infos en temps réel.	N/A	N/A	On parle peu du modèle, surtout de services qui en découlent.	Proposé	N/A	N/A	Proposé	HITL- Actif	Proposé	4	Proposition théorique	Aucune démonstration, mais le niveau de service offert implique une couverture appropriée des 5 dimensions.	Étude de cas futur de l'hôpital de Moorfields, spécialisé en soins des yeux et de la vue. Projet et hypothèses d'intégration digitale pour accompagner les patients avec vision réduite ou nulle.
Patrone et al. (2022)	Étude de cas	Établissements)	SPC	Parcours clinique	Parcours Clinique	Suivi des opérations et interventions pour planification et gestion de temps.	Proposé	Primaires	N/A	Sporadique	Manuelle	N/A	Boutons IoT activés manuellement, infos stockées dans une base de données qui servira à la simulation	N/A	N/A	Pas de détails sur un possible modèle virtuel observable, modèle de simulation accessible.	N/A	Démontré	Proposé	N/A	N/A	N/A	2	Partielle (2 axes)	Données captées sur la réalité physique pour virtualisation, modèle de simulation et traitement des scénarios	Bouton activé manuellement, transfert manuel de base de données, modèle élaboré et sans interface.
Peng et al. (2020)	Étude de cas	Établissements)	SPC/PHM/PPLD	N/A	Espace et ressources matérielles	Modélisation d'un hôpital, de ses ressources matérielles et humaines, et de ses systèmes.	Démontré	Primaires	Démontré	Temps (quasi) réel	Automatisée	Démontré	Connexions via multiples capteurs et systèmes d'informations.	Vision globale et Résultats	Via Modélisation	Modèle et tableau de bord bien illustrés, interactifs et modifiables, avec analytique complexe des informations.	Démontré	N/A	Imprecis	Démontré	HITL- Actif	Démontré	4	Complète (5 axes)	Réalité physique avec multiples capteurs, base de données énorme et optimisée, modèle virtuel développé, services de tracking et maintenance, et connexion constante avec latence au moins quasi-réelle	Probablement le modèle le plus développé trouvé, gestion beaucoup plus matérielle (énergie, eau, volume de passage, réparations) qu'axé sur les ressources. Donc l'outil de l'ingénierie appliquée dans un hôpital. Permet néanmoins de valider la classification et la performance possible.
Pilat et al. (2021)	Étude de cas	Établissements)	SPC	Ressources médicales	Ressources Médicales	Allocation et planification des ressources dans un centre de vaccination	Démontré	Primaires	Démontré	Latence importante	Automatisée et manuelle	Variable/ Partielle	Des connexions sont présentes, mais demandent un travail manuel (i.e. téléphone capte durée de traitement, mais l'envoi est manuel).	Vision globale et Résultats	Via Modélisation	Modèle de simulation visuel de l'agenda de vaccination, et visualisation proposée des résultats et performances.	Démontré	Démontré	Imprecis	Démontré	N/A	N/A	2-3	Partielle (4 axes)	Modèle très complet en soi, et qui apporte une plus-value importante. La nature de la connexion laisse sur un niveau de maturité entre 2 et 3, mais le potentiel pour un niveau 3 est là. Pas de rétroaction spécifique.	Modèle très complet en soi, et qui apporte une plus-value importante. La nature de la connexion laisse sur un niveau de maturité entre 2 et 3, mais le potentiel pour un niveau 3 est là. Pas de rétroaction spécifique.
Rodriguez-Agular et al. (2020)	Cadrage de cas	Établissements / Santé Publique	SPC/PPLD	Parcours Clinique et État	Ressources médicales	Proposition d'un modèle de gestion des ressources et patients d'un hôpital et du réseau de soins spécialisés	Proposé	Primaires et secondaires	Proposé	Temps (quasi) réel	Automatisée et manuelle	Proposée	Connexion via des capteurs de données sur les ressources, lieux et patients.	Vision globale et Résultats	Via Modélisation	Peu détaillé, mais bon visuel via la simulation.	Proposé	Proposé	Proposé	Proposé	Imprecis	Imprecis	3	Proposition théorique	Aucun axé démontré, mais tous les axes sont proposés de manière sommaire.	Proposition d'un modèle de simulation hybride avec les trois types de modélisations, pour l'intégration et la planification des besoins en ressources d'hôpitaux en cas de crises sanitaires. Semble plutôt être un DS, pas de désir d'intervention spécifique.
Siemens Healthiners (2018)	Cadrage et étude de cas	Établissements)	SPC/PPLD	Parcours clinique	Ressources médicales	Optimisation des processus et design d'hôpital pour le flux de patients, les ressources, et la gestion de l'espace.	N/A	Paramètres estimés	Imprecis	N/A	Manuelle	N/A	Entrée des paramètres dans le modèle pour générer des scénarios.	Modèle de simulation	Via Modélisation	Modèle de simulation pur, pas de détail. Opérations au cœur du modèle.	N/A	Démontré	Imprecis	Démontré	N/A	N/A	2	Partielle (2 axes)	Modèle virtuel de simulation élaboré, et services offerts de redesign et optimisation plutôt clair.	C'est un modèle de simulation avancé, mais pas un DT en soi, aucune données extraites de la réalité, et pas de rétroaction autre qu'un résultat de simulation.
Zhong et al. (2022)	Cadrage et étude de cas	Établissements)	SPC/PPLD	Parcours Clinique et État	Ressources médicales	Optimisation des opérations d'un hôpital avec intérêt pour état simple du patient	N/A	Paramètres estimés	Démontré	N/A	Manuelle	N/A	Paramètres issus de l'analyse de données historiques de l'hôpital.	Modèle de simulation	Via Modélisation	Modèle de simulation pur, avec beaucoup de complexité.	N/A	Démontré	Démontré	N/A	N/A	N/A	2	Partielle (2 axes)	Modèle virtuel de simulation hybride et de paramètres pris en compte. Par contre, aucune données synchrones, n'est pas "attaché" au système réel.	Modèle de simulation assez évolué, beaucoup de détails et de paramètres pris en compte. Par contre, aucune données synchrones, n'est pas "attaché" au système réel.

# ANNEXE C : RÉSULTATS DES SCÉNARIOS DE SIMULATION POUR LA CLINIQUE

## Scénario A : Opérations régulières avec les données actuelles de la Clinique

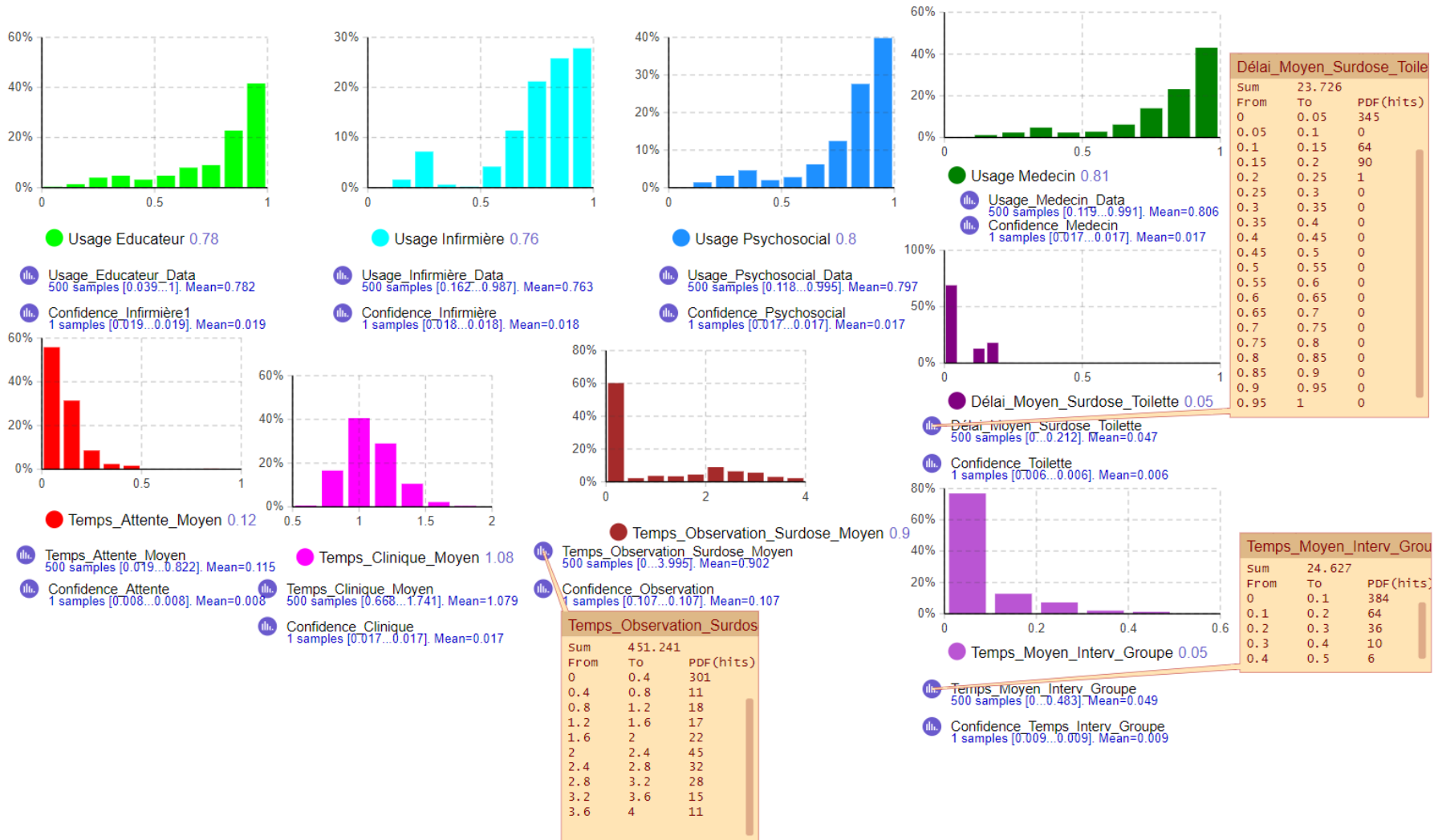


N.B. Le descriptif de cette figure et de la suivante est présenté à leur suite.



## ANNEXE C (suite)

### Scénario B : Opérations régulières incluant une charge de travail administrative ou clinique supplémentaire invisibilisée :



## ANNEXE C(suite)

### Description des figures pour le Scénario A et le Scénario B :

Les deux scénarios présentent les mêmes indicateurs de performance, calculés sur 500 répliques avec variations aléatoires de paramètres. Les graphiques représentent la distribution des résultats finaux de simulation pour l'ensemble des 500 répliques, la moyenne étant écrite à droite du titre sous chaque graphique. Sous chacun des titres, on retrouve l'étendue et l'intervalle de confiance des résultats.

Les quatre graphiques du haut représentent la distribution de l'utilisation de chaque type de ressources sur les 500 répliques, la moyenne étant en ratio sur 1. Les deux premiers graphiques en bas à gauche (en rouge pâle et en rose) représentent respectivement, la durée moyenne en heure passée dans la Clinique et passée en attente pour consulter la ressource choisie.

Le troisième graphique à partir d'en bas à gauche (rouge foncé) représente la distribution du temps moyen passé en observation après une surdose. Les deux derniers graphiques restants représentent, de haut en bas, le délai moyen avant une intervention lors d'une surdose dans les toilettes et la durée moyenne des interventions d'équipe lorsqu'il y a une crise d'agressivité, ces trois indicateurs étant mesurés en heures. Pour ces résultats liés aux interventions spéciales, la moyenne est très peu représentative, puisque ce sont des événements peu fréquents. Les bulles de texte en beige affichent donc les résultats par intervalles fixés, ce qui en a permis une analyse sommaire en chapitre 4.

## RÉFÉRENCES

- Aheleroff, S., Xu, X., Zhong, R. Y. et Lu, Y. (2021). Digital Twin as a Service (DTaaS) in Industry 4.0: An Architecture Reference Model. *Advanced Engineering Informatics*, 47(August 2020), 101225. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2020.101225>
- Ahmadi-Assalemi, G., Al-Khateeb, H., Maple, C., Epiphaniou, G., Alhaboby, Z. A., Alkaabi, S. et Alhaboby, D. (2020). Digital Twins for Precision Healthcare. Dans H. Jahankhani, S. Kendzierskyj, N. Chelvachandran et J. Ibarra (dir.), *Cyber Defence in the Age of AI, Smart Societies and Augmented Humanity* (1<sup>re</sup> éd., chap. 8, p. 133-158). Springer Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-35746-7\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-030-35746-7_8)
- Ahmed, I., Ahmad, M. et Jeon, G. (2022). Integrating Digital Twins and Deep Learning for Medical Image Analysis in the era of COVID-19. *Virtual Reality and Intelligent Hardware*, 4(4), 292-305. <https://doi.org/10.1016/j.vrih.2022.03.002>
- Akash, S. S. et Ferdous, M. S. (2022). A Blockchain Based System for Healthcare Digital Twin. *IEEE Access*, 10, 50523-50547. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3173617>
- Al Kez, D., Foley, A. M., Laverty, D., Del Rio, D. F. et Sovacool, B. (2022). Exploring the sustainability challenges facing digitalization and internet data centers. *Journal of Cleaner Production*, 371. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.133633>
- Alazab, M., Khan, L. U., Koppu, S., Ramu, S. P., M, I., Boobalan, P., Baker, T., Maddikunta, P. K. R., Gadekallu, T. R. et Aljuhani, A. (2022). Digital Twins for Healthcare 4.0 - Recent Advances, Architecture, and Open Challenges. *IEEE Consumer Electronics Magazine*, (June), 1-8. <https://doi.org/10.1109/MCE.2022.3208986>
- Alcaraz, J. C., Moghaddamnia, S., Fuhrwerk, M. et Peissig, J. (2019). Efficiency of the memory polynomial model in realizing digital twins for gait assessment. *European Signal Processing Conference, 2019-Septe*. <https://doi.org/10.23919/EUSIPCO.2019.8903143>
- Ancil, G. (2022). *Proposition d'amélioration du processus de prise en charge des usager-ère-s de la Clinique le Relais au CIUSSS du Centre-Sud-de-l'Île-de-Montréal*.

- Aubert, K., Germaneau, A., Rochette, M., Ye, W., Severyns, M., Billot, M., Rigoard, P. et Vendevre, T. (2021). Development of Digital Twins to Optimize Trauma Surgery and Postoperative Management. A Case Study Focusing on Tibial Plateau Fracture. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 9, 856. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.722275>
- Augusto, V., Murgier, M. et Viallon, A. (2018). A Modelling And Simulation Framework For Intelligent Control Of Emergency Units In The Case Of Major Crisis. Dans *2018 Winter Simulation Conference (WSC)* (vol. 2018-Decem, p. 2495-2506). IEEE. <https://doi.org/10.1109/WSC.2018.8632438>
- Bahrami, F., Rossi, R. M. et Defraeye, T. (2022). Predicting transdermal fentanyl delivery using physics-based simulations for tailored therapy based on the age. *Drug Delivery*, 29(1), 950-969. <https://doi.org/10.1080/10717544.2022.2050846>
- Barat, S., Parchure, R., Darak, S., Kulkarni, V., Paranjape, A., Gajrani, M., Yadav, A. et Kulkarni, V. (2021). An Agent-Based Digital Twin for Exploring Localized Non-pharmaceutical Interventions to Control COVID-19 Pandemic. *Transactions of the Indian National Academy of Engineering*, 6(2), 323-353. <https://doi.org/10.1007/s41403-020-00197-5>
- Barbiero, P., Viñas Torné, R. et Lió, P. (2021). Graph Representation Forecasting of Patient's Medical Conditions: Toward a Digital Twin. *Frontiers in Genetics*, 12(September), 1-21. <https://doi.org/10.3389/fgene.2021.652907>
- Barrett, M., Lee, E., Oborn, E. et Prince, K. (s. d.). *Smart Hospital of the Future: Digital technologies, service innovation, and hospital design*. Centre for Digital Built Britain. Récupéré le 12 mars 2022 de <https://www.cdbb.cam.ac.uk/research/digitally-enabled-living/smart-hospital-future-digital-technologies-service-innovation-and>
- Barricelli, B. R., Casiraghi, E., Gliozzo, J., Petrini, A. et Valtolina, S. (2020). Human Digital Twin for Fitness Management. *IEEE Access*, 8, 26637-26664. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2971576>
- Batch, K. E., Yue, J., Darcovich, A., Lupton, K., Liu, C. C., Woodlock, D. P., El Amine, M. A. K., Causa-Andrieu, P. I., Gazit, L., Nguyen, G. H., Zulkernine, F., Do, R. K. G. et Simpson, A.

- L. (2022). Developing a Cancer Digital Twin: Supervised Metastases Detection From Consecutive Structured Radiology Reports. *Frontiers in Artificial Intelligence*, 5(March), 1-10. <https://doi.org/10.3389/frai.2022.826402>
- Bende, A. et Gochhait, S. (2020). Leveraging Digital Twin Technology in the Healthcare Industry- A Machine Learning Based Approach. *European Journal of Molecular & Clinical Medicine*, 7(06), 6.
- Bjelland, O., Rasheed, B., Schaathun, H. G., Pedersen, M. D., Steinert, M., Hellevik, A. I. et Bye, R. T. (2022). Toward a Digital Twin for Arthroscopic Knee Surgery: A Systematic Review. *IEEE Access*, 10, 45029-45052. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3170108>
- Björnsson, B., Borrebaeck, C., Elander, N., Gasslander, T., Gawel, D. R., Gustafsson, M., Jörnsten, R., Lee, E. J., Li, X., Lilja, S., Martínez-Enguita, D., Matussek, A., Sandström, P., Schäfer, S., Stenmarker, M., Sun, X. F., Sysoev, O., Zhang, H. et Benson, M. (2020). Digital twins to personalize medicine. *Genome Medicine*, 12(1), 4. <https://doi.org/10.1186/s13073-019-0701-3>
- Botín-Sanabria, D. M., Mihaita, S., Peimbert-García, R. E., Ramírez-Moreno, M. A., Ramírez-Mendoza, R. A. et Lozoya-Santos, J. de J. (2022). Digital Twin Technology Challenges and Applications: A Comprehensive Review. *Remote Sensing*, 14(6), 1-25. <https://doi.org/10.3390/rs14061335>
- Bottani, E., Cammardella, A., Murino, T. et Vespoli, S. (2017). From the cyber-physical system to the digital twin: The process development for behaviour modelling of a cyber guided vehicle in M2M logic. *Proceedings of the Summer School Francesco Turco, 2017-Sette*, 96-102.
- Bouchard, L., Arruda, H., Jobin, L., Opatrny, L. et Lessard, J. (2019). *Le Dossier santé numérique et son écosystème*. [https://www.msss.gouv.qc.ca/inc/documents/ministere/acces\\_info/demandes-acces/2020-2021/2020-2021-332-Document.pdf](https://www.msss.gouv.qc.ca/inc/documents/ministere/acces_info/demandes-acces/2020-2021/2020-2021-332-Document.pdf)

- Bruynseels, K., de Sio, F. S. et van den Hoven, J. (2018). Digital Twins in health care: Ethical implications of an emerging engineering paradigm. *Frontiers in Genetics*, 9(February), 11. <https://doi.org/10.3389/FGENE.2018.00031/BIBTEX>
- Caron, D. J., Nicolini, V., Bernardi, S. et Lamontagne, R. (2021a). *L'utilisation des systèmes informationnels comme levier à l'amélioration de la performance dans les trajectoires usager-ère-s*.
- Caron, D. J., Nicolini, V., Bernardi, S. et Lamontagne, R. (2021b). *Partage des données en santé au Québec : modélisation et cartographie des trajectoires de partage des données*. [https://espace.enaq.ca/id/eprint/322/1/partage\\_donnees\\_sante\\_Caron\\_20220114.pdf](https://espace.enaq.ca/id/eprint/322/1/partage_donnees_sante_Caron_20220114.pdf)
- Chakshu, N. K., Carson, J., Sazonov, I. et Nithiarasu, P. (2019). A semi-active human digital twin model for detecting severity of carotid stenoses from head vibration—A coupled computational mechanics and computer vision method. *International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering*, 35(5), 1-17. <https://doi.org/10.1002/cnm.3180>
- Chakshu, N. K. et Nithiarasu, P. (2022). An AI based digital-twin for prioritising pneumonia patient treatment. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, 236(11), 1662-1674. <https://doi.org/10.1177/09544119221123431>
- Chakshu, N. K., Sazonov, I. et Nithiarasu, P. (2021). Towards enabling a cardiovascular digital twin for human systemic circulation using inverse analysis. *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology*, 20(2), 449-465. <https://doi.org/10.1007/s10237-020-01393-6>
- Chase, J. G., Zhou, C., Knopp, J. L., Shaw, G. M., Näswall, K., Wong, J. H. K., Malinen, S., Moeller, K., Benyo, B., Chiew, Y. S. et Desai, T. (2021). Digital twins in critical care: What, when, how, where, why? *IFAC-PapersOnLine*, 54(15), 310-315. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.10.274>
- Coorey, G., Figtree, G. A., Fletcher, D. F., Snelson, V. J., Vernon, S. T., Winlaw, D., Grieve, S. M., McEwan, A., Yang, J. Y. H., Qian, P., O'Brien, K., Orchard, J., Kim, J., Patel, S. et Redfern, J. (2022, 26 août). *The health digital twin to tackle cardiovascular disease—a review*

of an emerging interdisciplinary field. *npj Digital Medicine*, 5(1), 1-12. Nature Publishing Group. <https://doi.org/10.1038/s41746-022-00640-7>

Corral-Acero, J., Margara, F., Marciniak, M., Rodero, C., Loncaric, F., Feng, Y., Gilbert, A., Fernandes, J. F., Bukhari, H. A., Wajdan, A., Martinez, M. V., Santos, M. S., Shamohammdi, M., Luo, H., Westphal, P., Leeson, P., DiAchille, P., Gurev, V., Mayr, M., ... Lamata, P. (2020). The ‘Digital Twin’ to enable the vision of precision cardiology. *European Heart Journal*, 41(48), 4556-4564. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehaa159>

Costello, K. (Gartner) et Omale, G. (Gartner). (2019). *Gartner Survey Reveals Digital Twins Are Entering Mainstream Use*. Gartner Press Release. <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2019-02-20-gartner-survey-reveals-digital-twins-are-entering-mainstream-use>

Cox, L. G. E., Hendriks, C. P., Bulut, M., Lavezzo, V. et Van Der Sluis, O. (2020). *Digital Twin Operation* (US 2020/0185107 A1). Patent Application Publication.

Croatti, A., Gabellini, M., Montagna, S. et Ricci, A. (2020). On the Integration of Agents and Digital Twins in Healthcare. *Journal of Medical Systems*, 44(9), 161. <https://doi.org/10.1007/s10916-020-01623-5>

Croatti, A., Ricci, A. et Montagna, S. (2021). Pervasive and Connected Digital Twins; A Vision for Digital Health. *IEEE Internet Computing*, 7801(c), 1-8. <https://doi.org/10.1109/MIC.2021.3052039>

De Benedictis, A., Mazzocca, N., Somma, A. et Strigaro, C. (2022). Digital Twins in Healthcare: an architectural proposal and its application in a social distancing case study. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, XX(Xx), 1-12. <https://doi.org/10.1109/JBHI.2022.3205506>

DELL Technologies. (s. d.). *The Learning Health System: Leveraging the Power of Collective Data and AI-driven Research for Individual Impact*. Récupéré le 14 février 2023 de <https://www.delltechnologies.com/asset/en-us/solutions/business-solutions/briefs-summaries/dell-i2b2-infographic.pdf>

- Diaz, R. G., Laamarti, F. et El Saddik, A. (2021). DTCoach: Your Digital Twin Coach on the Edge during COVID-19 and beyond. *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*, 24(6), 22-28. <https://doi.org/10.1109/MIM.2021.9513635>
- Dixon, B. E. et Holmes, J. H. (2022). Special Section on Inclusive Digital Health: Notable Papers on Addressing Bias, Equity, and Literacy to Strengthen Health Systems. *Yearbook of Medical Informatics*, 31(1), 100-104. <https://doi.org/10.1055/S-0042-1742536>
- Drummond, D. et Coulet, A. (2022). Technical, Ethical, Legal, and Societal Challenges With Digital Twin Systems for the Management of Chronic Diseases in Children and Young People. *Journal of Medical Internet Research*, 24(10), 1-13. <https://doi.org/10.2196/39698>
- EL Azzaoui, A., Kim, T. W., Loia, V. et Park, J. H. (2021). Blockchain-based secure digital twin framework for smart healthy city. Dans J. J. Park, V. Loia, Y. Pan et Y. Sung (dir.), *Advanced Multimedia and Ubiquitous Engineering* (vol. 716, p. 107-113). Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2021. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-9309-3\\_15/COVER](https://doi.org/10.1007/978-981-15-9309-3_15/COVER)
- Elayan, H., Aloqaily, M. et Guizani, M. (2021). Digital Twin for Intelligent Context-Aware IoT Healthcare Systems. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(23), 16749-16757. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3051158>
- Eriksson, K., Alsaleh, A., Behzad Far, S. et Stjern, D. (2022). Applying Digital Twin Technology in Higher Education: An Automation Line Case Study. *Advances in Transdisciplinary Engineering*, 21, 461-472. <https://doi.org/10.3233/ATDE220165>
- Erol, T., Mendi, A. F. et Dogan, D. (2020). The Digital Twin Revolution in Healthcare. Dans *4th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies, ISMSIT 2020 - Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/ISMSIT50672.2020.9255249>
- Evans, S., Savian, C., Burns, A. et Cooper, C. (2019). Digital twins for the built environment. *IET Impact & Society Factfiles*, 1-21. <https://doi.org/10.1201/9781003204381-10>
- Fang, X., Wang, H., Liu, G., Tian, X., Ding, G. et Zhang, H. (2022). Industry application of digital twin: from concept to implementation. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 121(7-8), 4289-4312. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09632-z>



- Ferdousi, R., Hossain, M. A. et El Saddik, A. (2021). IoT-enabled model for Digital Twin of Mental Stress (DTMS). *2021 IEEE Globecom Workshops, GC Wkshps 2021 - Proceedings*, (December). <https://doi.org/10.1109/GCWkshps52748.2021.9681996>
- Ferdousi, R., Laamarti, F., Hossain, M. A., Yang, C. et El Saddik, A. (2022). Digital twins for well-being: an overview. *Digital Twin*, 1, 7. <https://doi.org/10.12688/digitaltwin.17475.2>
- Ferguson, S. (2020). *Apollo 13: The First Digital Twin*. Siemens Blog. <https://blogs.sw.siemens.com/simcenter/apollo-13-the-first-digital-twin/>
- Fernández-Álvarez, J. J., Roces-García, J., Lamela-Rey, M. J. et Pena-Vázquez, J. (2022). Digital Twin Validation for Shoulder Joint Biomechanical Simulation. *Dyna (Spain)*, 97(6), 10-12. <https://doi.org/10.6036/10656>
- Fountain, J. E. (2022). The moon, the ghetto and artificial intelligence: Reducing systemic racism in computational algorithms. *Government Information Quarterly*, 39, 101645. <https://doi.org/10.1016/j.giq.2021.101645>
- Frossard, L. A., Langton, C. M., Barrett, R. S. et Lloyd, D. G. (2022). Can a digital twin of the residuum improve bionic solutions for individuals suffering from limb loss? *Journal of Science and Medicine in Sport*, 25(5), S4-S5. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2021.11.012>
- Frossard, L., Powrie, R. et Langton, C. (2019). In-Vivo Kinetic system to sustain residuum health of Service Members with lower limb loss: from proof-of-concept to digital twin. *Military Health System* .... <https://eprints.qut.edu.au/131940>
- Fuller, A., Fan, Z., Day, C. et Barlow, C. (2020). Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. *IEEE Access*, 8, 108952-108971. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358>
- Gámez Díaz, R., Yu, Q., Ding, Y., Laamarti, F. et El Saddik, A. (2020a). Digital Twin Coaching for Physical Activities: A Survey. *Sensors*, 20(20), 5936. <https://doi.org/10.3390/s20205936>

- Gómez Díaz, R., Yu, Q., Ding, Y., Laamarti, F. et El Saddik, A. (2020b). Digital twin coaching for physical activities: A survey. *Sensors (Switzerland)*, 20(20), 1-21. <https://doi.org/10.3390/s20205936>
- Geneux, V. (2020). *Edge AI-deployed DIGItal Twins for PREDICTing disease progression and need for early intervention in infectious and cardiovascular diseases beyond COVID-19*. EPFL. <https://actu.epfl.ch/news/digipredict-digital-twin-will-predict-the-evolutio/>
- Gkouskou, K., Vlastos, I., Karkalousos, P., Chaniotis, D., Sanoudou, D. et Eliopoulos, A. G. (2020). The “Virtual Digital Twins” Concept in Precision Nutrition. *Advances in Nutrition*, 11(6), 1405-1413. <https://doi.org/10.1093/ADVANCES/NMAA089>
- Grieves, M. (2014). Digital Twin : Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication. *White Paper*, (March), 1-7.
- Hagmann, K., Hellings-Kuß, A., Klodmann, J., Richter, R., Stulp, F. et Leidner, D. (2021). A Digital Twin Approach for Contextual Assistance for Surgeons During Surgical Robotics Training. *Frontiers in Robotics and AI*, 8(September), 1-14. <https://doi.org/10.3389/frobt.2021.735566>
- Hassani, H., Huang, X. et MacFeely, S. (2022). Impactful Digital Twin in the Healthcare Revolution. *Big Data and Cognitive Computing*, 6(3), 1-17. <https://doi.org/10.3390/bdcc6030083>
- He, X., Qiu, Y., Lai, X., Li, Z., Shu, L., Sun, W. et Song, X. (2021). Towards a shape-performance integrated digital twin for lumbar spine analysis. *Digital Twin*, 1, 8. <https://doi.org/10.12688/digitaltwin.17478.1>
- Hirschvogel, M., Jagschies, L., Maier, A., Wildhirt, S. M. et Gee, M. W. (2019). An in silico twin for epicardial augmentation of the failing heart. *International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering*, 35(10). <https://doi.org/10.1002/cnm.3233>
- Hu, X., Cao, H., Shi, J., Dai, Y. et Dai, W. (2021). Study of hospital emergency resource scheduling based on digital twin technology. *Proceedings of 2021 IEEE 2nd International Conference*

- on *Information Technology, Big Data and Artificial Intelligence, ICIBA 2021*, (Iciba), 1059-1063. <https://doi.org/10.1109/ICIBA52610.2021.9688239>
- Huang, P. H., Kim, K. H. et Schermer, M. (2022). Ethical Issues of Digital Twins for Personalized Health Care Service: Preliminary Mapping Study. *J Med Internet Res* 2022;24(1):e33081 <https://www.jmir.org/2022/1/e33081>, 24(1), e33081. <https://doi.org/10.2196/33081>
- IBM. (s. d.). *What is a Digital Twin?* Récupéré le 7 septembre 2022 de <https://www.ibm.com/topics/what-is-a-digital-twin#>
- Iqbal, J. D., Krauthammer, M. et Biller-Andorno, N. (2022). The Use and Ethics of Digital Twins in Medicine. *The Journal of law, medicine & ethics : a journal of the American Society of Law, Medicine & Ethics*, 50(3), 583-596. <https://doi.org/10.1017/jme.2022.97>
- Jamshidi, M., Ebadpour, M. et Moghani, M. M. (2022). Cancer Digital Twins in Metaverse. *Proceedings of the 2022 20th International Conference on Mechatronics - Mechatronika, ME 2022*, (December). <https://doi.org/10.1109/ME54704.2022.9983328>
- Jones, D., Snider, C., Nassehi, A., Yon, J. et Hicks, B. (2020). Characterising the Digital Twin: A systematic literature review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 29, 36-52. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.02.002>
- Karakra, A., Fontanili, F., Lamine, E. et Lamothe, J. (2020). HospiT'Win: A digital twin framework for patients' pathways real-time monitoring and hospital organizational resilience capacity enhancement. *9th International Workshop on Innovative Simulation for Health Care, IWISH 2020*, 62-71. <https://doi.org/10.46354/i3m.2020.iwish.012>
- Karakra, A., Fontanili, F., Lamine, E. et Lamothe, J. (2022). A discrete event simulation-based methodology for building a digital twin of patient pathways in the hospital for near real-time monitoring and predictive simulation. *Digital Twin*, 2(1), 1. <https://doi.org/10.12688/digitaltwin.17454.1>
- Karakra, A., Fontanili, F., Lamine, E., Lamothe, J. et Taweel, A. (2018). Pervasive Computing Integrated Discrete Event Simulation for a Hospital Digital Twin. *Proceedings of IEEE/ACS*

- International Conference on Computer Systems and Applications, AICCSA, 2018-Novem*(October). <https://doi.org/10.1109/AICCSA.2018.8612796>
- Keating, M. (2021). *Capacity Command Center Celebrates 5 Years of Improving Patient Safety, Access*. DOME. <https://www.hopkinsmedicine.org/news/articles/capacity-command-center-celebrates-5-years-of-improving-patient-safety-access>
- Khan, S., Arslan, T. et Ratnarajah, T. (2022). Digital Twin Perspective of Fourth Industrial and Healthcare Revolution. *IEEE Access*, 10, 25732-25754. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3156062>
- Kraaijenbrink, J. (2022). *What Is Industry 5.0 And How It Will Radically Change Your Business Strategy?* Forbes. <https://www.forbes.com/sites/jeroenkraaijenbrink/2022/05/24/what-is-industry-50-and-how-it-will-radically-change-your-business-strategy/?sh=512d452f20bd>
- Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J. et Sihn, W. (2018). Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 1016-1022. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>
- Kuehner, K. J., Scheer, R. et Strassburger, S. (2021). Digital Twin: Finding Common Ground – A Meta-Review. *Procedia CIRP*, 104(June), 1227-1232. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.206>
- Laaki, H., Miche, Y. et Tammi, K. (2019). Prototyping a Digital Twin for Real Time Remote Control over Mobile Networks: Application of Remote Surgery. *IEEE Access*, 7, 20235-20336. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2897018>
- Laamarti, F., Badawi, H. F., Ding, Y., Arafsha, F., Hafidh, B. et Saddik, A. El. (2020). An ISO/IEEE 11073 Standardized Digital Twin Framework for Health and Well-Being in Smart Cities. *IEEE Access*, 8, 105950-105961. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2999871>
- LaBerge, L., O’Toole, C., Schneider, J. et Smaje, K. (2020). How COVID-19 has pushed companies over the technology tipping point-and transformed business forever. *McKinsey Global Publishing*, (October), 1-9. <https://www.mckinsey.com/business-functions/strategy->

and-corporate-finance/our-insights/how-covid-19-has-pushed-companies-over-the-technology-tipping-point-and-transformed-business-forever

- Lal, A., Li, G., Cubro, E., Chalmers, S., Li, H., Herasevich, V., Dong, Y., Pickering, B. W., Kilickaya, O. et Gajic, O. (2020). Development and Verification of a Digital Twin Patient Model to Predict Specific Treatment Response During the First 24 Hours of Sepsis. *Critical Care Explorations*, 2(11), e0249. <https://doi.org/10.1097/cce.0000000000000249>
- Landolfi, G., Menato, S., Sorlini, M., Valdata, A., Rovere, D., Fornasiero, R. et Pedrazzoli, P. (2018). Intelligent value chain management framework for customized assistive healthcare devices. *Procedia CIRP*, 67, 583-588. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.12.265>
- Larousse. (s. d.). Santé publique. Dans *Larousse*. [https://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/santé\\_publicue/90008](https://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/santé_publicue/90008)
- Laubenbacher, R., Niarakis, A., Helikar, T., An, G., Shapiro, B., Malik-Sheriff, R. S., Segó, T. J., Knapp, A., Macklin, P. et Glazier, J. A. (2022). Building digital twins of the human immune system: toward a roadmap. *npj Digital Medicine*, 5(1). <https://doi.org/10.1038/s41746-022-00610-z>
- Lee, J., Bagheri, B. et Kao, H. A. (2015). A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3(January 2015), 18-23. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>
- Lee, J., Lapira, E., Bagheri, B. et Kao, H. an. (2013). Recent advances and trends in predictive manufacturing systems in big data environment. *Manufacturing Letters*, 1(1), 38-41. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2013.09.005>
- Li, X., Lee, E. J., Lilja, S., Loscalzo, J., Schäfer, S., Smelik, M., Strobl, M. R., Sysoev, O., Wang, H., Zhang, H., Zhao, Y., Gawel, D. R., Bohle, B. et Benson, M. (2022). A dynamic single cell-based framework for digital twins to prioritize disease genes and drug targets. *Genome Medicine*, 14(1), 1-21. <https://doi.org/10.1186/s13073-022-01048-4>

- Liu, M., Fang, S., Dong, H. et Xu, C. (2020a). Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications. *Journal of Manufacturing Systems*, 58(July), 346-361. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.017>
- Liu, W., Zhang, W., Dutta, B., Wu, Z. et Goh, M. (2020b). Digital Twinning For Productivity Improvement Opportunities With Robotic Process Automation: Case Of Greenfield Hospital. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 9(2), 258-263. <https://doi.org/10.18178/ijmerr.9.2.258-263>
- Liu, Y., Moyaux, T., Bouleux, G. et Cheutet, V. (2022). An agent-based architecture of the Digital Twin for an Emergency Department. *Health and Technology*.
- Liu, Y., Zhang, L., Yang, Y., Zhou, L., Ren, L., Wang, F., Liu, R., Pang, Z. et Deen, M. J. (2019). A Novel Cloud-Based Framework for the Elderly Healthcare Services Using Digital Twin. *IEEE Access*, 7, 49088-49101. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2909828>
- Loignon, C., Dupéré, S., Leblanc, C., Truchon, K., Bouchard, A., Arsenault, J., Pinheiro Carvalho, J., Boudreault-Fournier, A. et Marcotte, S. A. (2021). Equity and inclusivity in research: co-creation of a digital platform with representatives of marginalized populations to enhance the involvement in research of people with limited literacy skills. *Research Involvement and Engagement*, 7(1). <https://doi.org/10.1186/S40900-021-00313-X>
- Lombardo, A. et Ricci, C. (2022). Digital Twins Federation for Remote Medical Care of De-Hospitalized Patients. Dans *2022 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops and other Affiliated Events, PerCom Workshops 2022* (p. 718-723). IEEE. <https://doi.org/10.1109/PerComWorkshops53856.2022.9767417>
- Lu, Q., Ye, Z., Fang, Z., Meng, J., Pitt, M., Lin, J., Xie, X. et Chen, L. (2021). Creating an Inter-Hospital Resilient Network for Pandemic Response Based on Blockchain and Dynamic Digital Twins. *Proceedings - Winter Simulation Conference, 2021-Decem(1)*. <https://doi.org/10.1109/WSC52266.2021.9715517>
- Ludvigsen, K. B. (2018). *Digital Twins for Blue Denmark*. DNV GL. <https://www.iims.org.uk/wp-content/uploads/2018/04/Digital-Twin-report-for-DMA.pdf>

- Maïzi, Y. et Bendavid, Y. (2021). Building a digital twin for IoT smart stores: A case in retail and apparel industry. *International Journal of Simulation and Process Modelling*, 16(2), 147-160. <https://doi.org/10.1504/IJSPM.2021.115868>
- Marchal, T. (2016). *VPH: The Ultimate Stage Before Your Own Medical Digital Twin*. LinkedIn. <https://www.linkedin.com/pulse/vph-ultimate-stage-before-your-own-medical-digital-twin-marchal>
- Market Research Future. (2021). *Digital Healthcare Market Overview, Forecast 2022-2030*. Report MRFR/HC/6167-CR. <https://www.marketresearchfuture.com/reports/digital-healthcare-market-7636>
- Martinez-Velazquez, R., Gamez, R. et El Saddik, A. (2019). Cardio Twin: A Digital Twin of the human heart running on the edge. Dans *2019 IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications (MeMeA)* (p. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/MeMeA.2019.8802162>
- Milne-Ives, M., Fraser, L. K., Khan, A., Walker, D., van Velthoven, M. H., May, J., Wolfe, I., Harding, T. et Meinert, E. (2022). Life Course Digital Twins-Intelligent Monitoring for Early and Continuous Intervention and Prevention (LifeTIME): Proposal for a Retrospective Cohort Study. *JMIR research protocols*, 11(5), e35738. <https://doi.org/10.2196/35738>
- MSSS. (2021). *Dépendance et itinérance*. Ministère de la Santé et des Services Sociaux. [https://www.msss.gouv.qc.ca/professionnels/soins-et-services/guide-urgences-dependance-et-itinerance/#:~:text=On estime qu'entre 30,et al.%2C 2005\)](https://www.msss.gouv.qc.ca/professionnels/soins-et-services/guide-urgences-dependance-et-itinerance/#:~:text=On estime qu'entre 30,et al.%2C 2005)).
- Mohapatra, S. et Bose, S. (2020). An appraisal of literature for design and implementation of developing a framework for digital twin and validation through case studies. *Health and Technology*, 10(5), 1229-1237. <https://doi.org/10.1007/s12553-020-00443-4>
- Moreau, N., Pirson, T., Le Brun, G., Delhaye, T., Sandu, G., Paris, A., Bol, D. et Raskin, J. P. (2021). Could unsustainable electronics support sustainability? *Sustainability (Switzerland)*, 13(12). <https://doi.org/10.3390/SU13126541>

- Mourtzis, D., Angelopoulos, J., Panopoulos, N. et Kardamakis, D. (2021). A Smart IoT Platform for Oncology Patient Diagnosis based on AI: Towards the Human Digital Twin. *Procedia CIRP*, 104, 1686-1691. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.284>
- Mylonas, G., Kalogeras, A., Kalogeras, G., Anagnostopoulos, C., Alexakos, C. et Munoz, L. (2021). Digital Twins from Smart Manufacturing to Smart Cities: A Survey. *IEEE Access*, 9, 143222-143249. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3120843>
- Negri, E., Fumagalli, L. et Macchi, M. (2017). A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems. *Procedia Manufacturing*, 11(June), 939-948. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.198>
- Newrzella, S. R., Franklin, D. W. et Haider, S. (2021). 5-Dimension Cross-Industry Digital Twin Applications Model and Analysis of Digital Twin Classification Terms and Models. *IEEE Access*, 9, 131306-131321. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3115055>
- Ogunseiju, O. R., Olayiwola, J., Akanmu, A. A. et Nnaji, C. (2021). Digital twin-driven framework for improving self-management of ergonomic risks. *Smart and Sustainable Built Environment*, 10(3), 403-419. <https://doi.org/10.1108/SASBE-03-2021-0035>
- Okegbile, S. D., Cai, J., Yi, C. et Niyato, D. (2022). Human Digital Twin for Personalized Healthcare: Vision, Architecture and Future Directions. *IEEE Network*, 1-7. <https://doi.org/10.1109/MNET.118.2200071>
- Oliveira, P. P. (2020). Digital twin development for airport management. *Journal of Airport Management*, 14(3), 246-259.
- OnePlanet Research Center. (s. d.). *Human Digital Twin*. Récupéré le 14 février 2023 de <https://oneplanetresearch.nl/innovatie/digital-twin/>
- Pang, J., Li, J., Xie, Z., Huang, Y. et Cai, Z. (2020). Collaborative City Digital Twin For Covid-19 Pandemic: A Federated Learning Solution. *Tsinghua Science and Technology*, 26(5), 759-771. <https://doi.org/arXiv:2011.02883>



- Patrone, C., Galli, G. et Revetria, R. (2019). A state of the art of digital twin and simulation supported by data mining in the healthcare sector. *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*, 318(January 2021), 605-615. <https://doi.org/10.3233/FAIA190084>
- Patrone, C., Hospital, G. et Galli, G. (2020). The Role Of Internet Of Things And Digital Twin In Healthcare Digitalization Process. *Transactions on Engineering Technologies*, (July), 0-11. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-6848-0>
- Peffer, K., Tuunanen, T., Rothenberger, M. A. et Chatterjee, S. (2007). A design science research methodology for information systems research. *Journal of Management Information Systems*, 24(3), 45-77. <https://doi.org/10.2753/MIS0742-1222240302>
- Peng, Y., Zhang, M., Yu, F., Xu, J. et Gao, S. (2020). Digital Twin Hospital Buildings: An Exemplary Case Study through Continuous Lifecycle Integration. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 1-13. <https://doi.org/10.1155/2020/8846667>
- Peterson, M. (2019). *Surgery Digital twin* (US 2019/0087544 A1). U.S. Patent Application. <https://doi.org/2019/0087544>
- Pilati, F., Tronconi, R., Nollo, G., Heragu, S. S. et Zerzer, F. (2021). Digital twin of covid-19 mass vaccination centers. *Sustainability (Switzerland)*, 13(13), 1-26. <https://doi.org/10.3390/su13137396>
- Pivoto, D. G. S., de Almeida, L. F. F., da Rosa Righi, R., Rodrigues, J. J. P. C., Lugli, A. B. et Alberti, A. M. (2021). Cyber-physical systems architectures for industrial internet of things applications in Industry 4.0: A literature review. *Journal of Manufacturing Systems*, 58(December), 176-192. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.11.017>
- Popa, E. O., van Hilten, M., Oosterkamp, E. et Bogaardt, M. J. (2021). The use of digital twins in healthcare: socio-ethical benefits and socio-ethical risks. *Life Sciences, Society and Policy*, 17(1), 1-25. <https://doi.org/10.1186/s40504-021-00113-x>
- Pratt, B., Parker, M. et Bull, S. (2022). Equitable Design and Use of Digital Surveillance Technologies During COVID-19: Norms and Concerns. *Journal of Empirical Research on Human Research Ethics*, 17(5), 573-586. <https://doi.org/10.1177/15562646221118127>

- Qi, Q., Tao, F., Hu, T., Anwer, N., Liu, A., Wei, Y., Wang, L. et Nee, A. Y. C. (2021). Enabling technologies and tools for digital twin. *Journal of Manufacturing Systems*, 58(PB), 3-21. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.10.001>
- Radio-Canada. (2022). *Un premier dénombrement des personnes itinérantes à Montréal depuis 2018*. Radio-Canada - Politique Municipale. <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1923830/recensement-sans-abris-montreal-quebec>
- Rahman, H. U., Mahmood, M. H. Bin, Khan, M. S. A., Sama, N. U., Asaruddin, M. R. et Afzal, M. (2022). To explore the pharmacological mechanism of action using digital twin. *International Journal of Advanced and Applied Sciences*, 9(2), 52-62. <https://doi.org/10.21833/IJAAS.2022.02.006>
- Rao, D. J. et Mane, S. (2019). *Digital Twin approach to Clinical DSS with Explainable AI*. <https://doi.org/https://doi.org/10.48550/arXiv.1910.13520>
- Rathore, M. M., Shah, S. A., Shukla, D., Bentafat, E. et Bakiras, S. (2021). The Role of AI, Machine Learning, and Big Data in Digital Twinning: A Systematic Literature Review, Challenges, and Opportunities. *IEEE Access*, 9, 32030-32052. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3060863>
- Razzaq, S., Shah, B., Iqbal, F., Ilyas, M., Maqbool, F. et Rocha, A. (2022). DeepClassRooms: a deep learning based digital twin framework for on-campus class rooms. *Neural Computing and Applications*, 1-10. <https://doi.org/10.1007/s00521-021-06754-5>
- Robinson, B. (2022). *Remote Work Is Here To Stay And Will Increase Into 2023, Experts Say*. Forbes. <https://www.forbes.com/sites/bryanrobinson/2022/02/01/remote-work-is-here-to-stay-and-will-increase-into-2023-experts-say/?sh=51ca09fc20a6>
- Rodríguez-Aguilar, R. et Marmolejo-Saucedo, J.-A. (2020). Conceptual framework of Digital Health Public Emergency System: digital twins and multiparadigm simulation. *EAI Endorsed Transactions on Pervasive Health and Technology*, 6(21), 1-10. <https://doi.org/10.4108/eai.13-7-2018.164261>

- Ross, D. (2016). Digital twinning [virtual reality avatars]. *Engineering & Technology*, 11(4), 44-45. <https://doi.org/10.1049/et.2016.0403>
- Rossetti, M. D. (2016). *Simulation modeling and Arena* (Second edi). John Wiley & Sons, Inc.
- Sahal, R., Alsamhi, S. H. et Brown, K. N. (2022). Personal Digital Twin: A Close Look into the Present and a Step towards the Future of Personalised Healthcare Industry. *Sensors*, 22(15), 1-35. <https://doi.org/10.3390/s22155918>
- Saracco, R., Kerckhove, D. De et Nisiotis, L. (2020). *The Role of Personal Digital Twins in Control of Epidemics*, (April).
- Saxby, D. J., Pizzolato, C., Nasser, A., Devaprakash, D., Frossard, L. A. et Lloyd, D. G. (2022). Personalized digital humans for rehabilitation and assistive devices. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 25, S5-S6. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2021.11.013>
- Schmidt, L. et Bohnet-Joschko, S. (2022). Planetary Health and Hospitals' Contribution—A Scoping Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(20). <https://doi.org/10.3390/IJERPH192013536>
- Schwartz, S. M., Wildenhaus, K., Bucher, A. et Byrd, B. (2020). Digital Twins and the Emerging Science of Self: Implications for Digital Health Experience Design and “Small” Data. *Frontiers in Computer Science*, 2(October), 1-16. <https://doi.org/10.3389/fcomp.2020.00031>
- Semeraro, C., Lezoche, M., Panetto, H. et Dassisti, M. (2021). Digital twin paradigm: A systematic literature review. *Computers in Industry*, 130(September), 103469. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103469>
- SEMIC RF. (s. d.). *SEMIC Health - Digital Body Total*. Récupéré le 13 mars 2022 de <https://www.semic.de/en/ai-io/semic-health>
- Shafto, M., Conroy, M., Doyle, R. et Glaessgen, E. (2010). DRAFT Modeling, Simulation, information Technology & Processing Roadmap. *Technology Area*, 1-27. [https://www.nasa.gov/pdf/501321main\\_TA11-MSITP-DRAFT-Nov2010-A1.pdf](https://www.nasa.gov/pdf/501321main_TA11-MSITP-DRAFT-Nov2010-A1.pdf)

- Shamanna, P., Dharmalingam, M., Sahay, R., Mohammed, J., Mohamed, M., Poon, T., Kleinman, N. et Thajudeen, M. (2021). Retrospective study of glycemic variability, BMI, and blood pressure in diabetes patients in the Digital Twin Precision Treatment Program. *Scientific Reports*, 11(1), 1-9. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-94339-6>
- Shamanna, P., Saboo, B., Damodharan, S., Mohammed, J., Mohamed, M., Poon, T., Kleinman, N. et Thajudeen, M. (2020). Reducing HbA1c in Type 2 Diabetes Using Digital Twin Technology-Enabled Precision Nutrition: A Retrospective Analysis. *Diabetes Therapy*, 11(11), 2703-2714. <https://doi.org/10.1007/s13300-020-00931-w>
- Sharma, A., Kosasih, E., Zhang, J., Brintrup, A. et Calinescu, A. (2022). Digital Twins: State of the art theory and practice, challenges, and open research questions. *Journal of Industrial Information Integration*, 30, 100383. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2022.100383>
- Shaw, M. L. et Wittevrongel, K. (2022). *Améliorer l'accès aux données sur la santé au Québec*. IEDM. <https://www.iedm.org/fr/ameliorer-laces-aux-donnees-sur-la-sante-au-quebec/>
- Shengli, W. (2021). Is Human Digital Twin possible? *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 1, 100014. <https://doi.org/10.1016/J.CMPBUP.2021.100014>
- Siddik, M. A. B., Shehabi, A. et Marston, L. (2021). The environmental footprint of data centers in the United States. *Environmental Research Letters*, 16(6). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ABFBA1>
- Siemens Healthineers. (2018). *Digital Workflow Optimization*, 1-6. Siemens Healthineers Headquarters.
- Singh, M., Fuenmayor, E., Hinchy, E. P., Qiao, Y., Murray, N. et Devine, D. (2021). Digital Twin: Origin to Future. *Applied System Innovation 2021*, Vol. 4, Page 36, 4(2), 36. <https://doi.org/10.3390/ASI4020036>
- Singh, M., Srivastava, R., Fuenmayor, E., Kuts, V., Qiao, Y., Murray, N. et Devine, D. (2022). Applications of Digital Twin across Industries: A Review. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(11). <https://doi.org/10.3390/app12115727>

- Six, A. (2021). *Personalized medicine: The simulated patient*. EmpaQuarterly. <https://www.empa.ch/web/s604/eq71-digital-twin>
- Subramanian, B., Kim, J., Maray, M. et Paul, A. (2022). Digital Twin Model: A Real-Time Emotion Recognition System for Personalized Healthcare. *IEEE Access*, 10(August), 81155-81165. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3193941>
- Subramanian, K. (2020). Digital Twin for Drug Discovery and Development—The Virtual Liver. *Journal of the Indian Institute of Science*, 100(4), 653-662. <https://doi.org/10.1007/s41745-020-00185-2>
- Talukder, A. K., Selg, E. et Haas, R. E. (2022). *Physicians' Brain Digital Twin: Holistic Clinical & Biomedical Knowledge Graphs for Patient Safety and Value-Based Care to Prevent the Post-pandemic Healthcare Ecosystem Crisis*. *Communications in Computer and Information Science* (vol. 1686 CCIS). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-21422-6\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-031-21422-6_3)
- Tao, F., Qi, Q., Wang, L. et Nee, A. Y. C. (2019a). Digital Twins and Cyber-Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison. *Engineering*, 5(4), 653-661. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.01.014>
- Tao, F., Xiao, B., Qi, Q., Cheng, J. et Ji, P. (2022). Digital twin modeling. *Journal of Manufacturing Systems*, 64(June), 372-389. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.06.015>
- Tao, F., Zhang, H., Liu, A. et Nee, A. Y. C. (2019b). Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(4), 2405-2415. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186>
- Tardini, E., Zhang, X., Canahuate, G., Wentzel, A., Mohamed, A. S. R., Van Dijk, L., Fuller, C. D. et Marai, G. E. (2022). Optimal Treatment Selection in Sequential Systemic and Locoregional Therapy of Oropharyngeal Squamous Carcinomas: Deep Q-Learning With a Patient-Physician Digital Twin Dyad. *Journal of Medical Internet Research*, 24(4), e29455. <https://doi.org/10.2196/29455>

- Topol, E. J. (2019). High-performance medicine: the convergence of human and artificial intelligence. *Nature Medicine*, 25(1), 44-56. <https://doi.org/10.1038/s41591-018-0300-7>
- Trobinger, M., Costinescu, A., Xing, H., Elsner, J., Hu, T., Naceri, A., Figueredo, L., Jensen, E., Burschka, D. et Haddadin, S. (2021). A Dual Doctor-Patient Twin Paradigm for Transparent Remote Examination, Diagnosis, and Rehabilitation. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2933-2940. <https://doi.org/10.1109/IROS51168.2021.9636626>
- Tuegel, E. J., Ingrassia, A. R., Eason, T. G. et Spottswood, S. M. (2011). Reengineering aircraft structural life prediction using a digital twin. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2011. <https://doi.org/10.1155/2011/154798>
- VanDerHorn, E. et Mahadevan, S. (2021). Digital Twin: Generalization, characterization and implementation. *Decision Support Systems*, 145. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2021.113524>
- Verma, R. (2022). Smart City Healthcare Cyber Physical System: Characteristics, Technologies and Challenges. *Wireless Personal Communications*, 122(2), 1413-1433. <https://doi.org/10.1007/s11277-021-08955-6>
- Voigt, I., Inojosa, H., Dillenseger, A., Haase, R., Akgün, K. et Ziemssen, T. (2021). Digital Twins for Multiple Sclerosis. *Frontiers in Immunology*, 12, 1556. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2021.669811>
- Wan, Z., Dong, Y., Yu, Z., Lv, H. et Lv, Z. (2021). Semi-Supervised Support Vector Machine for Digital Twins Based Brain Image Fusion. *Frontiers in Neuroscience*, 15(July), 1-12. <https://doi.org/10.3389/fnins.2021.705323>
- Wickramasinghe, N., Jayaraman, P. P., Forkan, A. R. M., Ulapane, N., Kaul, R., Vaughan, S. et Zelcer, J. (2022). A Vision for Leveraging the Concept of Digital Twins to Support the Provision of Personalized Cancer Care. *IEEE Internet Computing*, 26(5), 17-24. <https://doi.org/10.1109/MIC.2021.3065381>
- World Bank. (2022a). *Agriculture, forestry, and fishing, value added (% of GDP)*. World Bank national accounts data. <https://data.worldbank.org/indicator/NV.AGR.TOTL.ZS>

- World Bank. (2022b). *Industry (including construction), value added (% of GDP)*. World Bank national accounts data. <https://data.worldbank.org/indicator/NV.IND.TOTL.ZS?view=chart>
- World Bank. (2022c). *Services, value added (% of GDP)*. World Bank national accounts data. <https://data.worldbank.org/indicator/NV.SRV.TOTL.ZS>
- World Bank. (2022d). *Total natural resources rents (% of GDP)*. World Bank national accounts data. <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.TOTL.RT.ZS>
- Xing, X., Del Ser, J., Wu, Y., Li, Y., Xia, J., Lei, X., Firmin, D., Gatehouse, P. et Yang, G. (2022). HDL: Hybrid Deep Learning for the Synthesis of Myocardial Velocity Maps in Digital Twins for Cardiac Analysis. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, XX(Xx), 1-9. <https://doi.org/10.1109/JBHI.2022.3158897>
- Yang, D., Karimi, H. R., Kaynak, O. et Yin, S. (2021). Developments of digital twin technologies in industrial, smart city and healthcare sectors: a survey. *Complex Engineering Systems*, 1(3), 1-21. <https://doi.org/10.20517/ces.2021.06>
- Zaballos, A., Briones, A., Massa, A., Centelles, P. et Caballero, V. (2020). A smart campus' digital twin for sustainable comfort monitoring. *Sustainability (Switzerland)*, 12(21), 1-33. <https://doi.org/10.3390/su12219196>
- Zhang, J., Li, L., Lin, G., Fang, D., Tai, Y. et Huang, J. (2020). Cyber Resilience in Healthcare Digital Twin on Lung Cancer. *IEEE Access*, 8, 201900-201913. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3034324>
- Zhang, J. et Tai, Y. (2022). Secure medical digital twin via human-centric interaction and cyber vulnerability resilience. *Connection Science*, 34(1), 895-910. <https://doi.org/10.1080/09540091.2021.2013443>
- Zhao, Z., Zhong, R. Y., Kuo, Y. H., Fu, Y. et Huang, G. Q. (2021). Cyber-physical spatial temporal analytics for digital twin-enabled smart contact tracing. *Industrial Management and Data Systems*, 121(5), 1082-1106. <https://doi.org/10.1108/IMDS-11-2020-0634>

Zhong, X., Babaie Sarijaloo, F., Prakash, A., Park, J., Huang, C., Barwise, A., Herasevich, V., Gajic, O., Pickering, B. et Dong, Y. (2022). A multidisciplinary approach to the development of digital twin models of critical care delivery in intensive care units. *International Journal of Production Research*, 60, 1-17. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.2022235>

Zhou, Y., Fu, Z., Zhang, J., Li, W. et Gao, C. (2022). A Digital Twin-Based Operation Status Monitoring System for Port Cranes. *Sensors*, 22(9). <https://doi.org/10.3390/s22093216>

Zimmerman, J., Dodd, C. et Peterson, M. (2019). *Methods and systems for generating a patient digital twin* (US 2019/0005200 A1). Patent Application Publication.