



Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur

Filière : Génie industriel

Spécialité : Management industriel et logistique

Présenté par :

Boutheyna LAKEHAL & Maissa BENDEDDOUCHE

Thème

Conception et mise en œuvre d'un jumeau numérique
pour les systèmes hospitaliers

Soutenu publiquement, le 20 juin 2026, devant le jury composé de :

— Mme Imen KOULOUGHLI	MCA	ESSA Tlemcen	Présidente
— M. Fouad MALIKI	MCA	ESSA Tlemcen	Directeur de mémoire
— M. Mehdi SOUIER	Prof	Univ. Tlemcen	Co-Directeur de mémoire
— Mme Norelhouda SEKKAL	MCB	ESSA Tlemcen	Examinatrice
— M. Hichem HADDOU BENDERBAL	MC	Aix Marseille Université	Examineur

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Résumé

Dans ce mémoire, nous proposons une approche basée sur le jumeau numérique pour l'orientation et le transfert des patients dans le réseau hospitalier de la wilaya de Tlemcen. Le travail combine une modélisation mathématique mono-objectif, résolue sous IBM ILOG CPLEX, et une simulation dynamique développée avec Python, SimPy et PyQt5. Le modèle vise à minimiser le temps total de prise en charge en tenant compte des services disponibles, des lits, des ambulances, des transferts et de la criticité des patients. La simulation permet de suivre l'évolution du système, d'appliquer un algorithme Greedy d'affectation dynamique et d'analyser les indicateurs de performance.

Mots-clés : Jumeau numérique, gestion hospitalière, optimisation, simulation, CPLEX, SimPy, algorithme Greedy.

Abstract

In this thesis, we propose a digital twin-based approach for patient orientation and transfer within the hospital network of Tlemcen province. The work combines a mono-objective mathematical model solved with IBM ILOG CPLEX and a dynamic simulation developed using Python, SimPy, and PyQt5. The model aims to minimize the total patient care time while considering available services, beds, ambulances, transfers, and patient criticality. The simulation tracks the system evolution, applies a Greedy dynamic assignment algorithm, and analyzes performance indicators.

Keywords : Digital twin, hospital management, optimization, simulation, CPLEX, SimPy, Greedy algorithm.

ملخص

في هذا العمل، نقترح مقارنة تعتمد على التوأم الرقمي من أجل توجيه وتحويل المرضى داخل الشبكة الصحية لولاية تلمسان. يجمع هذا العمل بين نموذج رياضي أحادي الهدف تم حله باستعمال (IBM ILOG CPLEX) ومحاكاة ديناميكية طورت باستعمال (Python) و (SimPy) و (PyQt5). يهدف النموذج إلى تقليل الزمن الكلي للتكفل بالمرضى مع مراعاة الخدمات المتوفرة، الأسرة، سيارات الإسعاف، التحويلات ودرجة خطورة المرضى. كما تسمح المحاكاة بمتابعة تطور النظام، وتطبيق خوارزمية (Greedy) للتوجيه الديناميكي، وتحليل مؤشرات الأداء.

الكلمات المفتاحية : التوأم الرقمي، تسيير المستشفيات، التحسين، المحاكاة، (CPLEX)، (SimPy)، الخوارزمية (Greedy).

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents,

*À ceux qui m'ont donné la vie, l'amour et la force d'avancer.
Aucun mot ne peut exprimer ma gratitude pour vos sacrifices, vos prières et votre soutien.
Vous avez toujours été ma source de courage, de patience et de réussite.
Ce travail est le fruit de votre amour et de vos encouragements.*

Mes chers frères,

*Pour votre présence, votre affection et vos encouragements.
Votre soutien m'a toujours donné la force d'avancer et de croire en moi.*

Ma chère grand-mère,

*Qui n'est plus parmi nous aujourd'hui, mais dont le souvenir restera toujours vivant dans mon
cœur.
J'aurais profondément souhaité qu'elle soit présente à mes côtés pour partager ma joie et ma
réussite.
Que Dieu lui accorde Sa miséricorde et fasse de sa mémoire une lumière qui ne s'éteint jamais.*

Ma binôme Misouus,

*Pour tous les efforts partagés, les moments de travail, de patience et de motivation.
Merci pour ton sérieux, ta collaboration et ton soutien durant la réalisation de ce projet.*

Mes collègues de la filière GI,

*Avec qui j'ai partagé des moments d'apprentissage, d'entraide et de beaux souvenirs.
Je vous souhaite à tous beaucoup de réussite et d'accomplissement.*

*À toutes les personnes qui m'ont soutenue, encouragée et accompagnée de près ou de loin,
je dédie ce travail avec toute ma gratitude.*

Boutheyna

Dédicace

C'est avec une profonde gratitude que je dédie ce travail à :

À mes très chers parents,

Vous avez été mon plus grand soutien tout au long de mon parcours.

*À mon père, pour tous les sacrifices consentis, pour sa confiance et ses encouragements
qui m'ont toujours donné la force d'avancer.*

*Chaque début de semaine, ta présence à mes côtés me rappelait
que je pouvais affronter chaque défi avec sérénité.*

*À ma mère, pour son amour inconditionnel, sa tendresse, ses prières et son soutien constant.
Tes paroles réconfortantes ont toujours été une source de courage dans les moments difficiles.*

Merci pour tout ce que vous avez fait pour moi.

Mes chers frères,

*À mon grand frère, dont la présence bienveillante et le soutien indéfectible
ont accompagné chaque étape de mon parcours universitaire.*

Ta générosité, ta patience et ta confiance en mes capacités m'ont été d'un précieux secours.

*À mes petits frères, dont la bonne humeur communicative et la spontanéité
ont su dissiper la fatigue et redonner couleur aux journées les plus éprouvantes.*

Votre présence a rendu ce parcours plus léger et plus joyeux.

Mes chères sœurs,

*À ma grande sœur, pour sa sagesse, sa sérénité et la justesse de ses conseils.
Chacun de nos échanges m'a apporté la clarté et la détermination nécessaires
pour avancer avec assurance sur ce chemin.*

*À ma petite sœur, pour son énergie communicative, son enthousiasme sincère
et son soutien spontané qui ont su raviver ma motivation dans les moments de lassitude.*

À ma chère belle-sœur,

*Pour la chaleur de ton accueil, la sincérité de ton soutien et la pertinence de tes conseils
tout au long de cette aventure universitaire.*

Ta présence bienveillante et ton écoute attentive m'ont aidée à surmonter bien des obstacles.

Merci pour tout. Tu as toujours été pour moi comme une troisième sœur.

Ma chère grand-mère,

*Tu as quitté ce monde avant de pouvoir témoigner de l'aboutissement de ce parcours,
mais ton souvenir a été une lumière constante qui m'a guidée jusqu'au bout.*

*Tu as été parmi les premières à croire en moi, à m'encourager à viser haut
et à poursuivre mes études avec ambition et persévérance.*

Ta fierté, tes paroles d'espoir et ton affection sincère ont constitué les fondations de ce chemin.

J'aurais tant aimé partager avec toi ce moment d'accomplissement.

Que Dieu t'accorde Son infinie miséricorde et t'accueille en Son vaste paradis.

À ma binôme Boutheyne,

Partager cette aventure académique à tes côtés a constitué un véritable privilège.

*Ton sérieux, ton engagement et ton esprit de collaboration exemplaire
ont rendu cette expérience à la fois enrichissante et humainement précieuse.*

*Nous avons traversé ensemble les épreuves, les doutes et les remises en question,
mais aussi partagé de nombreuses réussites et de beaux souvenirs.*

*Je suis fière du travail que nous avons accompli et profondément reconnaissante
pour tout ce que ce binôme m'a apporté.*

À mon amie Leïla,

Ton amitié sincère et fidèle a traversé toutes les étapes de ce parcours avec moi.

*Dans les moments de doute comme dans ceux de joie,
tu as su trouver les mots justes pour me redonner confiance et persévérance.*

*Ton écoute attentive, tes conseils avisés et ta présence constante
ont été une source inestimable de réconfort et de soutien moral.*

Je te suis sincèrement reconnaissante pour tout ce que tu as représenté durant ce parcours.

À mes chères 'roommates', Hadjer, Bouchra, Israa et Chaïma,

*Merci d'avoir fait de cette dernière année passée loin de ma famille
en une expérience chaleureuse, solidaire et inoubliable.*

*Grâce à votre présence et à votre bienveillance, la résidence universitaire
est devenue un véritable second foyer où je me suis toujours sentie entourée.*

Les moments partagés à vos côtés resteront parmi mes plus beaux souvenirs d'études.

À mes collègues de la filière Génie Industriel,

*Ces années universitaires ont été l'occasion de partager avec vous des moments
de travail, d'entraide, de réflexion et de convivialité qui resteront gravés dans ma mémoire.*

*Merci à toutes celles et ceux qui ont contribué, de près ou de loin,
à enrichir cette expérience sur le plan académique comme sur le plan humain.
Je vous souhaite à chacun un avenir à la hauteur de vos efforts et de vos ambitions.*

*À toutes les personnes qui ont cru en moi, accompagné mes efforts
et contribué, d'une manière ou d'une autre, à mon évolution,
je témoigne ma plus sincère gratitude et ma profonde reconnaissance.*

Je dédie ce travail avec respect, humilité et affection.

Maïssa

Remerciements

Avant tout, nous tenons à remercier Dieu Tout-Puissant, qui nous a donné la force, la patience, la volonté et le courage nécessaires pour mener à bien ce travail. C'est grâce à Son aide que nous avons pu surmonter les difficultés rencontrées tout au long de ce parcours.

Nous exprimons nos sincères remerciements et notre profonde gratitude à notre chef de filière, **M.Fouad MALIKI**, directeur de ce mémoire, pour son accompagnement précieux, sa disponibilité, ses orientations, sa patience et son soutien tout au long de la réalisation de ce travail. Nous le remercions particulièrement pour la confiance qu'il nous a accordée, pour la qualité de son encadrement, pour ses remarques pertinentes et pour ses conseils constructifs qui nous ont permis d'améliorer progressivement notre mémoire. Son sérieux, son expérience et son suivi régulier ont été pour nous une aide essentielle dans l'avancement de ce projet. Nous lui adressons toute notre reconnaissance pour le temps qu'il nous a consacré et pour l'intérêt qu'il a porté à notre travail.

Nous adressons également nos vifs remerciements à **M.Mehdi SOUIER**, codirecteur de ce mémoire, pour son aide, ses conseils, son soutien et l'intérêt qu'il a porté à notre travail. Ses remarques et ses orientations nous ont été très utiles durant les différentes étapes de réalisation de ce projet.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude aux membres du jury qui nous font l'honneur d'évaluer ce travail. Nous remercions chaleureusement **Mme Imen KOULOUGHLI**, Présidente du jury, pour avoir accepté de présider cette soutenance et pour l'intérêt qu'elle a porté à notre mémoire.

Nos sincères remerciements s'adressent également à **Mme Norelhouda SEKKAL** et à **M. Hichem HADDOU BENDERBAL**, qui ont accepté d'examiner ce travail. Nous leur sommes reconnaissantes pour le temps consacré à son évaluation, ainsi que pour leurs remarques, leurs suggestions et leurs recommandations constructives qui contribueront à son enrichissement.

Nous exprimons enfin notre reconnaissance à **Pr. Sanja PETROVIC** pour l'honneur de sa présence parmi les invités de cette soutenance. Nous la remercions pour l'intérêt accordé à notre travail et pour son apport scientifique, qui constitue une source d'inspiration dans notre domaine de recherche.

Nos remerciements s'adressent également à l'ensemble des enseignants et du personnel du département de **Génie Industriel**, pour la formation qu'ils nous ont assurée, pour leur disponibilité et pour les connaissances qu'ils nous ont transmises durant notre parcours universitaire.

Enfin, nous adressons nos sincères remerciements et notre profonde reconnaissance à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Boutheyna & Maissa

Liste des abréviations

- IA : Intelligence artificielle
- IoT : Internet des objets
- JN : Jumeau numérique
- DT : Digital Twin
- CPS : Système cyber-physique
- CPHS : Systèmes de santé cyber-physiques
- CHU : Centre hospitalo-universitaire
- EPH : Établissement public hospitalier
- EPSP : Établissement public de santé de proximité
- EHS : Établissement hospitalier spécialisé
- CCMU : Classification clinique des malades aux urgences
- DSP : Direction de la Santé et de la Population
- ONS : Office National des Statistiques
- CPLEX : IBM ILOG CPLEX Optimizer
- IBM : International Business Machines
- MILP : Programmation linéaire mixte en nombres entiers
- OPL : Optimization Programming Language
- TEA : Temps moyen entre arrivées
- KPI : Indicateur clé de performance
- DES : Simulation à événements discrets
- SimPy : Bibliothèque Python de simulation à événements discrets
- PyQt5 : Bibliothèque Python pour le développement d’interfaces graphiques
- GUI : Interface graphique utilisateur
- 2D : Deux dimensions
- 3D : Trois dimensions
- RFID : Identification par radiofréquence
- WSN : Réseau de capteurs sans fil
- BIM : Modélisation des informations du bâtiment
- CFD : Dynamique des fluides numérique
- LSTM : Réseau de neurones à mémoire court et long terme
- FHIR : Ressources d’interopérabilité des données de santé
- SysML : Langage de modélisation des systèmes

- OGC : Consortium géospatial ouvert
- SQL : Langage de requêtes structurées
- GPU : Unité de traitement graphique
- BPMN : Modélisation et notation des processus métier

Table des matières

Liste des abréviations	2
Table des matières	5
Liste des figures	6
Liste des tableaux	7
Introduction générale	1
1 Généralités sur les jumeaux numériques et l'Industrie 4.0	3
1.1 Introduction	3
1.2 Industrie 4.0	3
1.2.1 Concepts clés de l'Industrie 4.0	4
1.3 Jumeaux numériques	6
1.3.1 Historique	6
1.3.2 Définition et concepts fondamentaux des jumeaux numériques	7
1.3.3 Composants d'un jumeau numérique	9
1.3.4 Niveau d'intégration	10
1.3.5 Cycle de vie du Jumeau Numérique	12
1.3.6 Différents types de jumeaux numériques	13
1.3.7 Applications des jumeaux numériques	14
1.4 Conclusion	17
2 Revue de la littérature sur le Jumeau Numérique appliqué à la gestion hospitalière	18
2.1 Introduction	18
2.2 Le Jumeau Numérique dans le domaine de la santé	18
2.2.1 Spécificités des systèmes hospitaliers et complexité	18
2.2.2 Transformation numérique des systèmes de santé	19
2.2.3 Intégration des données médicales et systèmes d'information hospitaliers	19
2.3 Les domaines d'application du Jumeau Numérique en santé	19
2.4 Application du jumeau numérique à la gestion hospitalière	22
2.4.1 Méthodologie de recherche bibliographique	22
2.4.2 Analyse des travaux sélectionnés	23
2.5 Positionnement de la recherche et formulation de la problématique	28
2.6 Conclusion	29
3 Présentation du cas d'étude, modélisation mathématique et résolution exacte	30
3.1 Introduction	30

3.2	Contexte d'étude : le système de santé algérien et le réseau de Tlemcen	31
3.2.1	Organisation générale de l'offre de soins en Algérie	31
3.2.2	Cartographie du réseau hospitalier de la wilaya de Tlemcen	32
3.3	Modélisation mathématique du système : approche mono-objectif	33
3.3.1	Hypothèses de modélisation	33
3.3.2	Ensembles et indices	34
3.3.3	Paramètres du modèle	35
3.3.4	Variables de décision	37
3.3.5	Fonction objectif	40
3.3.6	Contraintes du modèle	41
3.4	Collecte, structuration et préparation des données réelles	50
3.4.1	Présentation des sources de données hospitalières	50
3.4.2	Cartographie et quantification des ressources	52
3.5	Résolution exacte et validation du modèle sous IBM ILOG CPLEX	54
3.5.1	Choix de l'environnement d'optimisation et du solveur CPLEX	54
3.5.2	Résultats de l'optimisation pour le scénario de référence	55
3.5.3	Tests de montée en charge et évaluation des limites	58
3.6	Analyse des performances et limites de l'approche statique	59
3.7	Conclusion	60
4	Conception et simulation du Digital Twin pour le réseau hospitalier	62
4.1	Introduction	62
4.2	Architecture globale du jumeau numérique	63
4.2.1	Interactions entre le système physique et le système virtuel	64
4.2.2	Flux de données et logique de décision	65
4.3	Environnement de développement et outils logiciels	65
4.4	Logique de fonctionnement de la simulation et algorithme Greedy	66
4.4.1	Principe général de la simulation à événements discrets	67
4.4.2	Algorithme greedy d'affectation dynamique des patients	67
4.4.3	Pseudo-code de l'algorithme Greedy	68
4.5	Exécution de la simulation et élaboration des scénarios	69
4.5.1	Paramètres d'exécution de la simulation	70
4.5.2	Mode temps réel, ajout et sortie manuelle des patients	71
4.5.3	Visualisation du réseau hospitalier	72
4.5.4	Scénarios de simulation	75
4.5.5	Indicateurs collectés pendant la simulation	76
4.6	Résultats de la simulation et analyse	77
4.6.1	Scénario de base : fonctionnement normal	77
4.6.2	Scénario de crise : surcharge des urgences	78
4.6.3	Analyse du tableau de bord et des indicateurs de performance	79
4.7	Conclusion	80
	Conclusion générale	82
	Références bibliographiques	84

Liste des figures

1.1	Les principales technologies de l'Industrie 4.0 (Kaur, 2022)	4
1.2	Évolution chronologique et niveaux de maturité du jumeau numérique (1970–aujourd'hui) (Martin, 2020)	7
1.3	Architecture et interaction entre le système physique et le jumeau numérique . .	9
1.4	Flux de données dans un modèle numérique	11
1.5	Flux de données dans une ombre numérique	11
1.6	Flux de données dans un jumeau numérique	12
1.7	Cycle de vie du Jumeau Numérique	13
1.8	Les différentes catégories de jumeaux numériques (Tchana, Ducellier, & Remy, 2019)	14
1.9	Applications et perspectives de la technologie des jumeaux numériques dans le domaine médical. (Sun et al., 2023)	17
4.1	Architecture globale du jumeau numérique proposé pour le réseau hospitalier . .	63
4.2	Interface principale de la simulation en vue 2D	70
4.3	Fenêtre d'ajout manuel d'un patient dans le jumeau numérique	71
4.4	Fenêtre de sortie manuelle d'un patient	72
4.5	Carte 2D du réseau hospitalier simulé	73
4.6	Fenêtre de détail d'un hôpital dans la vue 2D	74
4.7	Visualisation 3D du jumeau numérique hospitalier	74
4.8	Panneau de détail d'un hôpital dans la vue 3D	75
4.9	Tableau de bord des indicateurs de simulation	76

Liste des tableaux

1.1	Définitions du jumeau numérique dans la littérature	8
2.1	Classification des applications du jumeau numérique en santé	21
2.2	Synthèse comparative des travaux sur le jumeau numérique en gestion hospitalière	26
3.1	Principaux établissements hospitaliers considérés dans le réseau de Tlemcen . . .	33
3.2	Ensembles et indices du modèle mathématique	35
3.3	Paramètres liés aux patients et aux temps	36
3.4	Paramètres liés aux besoins médicaux et aux ressources hospitalières	36
3.5	Paramètres liés à la criticité et à la formulation mathématique	37
3.6	Variables d'affectation et de transfert	37
3.7	Variables temporelles liées aux services médicaux	38
3.8	Variables liées aux postes parallèles des services	38
3.9	Variables liées à l'occupation dynamique des lits	39
3.10	Variables liées aux ambulances	39
3.11	Variables liées au dépassement du temps maximal souhaité	40
3.12	Principales sources de données utilisées pour la construction du modèle	52
3.13	Quantification des ressources hospitalières utilisées dans le modèle	53
3.14	Services médicaux considérés dans le modèle	53
3.15	Indicateurs globaux du scénario de référence	56
3.16	Décisions d'orientation des patients dans le scénario de référence	56
3.17	Transferts réalisés par ambulance	57
3.18	Analyse du dépassement de W_{max} pour les patients critiques	57
3.19	Occupation dynamique des lits dans le scénario de référence	57
3.20	Scénarios de montée en charge du modèle	58
3.21	Comparaison des résultats des scénarios de montée en charge	58
4.1	Scénarios proposés pour l'exécution de la simulation	76
4.2	Extrait des résultats exportés vers Excel	77
4.3	Résultats du scénario de base	78
4.4	Comparaison qualitative entre fonctionnement normal et surcharge	79
4.5	Principaux indicateurs de performance du jumeau numérique	80

Introduction générale

Le secteur de la santé connaît aujourd’hui une transformation importante sous l’effet du développement des technologies numériques. Les établissements hospitaliers sont de plus en plus confrontés à des défis liés à la gestion des ressources, à l’orientation des patients, à la coordination entre les services et à la surcharge des urgences. Ces difficultés deviennent plus complexes lorsque les ressources disponibles, comme les lits, les ambulances, le personnel et les services spécialisés, doivent être utilisées de manière efficace afin d’assurer une prise en charge rapide et adaptée des patients.

Dans ce contexte, le concept de jumeau numérique représente une approche prometteuse pour mieux comprendre, analyser et améliorer le fonctionnement des systèmes hospitaliers. Un jumeau numérique permet de créer une représentation virtuelle d’un système réel, capable de recevoir des données, de simuler son comportement et de soutenir la prise de décision. Appliqué au domaine hospitalier, il peut aider à suivre les flux de patients, à analyser la disponibilité des ressources, à anticiper les situations de surcharge et à améliorer l’orientation des patients entre les établissements de santé.

Le présent travail s’inscrit dans cette problématique. Il porte sur la conception d’un jumeau numérique pour la gestion hospitalière, avec une application au réseau hospitalier de la wilaya de Tlemcen. L’objectif principal est de proposer une approche permettant d’améliorer l’orientation et le transfert des patients entre les hôpitaux, en tenant compte des services disponibles, des temps de transfert, des capacités des ressources, des lits, des ambulances et de la criticité des patients.

Pour atteindre cet objectif, le travail est organisé autour de deux approches complémentaires. La première repose sur une modélisation mathématique exacte du problème. Cette modélisation permet de formuler les décisions d’affectation, de transfert, de passage dans les services, d’utilisation des lits et d’utilisation des ambulances. Le modèle mono-objectif développé vise à minimiser le temps total de prise en charge des patients, tout en respectant les contraintes opérationnelles du système hospitalier. La résolution exacte est réalisée à l’aide du solveur IBM ILOG CPLEX.

La deuxième approche repose sur la simulation dynamique et le concept de jumeau numérique. Elle permet de dépasser certaines limites du modèle exact, notamment lorsque le nombre de patients augmente ou lorsque le système doit être représenté de manière continue dans le temps. Le jumeau numérique développé utilise une simulation à événements discrets, un algorithme greedy d’affectation dynamique des patients, ainsi qu’une interface de visualisation permettant de suivre l’état du réseau hospitalier, les patients actifs, les transferts, les ressources et les indicateurs de performance.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres. Le premier chapitre présente les généralités sur les jumeaux numériques et l’Industrie 4.0. Il introduit les concepts fondamentaux, l’origine du jumeau numérique, ses composants, ses niveaux d’intégration et ses domaines d’application.

Le deuxième chapitre est consacré à la revue de la littérature sur l’application du jumeau numérique à la gestion hospitalière. Il présente les travaux existants dans le domaine de la santé, les spécificités des systèmes hospitaliers, les transformations numériques dans le secteur médical,

ainsi que le positionnement de la présente recherche.

Le troisième chapitre présente le cas d'étude, la modélisation mathématique et la résolution exacte du problème. Il décrit le contexte du système de santé algérien et le réseau hospitalier de Tlemcen, puis développe le modèle mono-objectif avec ses hypothèses, ses ensembles, ses paramètres, ses variables, sa fonction objectif et ses contraintes. Les résultats obtenus sous IBM ILOG CPLEX sont ensuite analysés afin d'évaluer les performances et les limites de l'approche statique.

Le quatrième chapitre présente la conception et la simulation du jumeau numérique proposé. Il décrit l'architecture globale du système, l'environnement de développement, la logique de simulation, l'algorithme greedy d'affectation dynamique, les scénarios d'exécution, les résultats de simulation et les indicateurs de performance. Cette partie permet de montrer l'apport de la simulation dynamique comme complément au modèle mathématique exact.

Ainsi, ce travail vise à proposer une démarche intégrée combinant modélisation mathématique, optimisation exacte et simulation dynamique, afin de contribuer à l'amélioration de la gestion des patients et des ressources dans un réseau hospitalier.

Chapitre 1

Généralités sur les jumeaux numériques et l'Industrie 4.0

1.1 Introduction

L'Industrie 4.0 représente une nouvelle évolution basée sur l'utilisation des technologies digitales et des systèmes intelligents. Dans ce contexte, le jumeau numérique offre la possibilité de concevoir une modélisation virtuelle d'un système réel pour mieux comprendre et analyser son fonctionnement. Ce chapitre présente les concepts de l'Industrie 4.0 et les bases des jumeaux numériques, ainsi que leurs principales applications.

1.2 Industrie 4.0

L'Industrie 4.0 désigne une évolution importante de l'industrie moderne, que l'on peut définir comme une nouvelle approche de l'organisation de la production industrielle par l'introduction des technologies numériques, dans le but de favoriser le bon fonctionnement des systèmes de production, ainsi que la qualité des produits réalisés (Saurabh Vaidya, 2018). L'Industrie 4.0 repose sur la numérisation des processus de production, dans le but d'optimiser l'organisation et le pilotage de la production.

Le concept d'Industrie 4.0 est apparu pour la première fois en 2011, en Allemagne, lors de la foire industrielle de Hanovre. Il fait partie d'une stratégie nationale visant à moderniser l'industrie et à favoriser sa compétitivité grâce aux nouvelles technologies numériques (Henning Kagermann, 2013). Depuis cette date, l'Industrie 4.0 est devenue un thème fort des réflexions sur l'avenir de l'industrie.

Selon Kagermann et al. (Henning Kagermann, 2013), l'Industrie 4.0 est considérée comme la quatrième révolution industrielle, basée sur la numérisation et la connexion des systèmes de production. Cette approche permet aux machines, aux systèmes informatiques et aux personnes d'échanger des informations et de coopérer plus efficacement.

D'après Vaidya et al. (Saurabh Vaidya, 2018), cette nouvelle organisation industrielle est fondée sur plusieurs technologies clés, notamment l'Internet des objets, les systèmes cyber-physiques, le cloud computing et l'analyse des données qui favorisent la coordination des activités industrielles et la gestion des chaînes de production.

Enfin, l'évolution, notée par Kohler et Weisz (Weisz, 2016), tend vers une transformation progressive des systèmes de production traditionnels vers des structures capables de s'adapter aux changements et d'optimiser leur fonctionnement, le but attendu étant principalement l'amélioration de la performance globale des entreprises industrielles.

De manière globale, l'Industrie 4.0 correspond à une transformation de l'industrie qui repose sur la connexion entre le monde physique et le monde numérique afin de produire mieux, plus efficacement, plus intelligemment, et d'apprendre à mieux répondre aux exigences du marché.

1.2.1 Concepts clés de l'Industrie 4.0

L'Industrie 4.0 repose sur l'application de plusieurs concepts importants qui permettent de transformer les systèmes industriels traditionnels en systèmes intelligents et connectés. Ces concepts sont issus du fort développement des technologies numériques et de l'automatisation. Ils visent à améliorer le fonctionnement des usines, à renforcer la communication entre machines et à optimiser les processus de production.

Les concepts clés de l'Industrie 4.0 permettent aux entreprises de mieux collecter, analyser et utiliser les données en temps réel. Les systèmes sont plus flexibles et plus efficaces ; ils peuvent très vite s'adapter à des changements. Comprendre ces concepts est essentiel pour comprendre le fonctionnement de l'Industrie 4.0 et son rôle dans la modernisation de l'industrie. Cette transformation repose sur plusieurs concepts technologiques tels que l'intégration horizontale et verticale des systèmes, l'intelligence artificielle, l'Internet des objets, la réalité augmentée, la fabrication additive, les robots autonomes, la cybersécurité, l'informatique en nuage, le Big Data et l'analyse des données, ainsi que la simulation, comme illustré dans la figure :

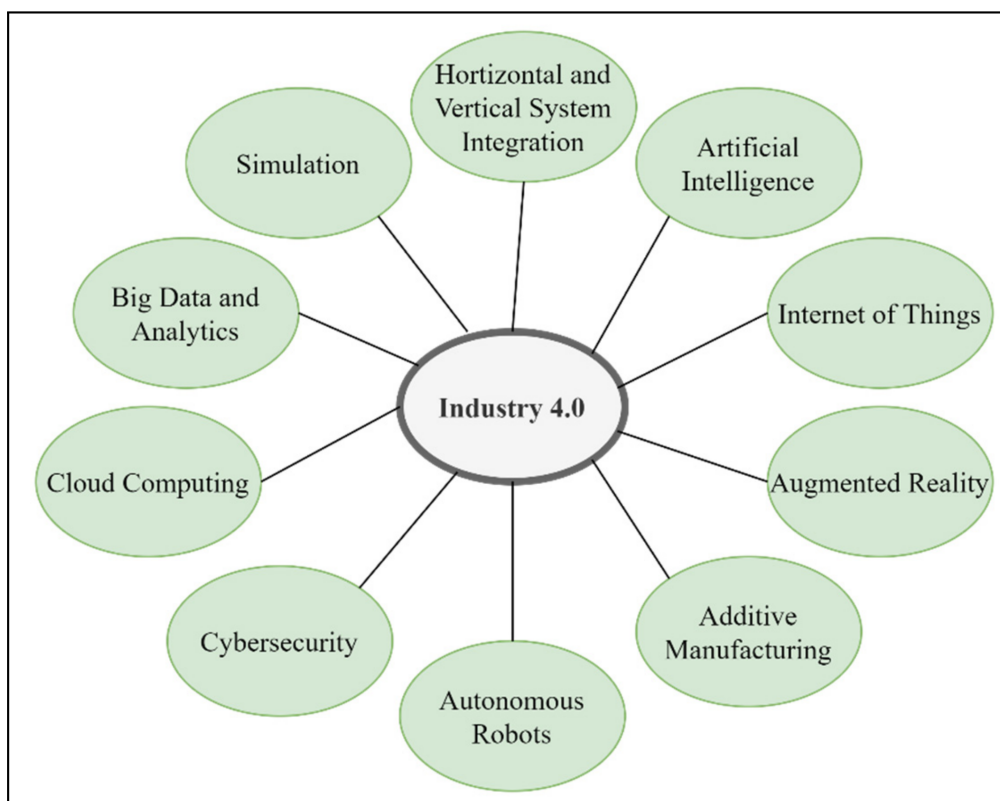


FIGURE 1.1 – Les principales technologies de l'Industrie 4.0 (Kaur, 2022)

Big Data et l'analyse des données

Le Big Data correspond à un ensemble de méthodes dédiées à la collecte et à l'analyse de très grands volumes de données. Il se caractérise par une approche de la connaissance axée sur l'identification de corrélations et la capacité de prédire des événements futurs. Le Big Data soulève ainsi des enjeux sociaux et politiques majeurs, ce qui en fait un sujet central pour l'analyse

critique. Par ailleurs, il invite à une réflexion sur les pratiques scientifiques, notamment sur le plan épistémologique, et sur les possibilités, ainsi que les limites, des collaborations interdisciplinaires. (Duclos, 2023)

L’Internet des objets

L’Internet des objets (IoT) désigne un réseau reliant des objets physiques à Internet afin de permettre leur identification, leur communication et l’échange d’informations. Il assure une continuité entre les mondes physique et numérique en facilitant la collecte, le stockage et le traitement des données. L’IoT peut ainsi être considéré comme une extension de l’Internet vers les objets connectés, tout en soulevant des enjeux technologiques, économiques et sociaux importants, notamment en matière de standardisation et de protection des données. (Saad, 2016)

L’intelligence artificielle

L’intelligence artificielle (IA) est une science qui cherche à reproduire, à l’aide d’ordinateurs, des comportements et des raisonnements intelligents. Elle rencontre des difficultés liées à la compréhension des mécanismes de l’intelligence humaine et aux limites des systèmes informatiques. L’IA est ainsi une science expérimentale, fondée sur l’expérimentation informatique et l’observation du comportement humain, et elle s’intéresse à ses définitions, à son évolution et à ses perspectives futures. (Laurière, 1987)

Intégration horizontale et verticale des systèmes

L’intégration horizontale et verticale des systèmes consiste à relier les différents niveaux d’une entreprise, depuis la gestion jusqu’au niveau de production, ainsi que les acteurs externes tels que les fournisseurs et les clients. Dans l’Industrie 4.0, cette intégration permet un échange continu et cohérent des données tout au long de la chaîne de valeur. Elle améliore la coordination entre les départements, optimise les processus industriels et favorise l’automatisation globale des systèmes de production. (Michael, Markus, & Philipp Gerbert, 2015)

Simulation

La simulation joue un rôle important dans l’Industrie 4.0 en permettant de représenter virtuellement les produits, les machines et les processus industriels. Grâce aux données en temps réel, ces modèles numériques reproduisent le comportement du système physique. La simulation aide ainsi à tester différentes configurations, à anticiper les problèmes et à optimiser les performances avant la mise en œuvre réelle, ce qui réduit les coûts et améliore la qualité. (Michael, Markus, & Philipp Gerbert, 2015)

Robots autonomes

Les robots autonomes sont des systèmes capables d’exécuter des tâches industrielles de manière flexible et indépendante. Dans le contexte de l’Industrie 4.0, ces robots peuvent collaborer entre eux et travailler en toute sécurité aux côtés des opérateurs humains. Ils s’adaptent aux changements de production, améliorent la précision des opérations et contribuent à accroître la productivité et la sécurité dans les environnements industriels. (Michael, Markus, & Philipp Gerbert, 2015)

Cybersécurité

Avec l’augmentation de la connectivité des systèmes industriels, la cybersécurité devient un élément essentiel de l’Industrie 4.0. Elle vise à protéger les données, les machines et les réseaux contre les cyberattaques et les accès non autorisés. Une cybersécurité efficace garantit la fiabilité des communications, la continuité des opérations et la protection des informations sensibles au sein des systèmes de production intelligents. (Michael, Markus, & Philipp Gerbert, 2015)

Le Cloud

Le cloud computing permet de stocker, traiter et partager de grandes quantités de données à distance. Dans l’Industrie 4.0, le cloud facilite la communication entre les différents sites de production et les partenaires industriels. Il offre une grande flexibilité, permet l’analyse des données en temps réel et soutient le développement de services industriels intelligents basés sur les données. (Michael, Markus, & Philipp Gerbert, 2015)

Fabrication additive

La fabrication additive, notamment l’impression 3D, permet de produire des pièces et des produits couche par couche à partir de modèles numériques. Dans l’Industrie 4.0, cette technologie est utilisée pour fabriquer des produits personnalisés, des prototypes et des pièces complexes. Elle réduit les délais de production, limite les déchets et offre une grande liberté de conception. (Michael, Markus, & Philipp Gerbert, 2015)

Réalité augmentée

La réalité augmentée consiste à superposer des informations numériques à l’environnement réel de l’utilisateur. Dans l’industrie, elle est utilisée pour la maintenance, l’assistance technique et la formation des opérateurs. En fournissant des informations en temps réel, la réalité augmentée améliore la prise de décision, réduit les erreurs et augmente l’efficacité des tâches industrielles. (Michael, Markus, & Philipp Gerbert, 2015)

1.3 Jumeaux numériques

1.3.1 Historique

Les origines du jumeau numérique remontent aux années 1960, lorsque la NASA a développé des systèmes de mise en miroir afin de reproduire au sol le comportement de systèmes spatiaux réels, notamment lors de la mission Apollo 13, où ces simulateurs ont joué un rôle déterminant dans le sauvetage de l’équipage ((NASA), 1970) (Jones, 2021). Au cours des années 1980 et 1990, les progrès de l’informatique ont permis l’apparition de modèles numériques de simulation, principalement utilisés en phase de conception, mais encore déconnectés des systèmes physiques, constituant des représentations statiques du réel (Martin, 2020) ((IHEST), 2022). Le concept moderne de jumeau numérique est ensuite formalisé au début des années 2000 par Michael Grieves, qui introduit, dans le cadre du Product Lifecycle Management, un modèle reposant sur la coexistence d’un système physique et d’un système virtuel reliés par des flux de données continus tout au long du cycle de vie du produit (Grieves, 2014) (Grieves Michael, 2017). À partir des années 2010, l’essor de l’Internet des objets, du Big Data et des principes de l’Industrie 4.0 favorise l’émergence de l’ombre numérique, caractérisée par une transmission automatisée des données du réel vers le virtuel sans rétroaction complète (Kagermann Henning, 2013) (Martin,

2020) ((IHEST), 2022). Enfin, depuis les années 2020, le jumeau numérique atteint un niveau de maturité avancé en intégrant des échanges bidirectionnels en temps réel, l’intelligence artificielle et des capacités de prédiction et d’optimisation, devenant ainsi un outil central dans de nombreux secteurs industriels et progressivement dans le BTP (Martin, 2020) ((IHEST), 2022) (Jones, 2021).

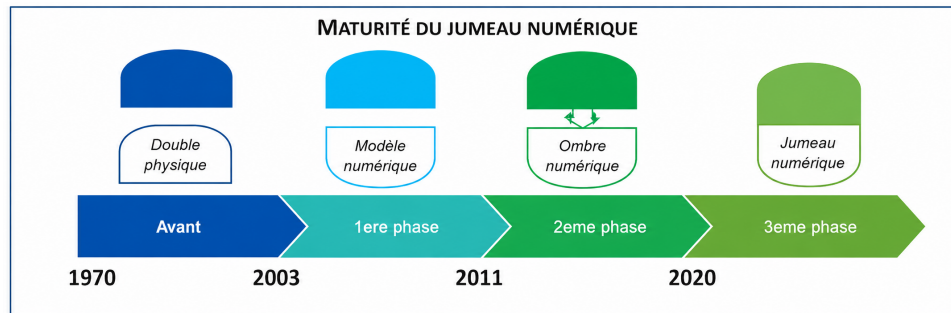


FIGURE 1.2 – Évolution chronologique et niveaux de maturité du jumeau numérique (1970–aujourd’hui) (Martin, 2020)

1.3.2 Définition et concepts fondamentaux des jumeaux numériques

Un jumeau numérique est une représentation virtuelle d’un objet, d’un système ou d’un processus réel, conçue pour reproduire son état et son comportement à partir de modèles numériques et de données issues du monde réel. Il s’appuie notamment sur des données historiques et, dans les cas avancés, sur des données en temps réel collectées par des capteurs, afin de surveiller, analyser et prédire les performances du système physique. Le jumeau numérique peut couvrir tout ou partie du cycle de vie (conception, production, exploitation, maintenance et fin de vie) et, dans ses formes les plus abouties, permet des échanges bidirectionnels entre le monde physique et le monde virtuel (NASA, 2010) ; Glaessgen & Stargel, 2012 ; Grieves, 2014 ; Semeraro et al., 2021).

La littérature scientifique montre l’absence d’un consensus unique sur la définition du jumeau numérique, chaque communauté mettant l’accent sur des aspects spécifiques tels que la simulation avancée, le temps réel, la maintenance prédictive ou encore le cycle de vie. Afin de clarifier ces différentes approches, les principales définitions proposées dans la littérature sont synthétisées dans le tableau suivant (Grieves, 2014) ; Negri et al., 2017 ; Semeraro et al., 2021).

Auteur(s)	Définition
NASA	Le jumeau numérique est une simulation numérique intégrée, multi-physique et multi-échelle, utilisant des modèles physiques, des données issues de capteurs et des données historiques afin de reproduire la vie et le comportement d’un système réel (NASA, 2010).
Glaessgen & Stargel	Le jumeau numérique est défini comme une simulation intégrée et probabiliste d’un produit complexe, continuellement mise à jour à partir des données du système réel pour refléter l’état et l’évolution de son jumeau physique (Glaessgen & Stargel, 2012).

Auteur(s)	Définition
Grieves	Le jumeau numérique correspond à un ensemble complet d'informations virtuelles décrivant un produit réel ou potentiel, reposant sur trois éléments fondamentaux : le produit physique, le produit virtuel et les flux de données reliant ces deux entités tout au long du cycle de vie (Grieves, 2014).
Lee et al.	Le jumeau numérique est un modèle couplé d'une machine réelle et de son équivalent numérique fonctionnant en parallèle, généralement dans le cloud, afin d'évaluer l'état de santé du système à partir des données et des connaissances physiques disponibles (Lee et al., 2013).
Rosen et al.	Le jumeau numérique est un modèle très réaliste représentant l'état actuel d'un processus et son comportement en interaction avec son environnement réel (Rosen et al., 2015).
Brenner & Hummel	Le jumeau numérique est une copie numérique d'une usine, d'une machine ou d'un opérateur, créée indépendamment, mise à jour automatiquement et accessible en temps réel pour le suivi et la gestion des opérations (Brenner & Hummel, 2017).
Schleich et al.	Le jumeau numérique repose sur une relation bidirectionnelle entre un artefact physique et ses modèles virtuels, permettant de soutenir efficacement les activités de conception, de production et de maintenance sur l'ensemble du cycle de vie du produit (Schleich et al., 2017).
Zhang et al.	Le jumeau numérique est un ensemble de modèles réalistes reliant de grandes quantités de données à des simulations rapides, afin d'évaluer précocement l'impact des décisions de conception sur les produits et les systèmes de production (Zhang et al., 2017).
Negri et al.	Le jumeau numérique est une contrepartie virtuelle d'un système physique exploitant une synchronisation en temps réel des données et s'inscrivant dans le cadre des systèmes cyber-physiques et de l'Industrie 4.0 (Negri et al., 2017).
Liu et al.	Le jumeau numérique est un modèle vivant qui s'adapte continuellement grâce aux données sensorielles en temps réel et qui permet la prédiction de l'état futur des actifs physiques, notamment pour la maintenance prédictive (Liu et al., 2018).
Semeraro et al.	Le jumeau numérique est un ensemble de modèles adaptatifs et dynamiques, mis à jour tout au long du cycle de vie d'un système physique, permettant de prévoir les défaillances, d'optimiser les performances et de soutenir la prise de décision (Semeraro et al., 2021).

TABLE 1.1 – Définitions du jumeau numérique dans la littérature

Concept de jumeau numérique

Le jumeau numérique est une représentation virtuelle dynamique d'un système, d'un produit ou d'un processus réel. Il vise à reproduire fidèlement l'état et le comportement du système physique à l'aide de modèles numériques et de données issues du monde réel. Le concept a été formalisé au début des années 2000 par Michael Grieves dans le cadre du PLM, puis largement diffusé par la NASA. Selon les domaines, le jumeau numérique peut concerner les produits, les systèmes de production ou les processus industriels. Grâce aux technologies de l'Internet des objets, du cloud et de l'Industrie 4.0, une connexion continue entre le réel et le virtuel est possible. Cette connexion permet la surveillance, l'analyse des performances et la prédiction des défaillances. Les données collectées durant l'exploitation servent également à améliorer les systèmes existants et à concevoir de nouvelles générations de produits. (Boschert, Heinrich & Rosen, 2018)

1.3.3 Composants d'un jumeau numérique

Le jumeau numérique repose sur une interaction continue entre un système physique réel et sa représentation numérique virtuelle. La figure illustre cette relation bidirectionnelle ainsi que les principaux éléments qui permettent d'assurer la communication, l'analyse et l'action entre les deux mondes.

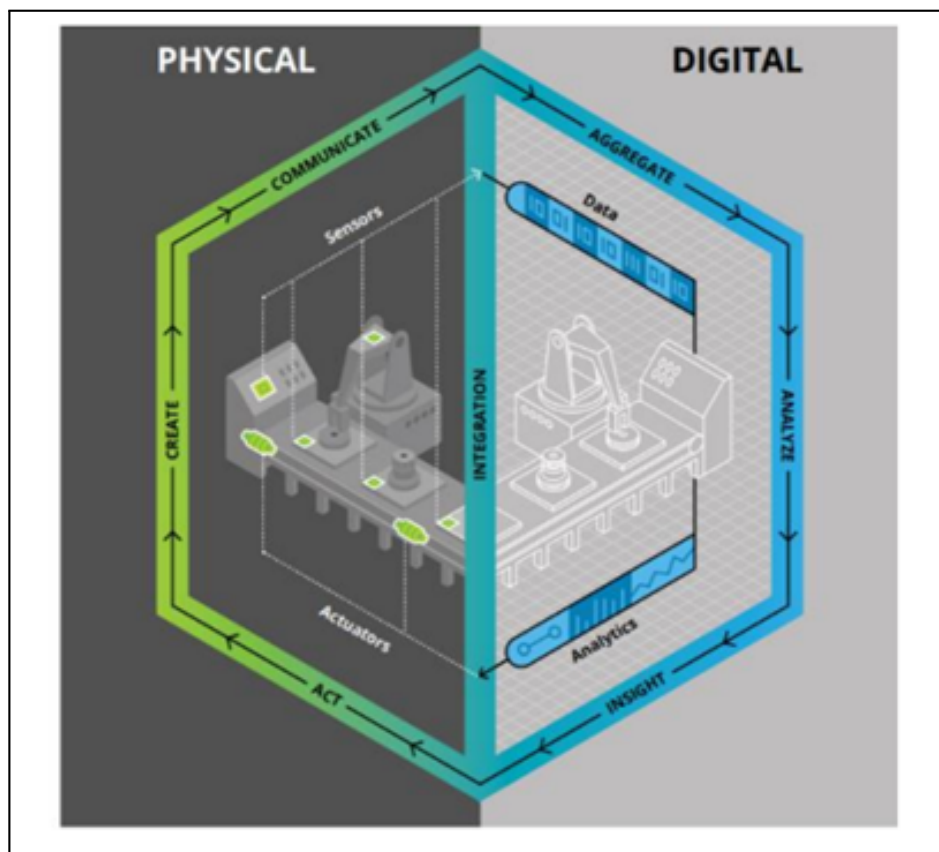


FIGURE 1.3 – Architecture et interaction entre le système physique et le jumeau numérique

Les capteurs : Répartis tout au long du processus de fabrication, jouent un rôle fondamental en collectant des données en temps réel sur l'état et le comportement du système physique. Ces

données permettent au jumeau numérique de reproduire fidèlement les conditions de fonctionnement du processus réel.

Les données constituent le cœur du jumeau numérique. Elles regroupent non seulement les informations issues des capteurs, mais aussi des données internes à l'entreprise telles que les nomenclatures, les spécifications de conception, les dessins techniques, les systèmes d'information, ainsi que des données externes selon le contexte d'utilisation.

L'intégration assure la liaison entre le monde physique et le monde numérique. Elle repose sur des technologies de communication, des interfaces, des systèmes de sécurité et des solutions périphériques (edge computing), garantissant un échange fiable et continu des informations entre les deux environnements.

L'analytique correspond à l'ensemble des méthodes d'analyse des données, incluant les algorithmes, les simulations et les outils de visualisation. Cette étape permet d'interpréter les données collectées, d'évaluer les performances du système, de détecter des anomalies et de générer des recommandations ou des prédictions.

Les actionneurs assurent la boucle de rétroaction vers le monde réel. À partir des analyses réalisées par le jumeau numérique, des instructions ou messages sont transmis aux opérateurs ou aux systèmes automatisés afin de déclencher des actions physiques sur le processus réel, permettant ainsi l'optimisation et l'ajustement du fonctionnement.

1.3.4 Niveau d'intégration

De manière générale, un jumeau numérique peut être compris comme une version numérique d'un objet physique. Dans la littérature, les termes Modèle Numérique, Ombre Numérique et Jumeau Numérique sont souvent utilisés de façon interchangeable. Cependant, ces notions ne sont pas identiques, car elles se distinguent par le degré de connexion entre l'objet physique et sa représentation numérique.

Certaines représentations numériques sont créées manuellement et ne sont pas reliées à un objet physique réel. D'autres, au contraire, sont directement connectées à l'objet physique grâce à des échanges de données en temps réel. C'est pour cette raison que les auteurs proposent de classer les jumeaux numériques en trois catégories, selon leur niveau d'intégration des données. (Kritzinger et al., 2018)

Modèle Numérique

Un Modèle Numérique correspond à une représentation numérique d'un objet physique existant ou en projet, sans échange automatique de données entre les deux. Il peut décrire l'objet de manière plus ou moins détaillée. Ce type de modèle peut être utilisé, par exemple, pour simuler une usine future, représenter mathématiquement un nouveau produit ou modéliser un objet physique sans connexion directe avec la réalité. Les données issues de systèmes physiques peuvent être utilisées lors de la création du modèle, mais les mises à jour se font uniquement de manière manuelle. Ainsi, une modification de l'objet physique n'entraîne aucun changement automatique du modèle numérique, et inversement.

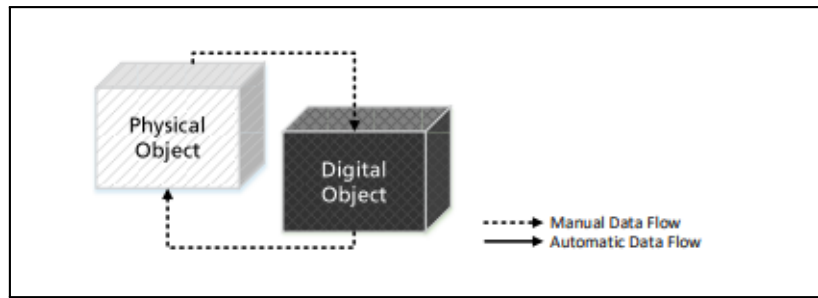


FIGURE 1.4 – Flux de données dans un modèle numérique

Ombre Numérique

À partir du concept de Modèle Numérique, on parle d'Ombre Numérique lorsqu'il existe un échange de données automatisé dans un seul sens entre un objet physique réel et sa représentation numérique. Dans ce cas, toute modification de l'état de l'objet physique est automatiquement reflétée dans l'objet numérique. En revanche, l'objet numérique n'a aucune influence directe sur l'objet physique.

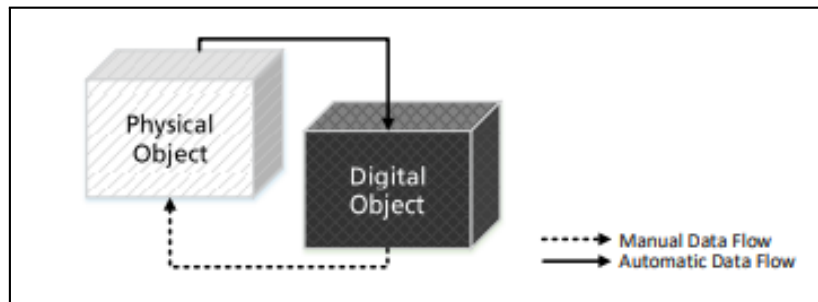


FIGURE 1.5 – Flux de données dans une ombre numérique

Jumeau Numérique

Lorsque les échanges de données entre l'objet physique et l'objet numérique sont entièrement automatisés et fonctionnent dans les deux sens, on parle alors de Jumeau Numérique. Dans cette configuration, l'objet numérique peut non seulement représenter l'objet physique, mais aussi le surveiller et, dans certains cas, le contrôler. De plus, d'autres entités, qu'elles soient physiques ou numériques, peuvent également provoquer des changements dans l'état de l'objet numérique. Ainsi, toute modification de l'état de l'objet physique se répercute immédiatement sur l'objet numérique, et inversement.

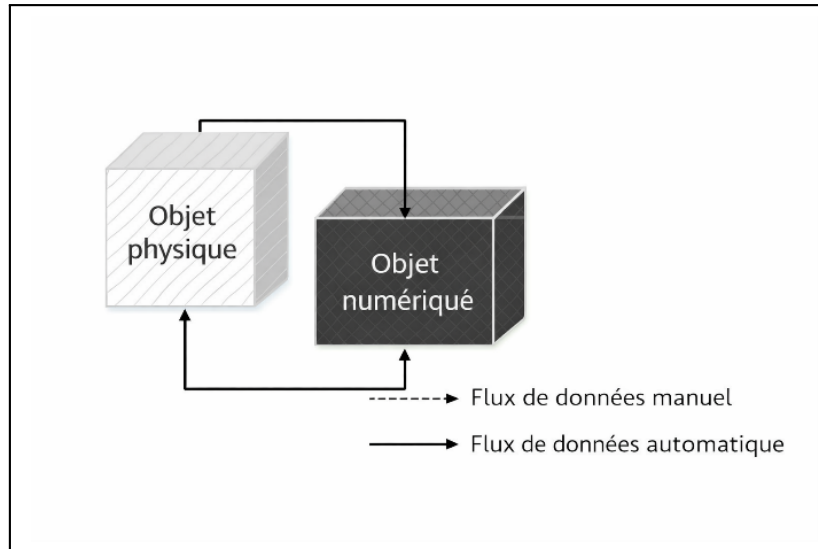


FIGURE 1.6 – Flux de données dans un jumeau numérique

1.3.5 Cycle de vie du Jumeau Numérique

Le cycle de vie du Jumeau Numérique repose sur une double approche : l'ingénierie des systèmes et la gestion du cycle de vie du produit (PLM). Ces deux visions poursuivent le même objectif : assurer le suivi et le contrôle du système durant toute son existence. Grâce à la collecte continue de données, le système réel peut être observé en temps réel et optimisé à partir de son équivalent virtuel.

Le Jumeau Numérique ne représente pas seulement une partie du système de production, mais sa reproduction complète. Pour exploiter pleinement son potentiel, il est nécessaire d'intégrer les jumeaux virtuels de toutes les ressources d'un environnement industriel afin de créer un système numérique cohérent, capable de simulations précises et d'analyses en temps réel.

Son cycle de vie comprend quatre phases principales :

Création : conception du modèle virtuel, définition des exigences et réalisation de simulations pour anticiper les comportements du système et réduire les erreurs avant l'implémentation physique.

Production : mise en place du système réel et synchronisation avec son modèle virtuel grâce à l'échange de données. À cette étape, le lien entre monde physique et monde numérique devient opérationnel.

Exploitation : fonctionnement simultané des deux systèmes avec un flux de données bidirectionnel. Cette phase permet la surveillance continue, l'optimisation des performances et la maintenance prédictive.

Fin de vie : récupération et exploitation des données accumulées pour améliorer les futures générations de systèmes, prévenir les erreurs et limiter les impacts environnementaux.

Ainsi, le Jumeau Numérique constitue un outil stratégique pour l'Industrie 4.0. Il favorise une meilleure maîtrise des processus industriels, réduit les coûts de maintenance et améliore le développement de produits adaptés aux besoins du marché. (Schützer, Bertazzi, Sallati, Anderl & Zancul, 2019)

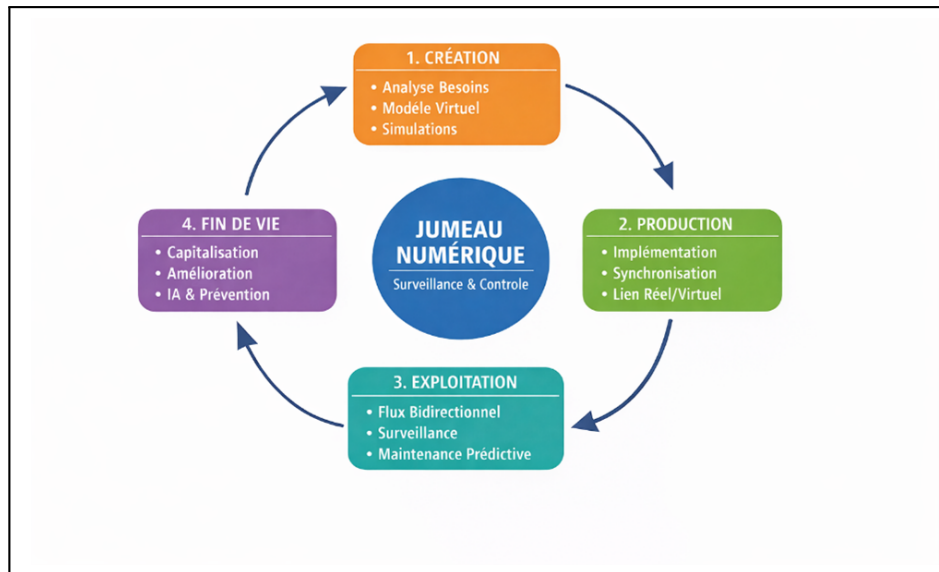


FIGURE 1.7 – Cycle de vie du Jumeau Numérique

1.3.6 Différents types de jumeaux numériques

Jumeaux de composants ou de pièces

Les jumeaux de composants représentent le niveau fondamental d'un jumeau numérique. Ils correspondent à la modélisation numérique d'un élément fonctionnel élémentaire. Les jumeaux de pièces reposent sur le même principe, mais concernent des éléments de moindre criticité ou de plus petite échelle au sein du système global.

Jumeaux d'actifs

Lorsque plusieurs composants sont intégrés et interagissent entre eux, ils constituent un actif. Les jumeaux d'actifs permettent d'étudier et d'analyser ces interactions afin de collecter des données de performance. Ces données peuvent ensuite être exploitées et transformées en informations utiles pour l'optimisation et la prise de décision.

Jumeaux de systèmes ou d'unités

À un niveau supérieur, les jumeaux de systèmes (ou d'unités) offrent une vision globale de l'intégration des différents actifs au sein d'un système complet. Ils permettent de comprendre les relations et les interactions entre actifs, tout en identifiant des opportunités d'amélioration des performances globales.

Jumeaux numériques de processus

Les jumeaux de processus représentent le niveau le plus large d'analyse. Ils modélisent l'interaction entre plusieurs systèmes afin de reproduire le fonctionnement d'une installation de production complète. Ils permettent d'évaluer la coordination entre les systèmes, d'identifier d'éventuels déséquilibres ou retards, et d'analyser les mécanismes de synchronisation influençant l'efficacité globale.

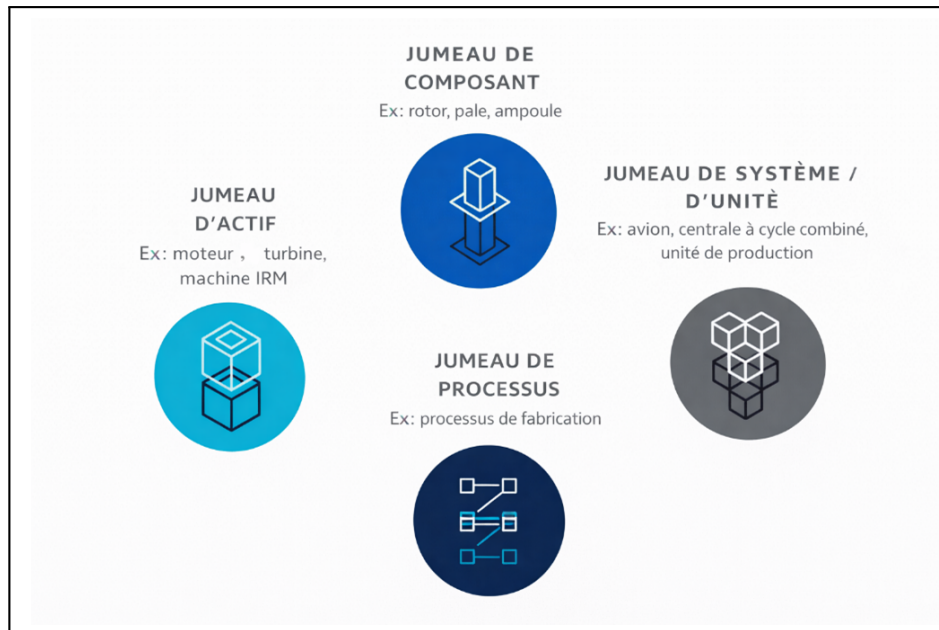


FIGURE 1.8 – Les différentes catégories de jumeaux numériques (Tchana, Ducellier, & Remy, 2019)

1.3.7 Applications des jumeaux numériques

La partie suivante présente les différentes applications des Jumeaux Numériques. Elle commence par identifier les usages possibles de cette technologie en précisant les domaines concernés et les problèmes qu'elle peut résoudre. Aujourd'hui, le concept de Jumeau Numérique connaît un développement important dans le milieu académique, soutenu par les progrès de l'Internet des Objets (IoT) et de l'intelligence artificielle (IA). Les principaux domaines d'application sont actuellement les villes intelligentes et la fabrication, avec également certaines applications dans le secteur de la santé.

Villes intelligentes

Les villes intelligentes ont évolué progressivement au cours des deux dernières décennies grâce à l'utilisation croissante des technologies de l'information et de la communication (TIC) et au développement rapide de la connectivité via l'IoT, permettant de surveiller et d'optimiser les opérations municipales telles que le trafic, le transport, la production d'électricité, la distribution des services publics, l'approvisionnement en eau et la gestion des déchets. Dans ce contexte, l'utilisation et le potentiel des Jumeaux Numériques augmentent d'année en année, car l'intégration de capteurs IoT dans les infrastructures urbaines permet de collecter un volume important de données exploitables. Ces données favorisent le développement d'algorithmes d'intelligence artificielle avancés, soutiennent la planification et le développement des villes intelligentes, améliorent l'efficacité énergétique et offrent une meilleure compréhension de la distribution et de l'utilisation des services publics. Les Jumeaux Numériques permettent également de créer un banc d'essai virtuel capable de tester différents scénarios et d'apprendre de l'environnement grâce à l'analyse continue des données collectées. Plusieurs exemples illustrent ces applications, notamment le Jumeau Numérique public des Docklands de Dublin pour la planification des lignes d'horizon et des espaces verts, le projet « Virtual Singapore » en tant que premier Jumeau Numérique d'un État-ville existant, ainsi que le Jumeau Numérique de Zurich, développé pour soutenir la prise de décision dans le cadre de la stratégie de ville intelligente (Hamzaoui & Julien, 2022) ; Fuller

et al., 2020).

Manufacturing

Le jumeau numérique trouve une application majeure dans le secteur de la fabrication, car les industriels cherchent constamment à mieux suivre et surveiller les produits afin de réduire les coûts et de gagner du temps. Son développement s’inscrit pleinement dans la dynamique de l’Industrie 4.0, qui repose sur la connectivité des équipements et l’intégration des technologies numériques dans les processus de production.

Grâce au jumeau numérique, il devient possible d’obtenir en temps réel des informations sur la performance des machines et des lignes de production. Cette technologie permet également d’anticiper les pannes et d’améliorer la fiabilité des systèmes grâce à une communication renforcée entre les dispositifs. Associée à l’intelligence artificielle, elle offre une meilleure précision dans l’analyse des données et dans la prédiction des performances futures. (Fuller et al., 2020)

Industrie automobile

Le jumeau numérique est aussi utilisé dans l’industrie automobile, notamment pour simuler le comportement de composants et exploiter les données des véhicules en direct. Dans le domaine de la construction, il contribue à améliorer la planification, la simulation et la maintenance des bâtiments, en permettant de tester virtuellement les modifications avant leur application réelle.

Ainsi, l’objectif principal du jumeau numérique est de remplacer les modèles statiques traditionnels par des simulations dynamiques en temps réel, capables d’apprendre, de surveiller et d’optimiser continuellement les systèmes industriels. (Fuller et al., 2020)

Bâtiments

Le développement des bâtiments intelligents progresse rapidement, permettant un meilleur contrôle des performances opérationnelles et structurelles, notamment en matière d’efficacité énergétique, de surveillance de l’état des structures, de prévention des risques et de résistance aux événements climatiques extrêmes. Dans ce contexte, l’intégration de jumeaux numériques dédiés devient indispensable.

Le jumeau numérique du bâtiment constitue une réplique virtuelle capable de fournir une surveillance structurelle en temps réel en combinant des données physiques et numériques. Des recherches visent à améliorer la collecte d’informations spatiales, notamment grâce aux nuages de points 3D, afin de créer des modèles plus précis et plus rapides pour les structures en béton.

Par ailleurs, l’utilisation du BIM et des jumeaux numériques facilite la visualisation des choix de conception, la collaboration entre acteurs et l’estimation des coûts pour des projets tels que les bâtiments à énergie nette zéro. Enfin, des projets comme McBIM montrent que les technologies du Web sémantique peuvent renforcer l’aide à la décision explicable, par exemple pour optimiser le placement des capteurs et la gestion intelligente des bâtiments. (Hamzaoui & Julien, 2022)

Transport

Les jumeaux numériques appliqués au transport concernent surtout la logistique interne, la gestion du trafic et les systèmes de mobilité intelligents.

Les jumeaux numériques (DT) ne sont pas seulement utilisés pour les produits et les processus, mais aussi dans le domaine du transport et de la logistique. Plusieurs études ont développé des DT pour améliorer la gestion du transport interne, notamment pour les véhicules à guidage automatique (AGV) et l’ordonnancement des opérations liées au déplacement des équipements.

Des systèmes de gestion numérique d'atelier ont également été mis en place pour optimiser les infrastructures logistiques.

En outre, les applications des DT dans le transport couvrent différents domaines tels que les ascenseurs, les pipelines, le trafic autoroutier, les véhicules électriques intelligents et les systèmes de contrôle du trafic, y compris dans les aéroports. (Hamzaoui & Julien, 2022)

Énergie

Dans le secteur de l'énergie, les jumeaux numériques sont utilisés pour optimiser, analyser et surveiller la consommation énergétique afin d'améliorer l'efficacité globale des systèmes.

Les jumeaux numériques (DT) jouent un rôle important dans la production, le transport, le stockage et la consommation de l'énergie. Ils permettent d'améliorer le contrôle, la conception et surtout l'optimisation des systèmes énergétiques.

Dans le domaine industriel, les DT sont appliqués aux systèmes de fabrication écoénergétiques et à la gestion de la consommation énergétique des équipements (EECM). Trois principales fonctions sont mises en avant : l'optimisation de la consommation d'énergie, son analyse et sa surveillance. Des stratégies basées sur les DT, combinées à des systèmes décisionnels intelligents, sont également utilisées pour optimiser en temps réel les opérations dans les usines, en agissant à la fois sur les couches physiques et virtuelles afin de réduire la consommation d'énergie. (Hamzaoui & Julien, 2022)

Santé

Le domaine de la santé représente aujourd'hui un champ important d'utilisation des jumeaux numériques. Les avancées rapides des technologies comme l'Internet des objets (IoT) ont profondément modernisé ce secteur. Les équipements connectés sont désormais plus accessibles et plus simples à intégrer, ce qui augmente le niveau de connectivité et favorise l'expansion des applications des jumeaux numériques.

L'une des perspectives majeures est la conception d'un jumeau numérique du patient capable de fournir un suivi en temps réel de son état de santé. À l'heure actuelle, ces technologies sont déjà employées pour simuler l'impact de certains traitements médicamenteux et pour préparer ou accompagner des interventions chirurgicales. Elles permettent aux professionnels de santé de créer des environnements virtuels adaptés à leurs objectifs, que ce soit pour des analyses immédiates ou pour anticiper des évolutions futures.

Combinés à l'intelligence artificielle, les jumeaux numériques renforcent la précision des prévisions et améliorent l'aide à la décision médicale. Certaines utilisations concernent davantage l'organisation hospitalière que le patient lui-même, notamment l'optimisation des services, la gestion des capacités d'accueil ou encore la maintenance préventive des dispositifs médicaux. Dans le contexte médical, la possibilité de simuler des scénarios et d'intervenir en temps réel est essentielle, car elle peut avoir un impact direct sur la survie des patients.

Même si cette technologie demeure en phase initiale de développement dans le secteur de la santé, ses perspectives sont vastes. Elle s'applique aussi bien à la gestion des établissements qu'à la médecine personnalisée et au secteur pharmaceutique. Le principe repose sur la reproduction numérique des données physiologiques et de leur évolution, ce qui facilite un diagnostic plus précis et un suivi thérapeutique adapté. Les progrès en intelligence artificielle, en IoT et dans le cadre de l'Industrie 4.0 ont largement soutenu l'essor de ces applications (Fuller et al., 2020) ; Attaran & Celik, 2023).

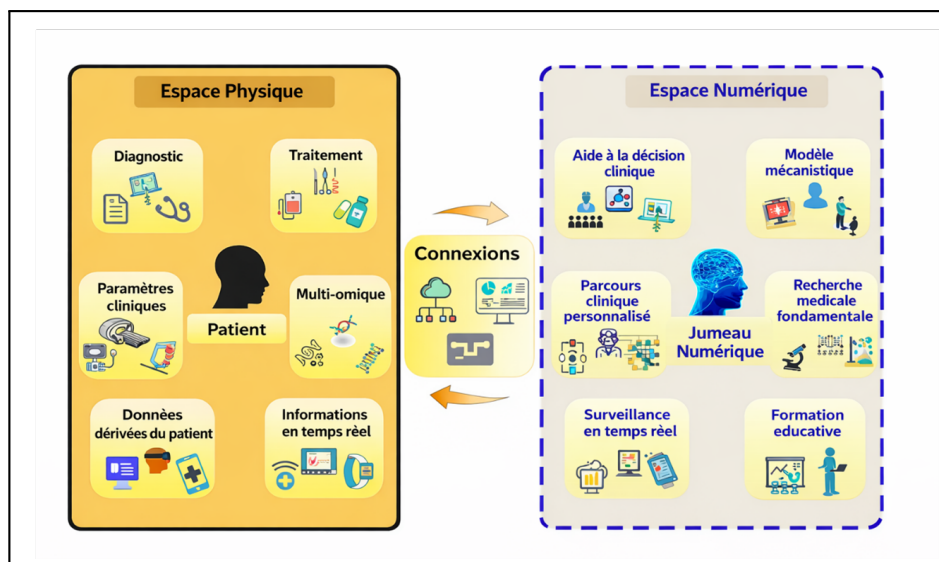


FIGURE 1.9 – Applications et perspectives de la technologie des jumeaux numériques dans le domaine médical. (Sun et al., 2023)

1.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les fondements théoriques de l'Industrie 4.0 et des jumeaux numériques. Nous avons d'abord montré que l'Industrie 4.0 repose sur l'intégration des technologies numériques, l'interconnexion des systèmes et l'exploitation des données en temps réel afin d'améliorer la performance, la flexibilité et l'intelligence des processus industriels.

Nous avons ensuite étudié le concept de jumeau numérique à travers son historique, ses définitions, ses composants, ses niveaux d'intégration, son cycle de vie, ses différentes catégories ainsi que ses principaux domaines d'application. Cette analyse a permis de montrer que le jumeau numérique constitue aujourd'hui un outil stratégique pour la surveillance, la simulation, la prédiction et l'optimisation des systèmes complexes.

Ainsi, ce cadre théorique met en évidence le potentiel des jumeaux numériques dans plusieurs secteurs, notamment celui de la santé. Il constitue une base essentielle pour aborder, dans le chapitre suivant, l'état de l'art du Digital Twin appliqué à la gestion hospitalière.

Chapitre 2

Revue de la littérature sur le Jumeau Numérique appliqué à la gestion hospitalière

2.1 Introduction

Le premier chapitre a permis de présenter les bases de l'Industrie 4.0 ainsi que les concepts essentiels du Jumeau Numérique. Dans cette continuité, le présent chapitre étudie l'application de cette technologie dans le domaine de la santé, en particulier dans la gestion des systèmes hospitaliers.

L'objectif de ce chapitre est de présenter un état de l'art structuré. Dans un premier temps, les caractéristiques et la complexité des systèmes hospitaliers sont présentées. Dans un second temps, les principales applications existantes, les solutions technologiques utilisées ainsi que les défis liés à l'intégration des données sont analysés. Enfin, cette revue de la littérature permettra de définir le positionnement de notre travail de recherche.

2.2 Le Jumeau Numérique dans le domaine de la santé

Le Jumeau Numérique est une technologie qui permet de créer une copie virtuelle et dynamique d'un système réel, comme un patient, un organe ou un hôpital. Cette copie est mise à jour en continu à partir de données réelles, ce qui permet de suivre son état et son évolution presque en temps réel.

Dans le domaine de la santé, cette technologie constitue un outil important pour aider à la prise de décision, aussi bien médicale qu'organisationnelle (Sun et al., 2023). Elle permet de créer un lien entre le monde réel et le monde numérique, facilitant ainsi la simulation de différentes situations, l'amélioration de la gestion des ressources et la prévision des flux de patients. Cela contribue à améliorer la performance globale des hôpitaux (Belmallem et Ferhati, 2025) ; (Sieve et al., 2025).

2.2.1 Spécificités des systèmes hospitaliers et complexité

L'utilisation du Jumeau Numérique dans les hôpitaux doit prendre en compte la forte complexité de ce domaine. Contrairement au secteur industriel, les systèmes hospitaliers sont caractérisés par une grande diversité de situations. En effet, chaque patient possède des caractéristiques

propres en termes d'état de santé, de comportement et de besoins, ce qui nécessite des modèles flexibles et adaptatifs (Sun et al., 2023).

Par ailleurs, les hôpitaux fonctionnent comme des systèmes où les environnements physique et numérique sont fortement liés. Cela implique une mise à jour continue des données issues des dispositifs médicaux afin d'assurer la fiabilité des décisions cliniques (Roopa et Venugopal, 2025).

De plus, la gestion hospitalière est complexe, car elle nécessite la coordination de plusieurs éléments tels que les patients, le personnel, les lits et les équipements. Ces éléments génèrent des données provenant de sources différentes, ce qui rend leur intégration difficile (Han et al., 2023).

Enfin, les données médicales sont très sensibles, ce qui impose des exigences strictes en matière de sécurité et de confidentialité. Il est donc nécessaire de mettre en place des systèmes fiables pour éviter toute perte ou utilisation non autorisée des informations (Roopa et Venugopal, 2025).

Dans ce contexte, le Jumeau Numérique représente une solution prometteuse pour mieux comprendre le fonctionnement global des hôpitaux. Il permet de simuler des scénarios, d'analyser les performances et d'anticiper les situations critiques. Cela contribue à améliorer l'organisation des services, l'utilisation des ressources et la qualité des soins.

2.2.2 Transformation numérique des systèmes de santé

La transformation numérique des hôpitaux ne se limite pas à l'utilisation d'outils informatiques. Elle modifie en profondeur la manière de travailler dans le domaine de la santé.

Cette évolution s'appuie sur l'utilisation des données et de l'intelligence artificielle pour développer une médecine plus intelligente, appelée Smart Medicine. Elle permet de passer d'une médecine réactive à une médecine prédictive, capable d'anticiper les maladies (Balasubramanyam et al., 2024).

Sur le plan technologique, cette transformation repose sur des systèmes médicaux connectés qui relient les équipements physiques à leurs versions numériques (Rahim et al., 2024). Sur le plan organisationnel, elle permet d'améliorer la gestion, d'optimiser l'utilisation des ressources et de réduire les erreurs (Hasan et al., 2025).

2.2.3 Intégration des données médicales et systèmes d'information hospitaliers

Le Jumeau Numérique ne peut fonctionner correctement que s'il dispose de données complètes et à jour. Cependant, dans les hôpitaux, les données proviennent de plusieurs systèmes, tels que les dossiers médicaux, les logiciels de gestion et les appareils médicaux (Han et al., 2023).

Le principal défi consiste à regrouper ces données dans un système unique. Cela nécessite des systèmes d'information capables de connecter toutes les sources et d'assurer leur synchronisation en temps réel.

Sur le plan technique, cette intégration repose sur des plateformes et des réseaux fiables permettant la communication entre les différents systèmes (Rahim et al., 2024). Par ailleurs, afin de protéger les données des patients, des technologies comme la blockchain peuvent être utilisées pour garantir la sécurité et l'intégrité des informations (Yang et al., 2025).

2.3 Les domaines d'application du Jumeau Numérique en santé

Les travaux récents montrent que les applications du Jumeau Numérique en santé couvrent un large domaine, allant des usages cliniques à la gestion hospitalière. À titre d'exemple, Sun et

al. (2023) montrent son rôle dans l'amélioration du diagnostic, de la simulation des traitements et du suivi continu des patients. De leur côté, Han et al. (2023) mettent en évidence son importance dans l'optimisation des opérations hospitalières, notamment la gestion des flux et des ressources. Enfin, Balasubramanyam et al. (2024) soulignent sa contribution au développement d'une médecine prédictive, personnalisée et proactive.

Dans cette perspective, les applications du Jumeau Numérique peuvent être regroupées en deux grandes catégories :

- Les applications **cliniques** centrées sur le patient et les soins médicaux ;
- Les applications **organisationnelles** centrées sur l'efficacité des systèmes hospitaliers.

Le tableau 2.1 présente la classification des applications du Jumeau Numérique en santé :

Catégorie	Sous-domaine	Application	Description académique	Références
Applications cliniques	Médecine personnalisée	Personnalisation des traitements	Adaptation des décisions thérapeutiques à partir des données individuelles (génétiques et comportementales).	Sun et al., 2023 ; Balasubramanyam et al., 2024
	Diagnostic médical	Diagnostic de précision	Utilisation de modèles numériques pour améliorer la détection des pathologies et réduire les procédures invasives.	Sun et al., 2023
	Simulation thérapeutique	Essais cliniques <i>in silico</i>	Évaluation virtuelle des effets des interventions ou médicaments avant leur application réelle sur le patient.	Sun et al., 2023 ; Balasubramanyam et al., 2024
	Chirurgie	Planification opératoire	Simulation préopératoire 3D visant à réduire les risques et optimiser la précision du geste chirurgical.	Sun et al., 2023 ; Balasubramanyam et al., 2024
	Suivi patient	Surveillance temps réel	Surveillance continue par capteurs connectés, permettant une intervention proactive en cas d'anomalie.	Sun et al., 2023 ; Han et al., 2023

Catégorie	Sous-domaine	Application	Description académique	Références
Applications organisationnelles	Gestion hospitalière	Gestion des ressources	Optimisation de l'allocation des lits, du personnel et des équipements médicaux critiques.	Han et al., 2023 ; Balasubramanyam et al., 2024
	Flux patients	Gestion des parcours	Analyse et optimisation des flux pour réduire les temps d'attente et les goulots d'étranglement.	Han et al., 2023
	Logistique	Gestion des stocks	Suivi et automatisation des approvisionnements en médicaments et matériels par IoT/RFID.	Han et al., 2023
	Maintenance	Maintenance prédictive	Anticipation des pannes des équipements lourds (IRM, scanners) grâce à l'analyse des données d'usage.	Han et al., 2023
	Urgences	Gestion pré-hospitalière	Intégration des données patients dès l'ambulance pour optimiser la prise en charge à l'arrivée.	Han et al., 2023
	Stratégie globale	Aide à la décision	Simulation de scénarios de crise ou de restructuration pour supporter la gouvernance hospitalière.	Sun et al., 2023 ; Han et al., 2023

TABLE 2.1 – Classification des applications du jumeau numérique en santé

L'analyse de ce 2.1 montre clairement qu'il existe deux niveaux d'utilisation du Jumeau Numérique en santé.

D'une part, les applications cliniques concernent le patient. Elles sont utilisées pour améliorer les soins médicaux, en aidant les médecins à mieux comprendre l'état du patient, à prévoir l'évolution des maladies et à tester les traitements avant leur application. Grâce à cela, les décisions médicales deviennent plus précises et mieux adaptées à chaque patient.

D'autre part, les applications organisationnelles concernent le fonctionnement de l'hôpital. Elles permettent d'améliorer la gestion des ressources, comme les lits, le personnel et les équipements, ainsi que l'organisation des flux de patients. L'objectif est de réduire les temps d'attente, d'éviter les problèmes d'organisation et d'améliorer la performance globale de l'hôpital.

Ainsi, le Jumeau Numérique peut être utilisé à deux niveaux complémentaires : un niveau médical centré sur le patient et un niveau organisationnel centré sur le système hospitalier.

Cependant, au regard des objectifs de ce travail de recherche, nous avons choisi de nous concentrer spécifiquement sur les applications du Jumeau Numérique dans la gestion hospitalière. La section suivante sera donc consacrée à l'analyse approfondie des travaux existants portant sur l'utilisation du Jumeau Numérique pour l'optimisation des opérations et de la performance

hospitalière.

2.4 Application du jumeau numérique à la gestion hospitalière

Dans la continuité de l'état de l'art présenté précédemment, cette section se concentre sur l'application du jumeau numérique dans le domaine de la gestion hospitalière. En effet, bien que cette technologie soit utilisée à la fois pour des applications cliniques et organisationnelles, ce travail s'intéresse principalement à son rôle dans l'optimisation des opérations hospitalières, notamment la gestion des ressources, des flux de patients ainsi que l'aide à la prise de décision stratégique.

Dans ce contexte, l'objectif est d'analyser de manière approfondie les travaux scientifiques existants portant sur l'utilisation du jumeau numérique en milieu hospitalier, afin d'identifier les problématiques traitées, les solutions proposées, les types de données exploitées, les résultats obtenus, ainsi que les limites et les contributions de ces travaux par rapport à notre recherche.

2.4.1 Méthodologie de recherche bibliographique

Afin de construire un état de l'art rigoureux et structuré, une méthodologie de recherche scientifique a été adoptée pour identifier, sélectionner et analyser les travaux les plus pertinents. La recherche bibliographique a été réalisée à partir de plusieurs bases de données académiques reconnues pour la qualité de leurs publications, notamment *IEEE Xplore*, *ScienceDirect*, *SpringerLink*, *Taylor & Francis*. Ces bases ont été choisies en raison de leur large couverture des domaines du jumeau numérique, de l'ingénierie, des systèmes de santé et de l'intelligence artificielle.

La stratégie de recherche repose sur l'utilisation de combinaisons de mots-clés ciblés permettant d'identifier les travaux liés à l'application du jumeau numérique en milieu hospitalier. Parmi les principales requêtes utilisées figurent :

- "Digital Twin" AND "Healthcare";
- "Digital Twin" AND "Hospital Management";
- "Digital Twin" AND "Patient Flow";
- "Digital Twin" AND "Hospital Simulation";
- "Digital Twin" AND "Resource Optimization".

Ces combinaisons ont permis de couvrir les dimensions technologiques, organisationnelles et opérationnelles du jumeau numérique en santé.

Afin d'assurer la pertinence des articles retenus, des critères de sélection ont été définis :

- **Critères d'inclusion** : Publications scientifiques récentes (entre 2019 et 2026), portant explicitement sur l'application du jumeau numérique dans un contexte hospitalier, disponibles en texte intégral et présentant une méthodologie claire.
- **Critères d'exclusion** : Articles hors du domaine médical, études purement théoriques sans application concrète, doublons, et travaux ne comportant pas de validation ou d'étude de cas.

Le processus de sélection s'est déroulé en plusieurs étapes, incluant la lecture des titres et des résumés, une analyse préliminaire de la méthodologie, puis une lecture complète des articles les plus pertinents. Ce processus a finalement permis de retenir un ensemble de **16 articles** jugés significatifs pour l'analyse.

2.4.2 Analyse des travaux sélectionnés

Les travaux sélectionnés ont ensuite été analysés selon plusieurs dimensions, notamment la problématique étudiée, l'approche proposée basée sur le jumeau numérique, les données utilisées, les résultats obtenus ainsi que les limites identifiées. Cette analyse permet de mieux comprendre les contributions existantes et de situer notre recherche dans ce domaine.

Le tableau 2.2 présente une synthèse structurée des principaux travaux retenus. Il met en évidence, pour chaque étude, la problématique abordée, la solution proposée basée sur le jumeau numérique, les résultats obtenus, ainsi que les limites.

Référence	Domaine d'application	Problématique traitée	Méthodologie proposée	Résultats principaux	Limites identifiées
Yang et al. (2025)	Sécurité et gouvernance des données	Vulnérabilité et manque d'intégrité dans la gestion des données médicales numériques.	Couplage du Jumeau Numérique avec la Blockchain pour assurer la traçabilité des échanges.	Sécurisation accrue des échanges et meilleure gouvernance globale des données de santé.	Approche théorique ; validation clinique absente ; coûts techniques élevés.
Zheng et al. (2025)	Gestion macroscopique des urgences	Manque de réactivité et de résilience face aux crises sanitaires (ex. post-COVID).	Jumeau Numérique multi-niveaux (patient, hôpital, système public, cloud).	Définition des architectures requises (IA, Cloud, Edge computing) pour une gestion globale.	Complexité organisationnelle élevée ; faible nombre d'applications validées empiriquement.
Hasan et al. (2025)	Efficacité hospitalière globale	Inefficacité des systèmes de santé et besoin d'adaptation numérique stratégique.	Modèle conceptuel couplé à une validation empirique des applications clés du Jumeau Numérique.	Identification des usages majeurs : diagnostic prédictif, suivi temps réel et médecine personnalisée.	Résultats fondés sur des questionnaires ; absence d'implémentation opérationnelle réelle.

Référence	Domaine d'application	Problématique traitée	Méthodologie proposée	Résultats principaux	Limites identifiées
Pellegrino et al. (2024)	Bloc opératoire et soins critiques	Gestion sous-optimale du bloc opératoire et des salles de réveil.	Prototype local de Jumeau Numérique pour le suivi des parcours patients et la planification.	Amélioration du suivi temps réel et génération de rapports statistiques automatisés.	Déploiement limité à un seul établissement ; généralisation restreinte.
Repetto et al. (2025)	Inter-opérabilité inter-hospitalière	Difficultés de partage de données inter-hôpitaux (sécurité, confidentialité, conformité).	Jumeau Numérique prédictif combiné à la Blockchain et à l'apprentissage fédéré (<i>Federated Learning</i>).	Collaboration inter-hospitalière sécurisée sans partage direct de données brutes.	Complexité technique très élevée ; absence de déploiement à grande échelle.
Olawade et al. (2025)	Médecine d'urgence et triage	Gestion complexe des urgences nécessitant des décisions rapides et une allocation fluide.	Revue systématique des applications du Jumeau Numérique en médecine d'urgence.	Amélioration anticipée de la prise de décision et de la gestion des flux de patients.	Revue narrative ; absence d'études prospectives en environnement critique réel.
Mcheick et al. (2025)	Prédiction clinique et intelligence artificielle	Limites des modèles d'IA isolés pour la prédiction et la surveillance continue.	Comparaison entre une IA standard et un Jumeau Numérique dynamique enrichi par l'IA.	Précision prédictive supérieure du Jumeau Numérique (92,09 %) vs. IA seule (78,71 %).	Étude centrée sur une seule pathologie (BPCO) ; non généralisable aux flux hospitaliers.
Gitto et al. (2025)	Gestion stratégique et résilience	Fragmentation des services, mauvaise allocation capacitaire et congestion chronique.	Modélisation des flux de patients et de la capacité de résilience via le Jumeau Numérique.	Optimisation stratégique par modélisation prévisionnelle assurant une meilleure résilience.	Validation restreinte à un contexte géographique spécifique (ASL Toscane, Italie).

Référence	Domaine d'application	Problématique traitée	Méthodologie proposée	Résultats principaux	Limites identifiées
Kuruppu et al. (2025)	Workflows de soins critiques	Écart entre les procédures cliniques théoriques et les pratiques réelles en soins critiques.	Framework à double couche exploitant une simulation à événements discrets (DES) sur Microsoft Azure.	Suivi de 72 % des activités en temps réel ; gain de productivité infirmier mesuré (5 h/j).	Difficultés de collecte continue ; contraintes physiques liées à la technologie IoT (Bluetooth).
Han et al. (2023)	Hôpital intelligent — gestion globale	Fragmentation des systèmes d'information entraînant une faible coordination et des décisions lentes.	Jumeau Numérique global en trois niveaux : acquisition (IoT/RFID), modélisation (BIM 3D) et services (IA).	Détection d'anomalies en moins d'une seconde ; délai d'intervention inférieur à 8 minutes.	Système au stade de preuve de concept ; intégration des sous-jumeaux incomplète.
Karakra et al. (2019)	Parcours patients — urgences	Gestion purement réactive face aux imprévus hospitaliers (pics d'urgence, pénuries, retards).	Framework « HospiT'Win » fondé sur la simulation prédictive et les scénarios <i>what-if</i> .	Transition validée vers une gestion proactive avec détection anticipée des situations critiques.	Validation limitée à l'architecture conceptuelle ; absence de déploiement opérationnel.
Hu et al. (2021)	Ordonnancement des ressources d'urgence	Ordonnancement complexe des ressources dans un environnement à forte incertitude opérationnelle.	Système de surveillance temps réel couplé à une optimisation multi-objectifs (algorithme de colonies de fourmis).	Accélération de la prise de décision et allocation précise grâce à l'interaction continue réel/virtuel.	Implémentation complexe ; exigences élevées en traitement réseau et technologie IoT.

Référence	Domaine d'application	Problématique traitée	Méthodologie proposée	Résultats principaux	Limites identifiées
Balasu- bramanyam et al. (2024)	Aide à la décision médicale	Manque d'outils numériques intelligents pour soutenir la décision et optimiser l'efficacité opérationnelle.	Répliques virtuelles intégrant simulation, prédiction et optimisation en temps réel.	Avancées documentées en médecine personnalisée, diagnostics prédictifs et monitoring continu.	Enjeux persistants liés à la qualité des données, aux coûts et à l'interopérabilité des systèmes.
Roopa & Venugopal (2025)	Architectures cyber- physiques de santé	Difficulté d'intégration des Jumeaux Numériques dans les systèmes cyber-physiques de santé (CPHS).	Architecture de référence en trois couches : physique, middleware de sécurité et interface analytique.	Cadre normatif complet avec exigences techniques strictes (Edge/Cloud, normes FHIR).	Approche conceptuelle ; défis de sécurité et d'interopéra- bilité non résolus en déploiement réel.
Rahim et al. (2024)	Plateformes cliniques intégrées	Absence de plateforme unifiée connectant patients, équipements et ressources de bout en bout.	Plateforme dynamique (SysML) intégrant lits connectés, équipements IoT et services d'IA (LSTM).	Synchronisation des flux en environ 110 ms ; prédiction précoce des anomalies cardiaques.	Dépendance critique à la fiabilité de l'infrastructure réseau et à la qualité de la donnée brute.
Lee et al. (2024)	Modélisation spatiale et bâtiment hospitalier	Difficulté à modéliser les contraintes des bâtiments hospitaliers (ex. risque de transmission virale).	Framework basé sur OGC IndoorGML avec modélisation topologique et dynamique des fluides (CFD).	Cartographie précise de la propagation virale et identification proactive des zones à risque.	Coût computationnel très élevé (CFD) ; dépendance à la disponibilité des données spatiales.

TABLE 2.2 – Synthèse comparative des travaux sur le jumeau numérique en gestion hospitalière

L'analyse des travaux scientifiques présentés dans le tableau 2.2 précédent montre que le

jumeau numérique en milieu hospitalier ne constitue plus uniquement un concept théorique, mais tend progressivement à devenir un outil opérationnel pour améliorer la performance des systèmes de santé. Toutefois, une analyse critique permet de nuancer ces résultats en fonction du niveau de maturité technologique et des conditions réelles de déploiement.

Afin de structurer cette analyse, les travaux ont été regroupés selon plusieurs axes principaux.

Optimisation des opérations et de la gestion des flux hospitaliers

L'optimisation des flux constitue l'une des premières applications du jumeau numérique en santé. Les travaux de Karakra et al. (2019), à travers le système HospiT'Win, ainsi que ceux de Pellegrino et al. (2024), montrent que l'intégration de l'Internet des objets (RFID, WSN) avec la simulation à événements discrets permet de passer d'une gestion réactive à une gestion anticipative.

Ces approches contribuent à réduire les congestions et à améliorer la planification des ressources. Cependant, elles présentent une limite importante connue sous le nom « d'effet silo ». En effet, la majorité des modèles sont développés à l'échelle d'un service spécifique, ce qui rend difficile leur extension à l'ensemble de l'hôpital, où les interactions entre services complexifient fortement la gestion des données.

Gestion des urgences et résilience hospitalière

La gestion des situations de crise, notamment après la pandémie de COVID-19, constitue un axe majeur de recherche. Les travaux de Zheng et al. (2025) et Olawade et al. (2025) utilisent le jumeau numérique pour simuler des scénarios critiques impliquant un grand nombre de patients. Par ailleurs, Hu et al. (2021) proposent des approches d'optimisation permettant une meilleure allocation des ressources en temps réel.

Néanmoins, l'efficacité de ces systèmes dépend fortement de la disponibilité et de la mise à jour des données. En situation d'urgence, la collecte de données en temps réel devient difficile, ce qui peut limiter la fiabilité des décisions générées par le jumeau numérique.

Architectures et interopérabilité des systèmes

L'architecture technique des jumeaux numériques hospitaliers est étudiée notamment par Han et al. (2023) et Roopa & Venugopal (2025), qui proposent des modèles en plusieurs couches intégrant la collecte, le traitement et l'exploitation des données. L'intégration du BIM constitue une avancée importante, permettant de relier les dimensions physiques et organisationnelles de l'hôpital.

Cependant, le principal défi reste l'interopérabilité. Les systèmes d'information hospitaliers sont souvent hétérogènes et peu compatibles entre eux. L'absence de standards communs, tels que FHIR ou des protocoles IoT ouverts, limite l'intégration globale et freine le déploiement à grande échelle des jumeaux numériques.

Sécurité et gouvernance des données de santé

La gestion sécurisée des données médicales représente un enjeu critique. Les travaux de Yang et al. (2025) et Repetto et al. (2025) proposent l'utilisation de la blockchain afin d'assurer la traçabilité et la sécurité des échanges. L'intégration de l'apprentissage fédéré permet également de favoriser la collaboration entre établissements sans partager directement les données sensibles.

Toutefois, ces solutions augmentent considérablement la complexité technique et les besoins en ressources informatiques. Il est donc nécessaire de trouver un compromis entre sécurité, performance et rapidité de traitement.

Apport de l'intelligence artificielle

L'intelligence artificielle constitue un élément central du jumeau numérique. Les travaux de Mcheick et al. (2025) montrent qu'un jumeau numérique enrichi par l'IA peut atteindre une précision prédictive supérieure à celle des modèles classiques. De plus, l'utilisation de réseaux de neurones, notamment les modèles LSTM (Rahim et al., 2024), permet d'anticiper efficacement les risques médicaux.

Cependant, un défi majeur réside dans l'interprétabilité des résultats. Les décideurs doivent comprendre les mécanismes de décision de l'IA afin de pouvoir faire confiance aux recommandations proposées, en particulier dans un contexte médical.

Modélisation spatiale et gestion des risques

Enfin, la dimension spatiale est abordée par Lee et al. (2024), qui utilisent le jumeau numérique pour analyser la propagation des agents pathogènes au sein des infrastructures hospitalières. Cette approche permet d'identifier les zones à risque et d'améliorer la gestion des flux d'air et de ventilation.

Malgré son intérêt, cette approche nécessite une puissance de calcul importante et dépend fortement de la disponibilité de données précises sur la structure des bâtiments.

2.5 Positionnement de la recherche et formulation de la problématique

L'analyse de la littérature présentée dans ce chapitre met en évidence que le jumeau numérique constitue une approche innovante et prometteuse pour améliorer la performance des systèmes hospitaliers. Les travaux existants montrent son rôle dans l'optimisation de la gestion des ressources, l'amélioration des flux de patients ainsi que le soutien à la prise de décision, grâce à l'intégration de technologies avancées telles que l'intelligence artificielle, l'Internet des objets et les systèmes d'information (Belmallem et Ferhati, 2025) ; (Sieve et al., 2025).

Cependant, malgré ces avancées, plusieurs limites importantes subsistent. D'une part, la majorité des études se concentre sur des applications locales, souvent limitées à un seul service ou à un seul établissement hospitalier (Pellegrino et al., 2024) ; (Karakra et al., 2019). Cette approche ne permet pas de représenter la complexité globale des systèmes de santé, caractérisés par l'interconnexion et l'interdépendance de plusieurs structures. Ainsi, la dimension réseau des systèmes hospitaliers reste insuffisamment prise en compte, alors qu'elle est essentielle pour assurer une gestion coordonnée et efficace des flux de patients.

D'autre part, les solutions proposées sont généralement développées dans des environnements disposant d'infrastructures numériques avancées. Cela limite leur application dans des contextes réels marqués par des contraintes organisationnelles, des ressources limitées et une hétérogénéité des systèmes d'information (Hasan et al., 2025) ; (Roopa et Venugopal, 2025).

Par ailleurs, la coordination inter-hospitalière demeure encore peu explorée dans la littérature. Des aspects importants tels que l'orientation dynamique des patients, le partage d'informations en temps réel entre établissements, ainsi que l'équilibrage de la charge hospitalière à l'échelle globale sont rarement traités de manière intégrée (Zheng et al., 2025) ; (Han et al., 2023).

En outre, plusieurs défis techniques persistent, notamment en matière d'interopérabilité des systèmes, de sécurité des données et de complexité des architectures (Yang et al., 2025) ; (Repetto et al., 2025). Bien que certaines solutions, comme la blockchain ou l'apprentissage fédéré, aient été proposées, leur mise en œuvre reste complexe et encore limitée à des cas expérimentaux.

Dans ce contexte, ce travail de recherche se positionne comme une contribution visant à combler ces lacunes. Il propose le développement d'un modèle de jumeau numérique orienté vers la coordination et l'optimisation des flux de patients à l'échelle d'un réseau hospitalier. L'objectif est de concevoir un système capable d'intégrer des données en temps réel provenant de plusieurs établissements, de simuler différents scénarios de gestion et de fournir une aide à la décision pour une meilleure orientation des patients et une allocation optimale des ressources.

Ainsi, la problématique principale de cette recherche peut être formulée comme suit :

Comment concevoir et exploiter un modèle de jumeau numérique permettant d'optimiser la coordination et l'ordonnancement des flux de patients entre plusieurs établissements hospitaliers, dans un contexte caractérisé par des contraintes organisationnelles, technologiques et opérationnelles ?

Afin de répondre à cette problématique, ce travail s'articule autour de plusieurs objectifs spécifiques, notamment :

- la définition d'un modèle conceptuel adapté ;
- l'identification et la structuration des données nécessaires ;
- la conception des règles de décision pour l'orientation des patients ;
- la mise en œuvre d'un outil de simulation pour évaluer les performances du système proposé.

2.6 Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter une revue de littérature sur l'application du jumeau numérique dans le domaine de la gestion hospitalière. Il en ressort que cette technologie constitue un outil prometteur pour améliorer la performance des systèmes de santé, notamment en matière d'optimisation des ressources, de gestion des flux de patients et d'aide à la prise de décision.

L'analyse a également montré que les applications du jumeau numérique se répartissent entre des usages cliniques et organisationnels, ces derniers étant au cœur de ce travail. Toutefois, malgré les avancées observées, plusieurs limites persistent, notamment la focalisation sur des applications locales, le manque de coordination inter-hospitalière, ainsi que des défis liés à l'interopérabilité, à la sécurité des données et à la complexité des systèmes.

Ainsi, cette revue met en évidence la nécessité de développer des approches plus globales et intégrées, capables de prendre en compte la dimension réseau des systèmes hospitaliers. Dans cette perspective, le chapitre suivant proposera un modèle conceptuel de jumeau numérique adapté à la gestion hospitalière.

Chapitre 3

Présentation du cas d'étude, modélisation mathématique et résolution exacte

3.1 Introduction

Le présent chapitre constitue une étape centrale de ce travail, car il permet de passer du cadre théorique du jumeau numérique et de la revue de la littérature vers l'étude concrète d'un système hospitalier réel. Après avoir présenté les concepts généraux liés aux jumeaux numériques, à l'Industrie 4.0 et à leurs applications dans la gestion hospitalière, ce chapitre s'intéresse au cas du réseau hospitalier de la wilaya de Tlemcen, en particulier à la problématique d'orientation et de transfert des patients entre les différents établissements de santé.

Le système étudié est caractérisé par l'existence de plusieurs structures hospitalières, telles que le CHU de Tlemcen, les Établissements Publics Hospitaliers et l'EHS Mère-Enfant. Ces structures disposent de capacités différentes en matière de lits, de services médicaux, de ressources humaines, d'équipements techniques et de moyens de transport sanitaire. Cette hétérogénéité rend la décision d'orientation des patients plus complexe, surtout lorsque certains services ou certaines ressources sont indisponibles dans l'hôpital d'origine. Les données utilisées dans cette partie concernent notamment les établissements du réseau, les capacités hospitalières, les services disponibles, les temps de transfert, les besoins médicaux des patients et les ressources nécessaires à leur prise en charge.

Dans ce contexte, une première approche de modélisation mathématique est proposée. Elle repose sur un modèle mono-objectif visant à minimiser le temps total de prise en charge des patients. Ce temps inclut le temps de préparation, le temps de transfert, les temps d'attente dans les services, les durées de traitement, l'attente liée aux lits, l'attente liée aux ambulances, ainsi qu'une pénalité en cas de dépassement du temps maximal souhaité pour les patients critiques. Le modèle prend également en compte plusieurs contraintes opérationnelles, notamment la disponibilité des services, l'affectation des patients à un hôpital final, la capacité parallèle des services, l'occupation dynamique des lits et la non-simultanéité d'utilisation des ambulances.

Ce chapitre présente donc, dans un premier temps, le contexte d'étude relatif au système de santé algérien et au réseau hospitalier de Tlemcen. Ensuite, il détaille la formulation mathématique du problème sous une approche mono-objectif, en précisant les hypothèses, les ensembles, les paramètres, les variables de décision, la fonction objectif et les contraintes. Par la suite, il décrit la collecte et la préparation des données nécessaires à la résolution du modèle. Enfin, les résultats obtenus à l'aide du solveur IBM ILOG CPLEX sont analysés à travers plusieurs

scénarios, afin d'évaluer les performances du modèle et de mettre en évidence les limites d'une approche statique face à la complexité et à l'incertitude du fonctionnement réel d'un système hospitalier.

Cette analyse permettra de justifier le passage, dans le chapitre suivant, vers une approche plus dynamique basée sur la simulation, mieux adaptée à la représentation des flux de patients, des files d'attente, de la disponibilité variable des ressources et des perturbations pouvant apparaître dans un environnement hospitalier réel.

3.2 Contexte d'étude : le système de santé algérien et le réseau de Tlemcen

3.2.1 Organisation générale de l'offre de soins en Algérie

Le système de santé algérien repose principalement sur un secteur public qui occupe une place centrale dans l'offre de soins. Il est complété par un secteur privé en développement, notamment dans certaines spécialités médicales, les cabinets médicaux, les cliniques privées et les officines pharmaceutiques. Historiquement, l'organisation du système de santé en Algérie s'est construite autour du principe d'accès aux soins pour la population, avec une forte implication de l'État dans le financement, la planification et la gestion des infrastructures sanitaires (Brahamia, 2022).

L'offre de soins est organisée selon une logique hiérarchisée. Le premier niveau est constitué par les structures de proximité, telles que les Établissements Publics de Santé de Proximité, les polycliniques et les salles de soins. Ces structures assurent les consultations générales, les soins courants, la prévention, le suivi des patients et l'orientation vers des établissements plus spécialisés lorsque l'état de santé du patient nécessite une prise en charge plus avancée. Elles jouent donc un rôle important dans le filtrage initial des patients et dans la réduction de la pression sur les hôpitaux généraux et universitaires (Brahamia, 2022).

Le deuxième niveau correspond aux Établissements Publics Hospitaliers. Ces établissements assurent une prise en charge médicale et chirurgicale générale pour une population située dans une zone géographique déterminée. Ils regroupent généralement plusieurs services de base, tels que la médecine interne, la chirurgie générale, la pédiatrie, la gynécologie-obstétrique et les urgences médico-chirurgicales. Ils disposent également de services techniques comme le laboratoire, la radiologie, le bloc opératoire et la pharmacie hospitalière. Les EPH jouent ainsi un rôle intermédiaire entre les structures de proximité et les centres hospitaliers spécialisés ou universitaires (Alsamara et al., 2022).

Le troisième niveau est représenté par les Centres Hospitalo-Universitaires et les Établissements Hospitaliers Spécialisés. Les CHU assurent des missions de soins spécialisés, de formation universitaire et de recherche médicale. Ils reçoivent généralement les cas complexes ou les patients transférés depuis d'autres établissements lorsque les ressources nécessaires ne sont pas disponibles localement. Les établissements spécialisés, quant à eux, sont orientés vers des domaines médicaux précis, comme la mère et l'enfant, la psychiatrie, la rééducation ou d'autres spécialités selon les besoins du territoire (Alsamara et al., 2022).

Malgré cette organisation hiérarchisée, le système hospitalier peut être confronté à plusieurs contraintes opérationnelles. Parmi ces contraintes, on trouve la saturation de certains services, l'inégale répartition des ressources, la disponibilité limitée de certains équipements médicaux, ainsi que les difficultés de coordination entre les établissements. Ces problèmes peuvent influencer directement la qualité de la prise en charge, le temps d'attente des patients et la performance globale du système hospitalier. L'amélioration de l'utilisation des ressources et de l'efficacité des établissements hospitaliers constitue donc un enjeu important pour le système de santé algérien.

(Ouali et al., 2025).

Dans le cadre de ce travail, ces éléments justifient le recours à une approche de modélisation mathématique permettant d'appuyer la décision d'orientation des patients. L'objectif est de déterminer si un patient doit rester dans son hôpital d'origine ou être transféré vers un autre établissement capable de répondre à ses besoins médicaux, tout en réduisant le temps total de prise en charge et en tenant compte des ressources disponibles.

3.2.2 Cartographie du réseau hospitalier de la wilaya de Tlemcen

La wilaya de Tlemcen dispose d'un réseau hospitalier composé de plusieurs structures publiques complémentaires. Ce réseau comprend un Centre Hospitalo-Universitaire, plusieurs Établissements Publics Hospitaliers et un Établissement Hospitalier Spécialisé Mère-Enfant. Dans ce travail, le réseau étudié est représenté par sept établissements principaux : le CHU Tidjani Damerdji de Tlemcen, l'EPH de Maghnia, l'EPH de Ghazaouet, l'EPH de Sebdou, l'EPH de Remchi, l'EPH de Nedroma et l'EHS Mère-Enfant de Tlemcen (DSP Tlemcen, s.d.).

Le CHU Tidjani Damerdji de Tlemcen constitue l'établissement de référence du réseau. Il dispose de la capacité la plus importante et regroupe plusieurs spécialités médicales et chirurgicales. Il assure également la prise en charge des cas complexes et reçoit des patients transférés depuis d'autres structures de la wilaya lorsque les services ou les ressources nécessaires ne sont pas disponibles dans l'établissement d'origine. Cette position centrale fait du CHU un nœud important dans l'organisation des flux de patients à l'échelle de la wilaya.

Les Établissements Publics Hospitaliers de Maghnia, Ghazaouet, Sebdou, Remchi et Nedroma assurent une couverture sanitaire locale. Ils permettent de rapprocher les soins des populations situées en dehors du chef-lieu de la wilaya. Ces hôpitaux disposent de capacités différentes et ne possèdent pas toujours les mêmes services ou les mêmes équipements. Par conséquent, certains patients peuvent être pris en charge directement dans leur hôpital d'origine, tandis que d'autres doivent être transférés vers un établissement plus adapté à leur état de santé.

L'EHS Mère-Enfant de Tlemcen complète ce réseau en assurant une prise en charge spécialisée orientée vers la mère et l'enfant. Cet établissement joue un rôle spécifique dans les soins liés à la maternité, à la gynécologie, à la pédiatrie et aux besoins particuliers des nouveau-nés et des enfants. Il est donc intégré au réseau étudié comme un hôpital spécialisé pouvant recevoir certains types de patients selon les services requis.

Le tableau 3.1 présente les principaux établissements hospitaliers retenus dans cette étude ainsi que leurs capacités en lits. Ces valeurs sont utilisées comme données de base pour construire le modèle d'optimisation.

Code	Établissement hospitalier	Type
H1	CHU Tidjani Damerdji Tlemcen	Centre hospitalo-universitaire
H2	EPH Maghnia	Hôpital général
H3	EPH Ghazaouet	Hôpital général
H4	EPH Sebdou	Hôpital général
H5	EPH Remchi	Hôpital général
H6	EPH Nedroma	Hôpital général
H7	EHS Mère-Enfant Tlemcen	Établissement spécialisé

TABLE 3.1 – Principaux établissements hospitaliers considérés dans le réseau de Tlemcen

Cette cartographie montre que le réseau hospitalier de Tlemcen est hétérogène. Certains établissements disposent d’une capacité importante et d’un nombre élevé de services, tandis que d’autres assurent principalement une prise en charge de proximité avec des ressources plus limitées. Cette différence de capacité et de disponibilité des services rend la décision d’orientation plus complexe, notamment lorsque plusieurs patients arrivent simultanément ou lorsqu’un service demandé n’est pas disponible dans l’hôpital d’origine.

Dans le modèle mathématique proposé dans ce chapitre, chaque établissement est représenté par un hôpital appartenant à l’ensemble des hôpitaux. Chaque patient possède un hôpital d’origine, un ensemble de services médicaux requis, un besoin éventuel en lit et une possibilité de transfert vers un autre hôpital. Le modèle doit donc choisir l’hôpital final le plus adapté pour chaque patient, en tenant compte de la disponibilité des services, de la capacité des lits, du temps de transfert, de la disponibilité des ambulances et du temps total de prise en charge.

3.3 Modélisation mathématique du système : approche mono-objectif

La formulation mathématique proposée s’inscrit dans la continuité des travaux portant sur l’ordonnancement des ressources hospitalières et l’aide à la décision dans les systèmes d’urgence. Certains travaux, comme celui de Hu et al. (2021), montrent l’intérêt d’utiliser des approches basées sur le jumeau numérique pour organiser les ressources hospitalières, améliorer la planification des urgences et soutenir les décisions d’affectation. Dans ce mémoire, cette idée est adaptée au cas du réseau hospitalier de Tlemcen à travers un modèle mathématique mono-objectif visant à minimiser le temps total de prise en charge des patients.

3.3.1 Hypothèses de modélisation

Dans cette étude, le système hospitalier est représenté sous forme d’un réseau composé de plusieurs hôpitaux reliés entre eux par des possibilités de transfert. Chaque patient arrive initialement dans un hôpital d’origine et peut soit être pris en charge sur place, soit être transféré vers un autre hôpital lorsque son hôpital initial ne dispose pas des services ou des ressources

nécessaires. Le modèle mathématique proposé repose sur une approche mono-objectif dont le but principal est de minimiser le temps total de prise en charge des patients.

Afin de simplifier la représentation du système réel et de rendre le problème résoluble par optimisation exacte, certaines hypothèses de modélisation sont retenues. Ces hypothèses permettent de transformer le fonctionnement hospitalier réel en un modèle mathématique structuré.

- 1- L'ensemble des patients à traiter est supposé connu au début de l'horizon de planification. Pour chaque patient, l'hôpital d'origine, le temps d'arrivée initial, les services médicaux nécessaires, le besoin éventuel d'un lit et le niveau de criticité sont connus. Cette hypothèse permet de construire un problème statique, où les décisions sont prises à partir d'un ensemble de données déjà disponibles.
- 2- Chaque patient possède un parcours de soins composé d'un ou de plusieurs services médicaux. L'ordre de passage dans ces services est supposé connu à l'avance selon l'état du patient et les besoins médicaux associés. Un patient ne peut commencer un service que lorsqu'il est arrivé à ce service et lorsque la ressource nécessaire est disponible.
- 3- Chaque hôpital possède une disponibilité spécifique des services médicaux. Ainsi, un patient ne peut être affecté à un hôpital final que si tous les services dont il a besoin sont disponibles dans cet hôpital. Cette hypothèse permet d'éviter l'orientation d'un patient vers une structure incapable de répondre à ses besoins médicaux.
- 4- Un patient peut effectuer au maximum un seul transfert entre son hôpital d'origine et un autre hôpital du réseau. Le transfert est autorisé uniquement depuis l'hôpital d'origine vers un hôpital différent. Cette hypothèse simplifie la circulation des patients dans le réseau et évite les transferts successifs entre plusieurs établissements.
- 5- Les temps utilisés dans le modèle sont considérés comme déterministes. Il s'agit notamment du temps de préparation du patient, du temps de transfert entre hôpitaux, de la durée de chaque service médical et de la durée d'occupation d'un lit. Ces valeurs sont utilisées comme paramètres d'entrée du modèle d'optimisation.
- 6- Les services médicaux peuvent disposer de plusieurs postes parallèles dans un même hôpital. Cela signifie que plusieurs patients peuvent être pris en charge simultanément par le même service si la capacité parallèle du service le permet. En revanche, deux patients ne peuvent pas utiliser le même poste de service au même moment.
- 7- L'occupation des lits est modélisée de manière dynamique. Lorsqu'un patient a besoin d'un lit, il ne peut l'occuper qu'après la fin de son dernier service médical. Un même lit ne peut pas être occupé simultanément par deux patients. Le modèle calcule donc le début d'occupation, la fin d'occupation et le temps d'attente avant l'obtention du lit.
- 8- Les ambulances sont considérées comme des ressources limitées. Lorsqu'un patient est transféré, il doit utiliser une ambulance disponible dans son hôpital d'origine. Une ambulance ne peut pas assurer deux transferts au même moment. Le modèle prend donc en compte l'attente éventuelle avant l'obtention d'une ambulance.
- 9- Les patients critiques sont pris en compte à travers une priorité opérationnelle et un seuil maximal souhaité de temps d'attente. Lorsque deux patients utilisent le même poste de service, le patient critique peut être priorisé par rapport au patient non critique. De plus, le dépassement du seuil W_{max} n'est pas traité comme une contrainte stricte, mais comme une pénalité ajoutée à la fonction objectif.

3.3.2 Ensembles et indices

Dans cette section, les ensembles et indices utilisés dans le modèle mathématique sont définis. Ces notations permettent de représenter les différents éléments du système hospitalier étudié,

notamment les patients, les hôpitaux, les services médicaux, les postes parallèles de prise en charge, les lits et les ambulances.

Le modèle considère un ensemble de patients à orienter dans un réseau hospitalier composé de plusieurs établissements. Chaque patient peut avoir besoin d'un ou plusieurs services médicaux, peut nécessiter un lit d'hospitalisation et peut éventuellement être transféré vers un autre hôpital à l'aide d'une ambulance. Les ensembles utilisés sont présentés dans le tableau 3.2.

Ensemble / indice	Description
P	Ensemble des patients à prendre en charge. Un patient est noté $p \in P$.
H	Ensemble des hôpitaux du réseau hospitalier étudié. Un hôpital est noté $h \in H$.
S	Ensemble des services médicaux disponibles dans le réseau hospitalier. Un service est noté $s \in S$.
K_{hs}	Ensemble des postes parallèles du service s dans l'hôpital h . Un poste est noté $k \in K_{hs}$.
L_h	Ensemble des lits disponibles dans l'hôpital h . Un lit est noté $l \in L_h$.
A_h	Ensemble des ambulances disponibles dans l'hôpital h . Une ambulance est notée $a \in A_h$.

TABLE 3.2 – Ensembles et indices du modèle mathématique

L'indice p permet d'identifier chaque patient dans le système. L'indice h représente l'hôpital dans lequel le patient peut être pris en charge ou vers lequel il peut être transféré. L'indice s désigne les services médicaux nécessaires au parcours de soins du patient, tels que la réanimation, la chirurgie, la radiologie, le scanner, le laboratoire ou d'autres spécialités médicales.

Les indices k , l et a sont utilisés pour représenter respectivement les postes parallèles des services, les lits hospitaliers et les ambulances. Ces ensembles sont importants, car ils permettent de modéliser la disponibilité limitée des ressources. Ainsi, deux patients ne peuvent pas utiliser simultanément le même poste de service, le même lit ou la même ambulance.

3.3.3 Paramètres du modèle

Les paramètres du modèle représentent les données d'entrée nécessaires à la formulation mathématique du problème. Ils décrivent les caractéristiques des patients, les ressources disponibles dans chaque hôpital, les services requis, les temps de traitement, les temps de transfert ainsi que les paramètres liés à la priorité des patients critiques.

Dans ce modèle, les paramètres sont supposés connus avant la résolution. Ils permettent au solveur de déterminer l'hôpital final de chaque patient, son éventuel transfert, son passage dans les services médicaux, son affectation à un lit et l'utilisation éventuelle d'une ambulance.

Paramètre	Description
$origin_p$	Hôpital d'origine du patient p . Il représente l'hôpital dans lequel le patient arrive initialement.
$t0_p$	Temps d'arrivée initial du patient p dans son hôpital d'origine.
$Tprep_{ph}$	Temps de préparation du patient p dans l'hôpital h avant son éventuelle prise en charge ou son transfert.
$Ttr_{phh'}$	Temps de transfert du patient p depuis l'hôpital h vers l'hôpital h' .
d_{ps}	Durée du service médical s pour le patient p .
$Tlit_p$	Durée d'occupation d'un lit par le patient p .

TABLE 3.3 – Paramètres liés aux patients et aux temps

Paramètre	Description
R_{hs}	Paramètre binaire qui vaut 1 si le service s est disponible dans l'hôpital h , et 0 sinon.
B_{ps}	Paramètre binaire qui vaut 1 si le patient p a besoin du service s , et 0 sinon.
$NeedBed_p$	Paramètre binaire qui vaut 1 si le patient p a besoin d'un lit d'hospitalisation, et 0 sinon.
L_h	Nombre de lits disponibles dans l'hôpital h .
Amb_h	Nombre d'ambulances disponibles dans l'hôpital h .
$CapServ_{hs}$	Capacité parallèle du service s dans l'hôpital h . Elle représente le nombre de postes pouvant prendre en charge des patients simultanément dans ce service.
Ord_{ps}	Ordre de passage du patient p dans le service s . Si $Ord_{ps} = 0$, cela signifie que le patient p n'a pas besoin du service s .

TABLE 3.4 – Paramètres liés aux besoins médicaux et aux ressources hospitalières

Paramètre	Description
$Crit_p$	Paramètre binaire qui vaut 1 si le patient p est critique, et 0 sinon.
$Wmax_p$	Temps maximal souhaité pour le patient critique p . Le dépassement de ce seuil est pénalisé dans la fonction objectif.
μ	Poids de pénalité associé au dépassement du seuil $Wmax_p$ pour les patients critiques.
M	Grande constante utilisée dans les contraintes de type Big-M pour activer ou désactiver certaines relations logiques du modèle.

TABLE 3.5 – Paramètres liés à la criticité et à la formulation mathématique

Ces paramètres permettent de décrire le fonctionnement du système hospitalier étudié. Les paramètres R_{hs} et B_{ps} assurent la cohérence entre les besoins médicaux du patient et les services disponibles dans l'hôpital choisi. Les paramètres L_h , Amb_h et $CapServ_{hs}$ permettent de représenter les ressources limitées du système. Enfin, les paramètres $Crit_p$, $Wmax_p$ et μ permettent d'intégrer la priorité des patients critiques dans le modèle.

3.3.4 Variables de décision

Les variables de décision représentent les choix effectués par le modèle d'optimisation. Elles permettent de déterminer l'hôpital final de chaque patient, l'existence ou non d'un transfert, les temps de passage dans les services, l'utilisation des postes parallèles, l'occupation des lits, l'utilisation des ambulances ainsi que le dépassement éventuel du temps maximal souhaité pour les patients critiques.

Dans ce modèle, certaines variables sont binaires, car elles représentent des décisions de type oui/non. D'autres variables sont continues et positives, car elles représentent des temps d'arrivée, de début, de fin, d'attente ou de sortie.

Variable	Description
Y_{ph}	Variable binaire qui vaut 1 si le patient p arrive initialement à l'hôpital h , et 0 sinon.
$X_{phh'}$	Variable binaire qui vaut 1 si le patient p est transféré de l'hôpital h vers l'hôpital h' , et 0 sinon.
U_{ph}	Variable binaire qui vaut 1 si l'hôpital final du patient p est l'hôpital h , et 0 sinon.

TABLE 3.6 – Variables d'affectation et de transfert

Les variables Y_{ph} , $X_{phh'}$ et U_{ph} permettent de représenter la décision d'orientation du patient dans le réseau hospitalier. La variable Y_{ph} fixe l'hôpital d'origine du patient, la variable $X_{phh'}$ indique si un transfert est effectué, tandis que la variable U_{ph} indique l'hôpital dans lequel le patient sera finalement pris en charge.

Variable	Description
Arr_{phs}	Temps d'arrivée du patient p au service s dans l'hôpital h .
Deb_{phs}	Temps de début du service s pour le patient p dans l'hôpital h .
Fin_{phs}	Temps de fin du service s pour le patient p dans l'hôpital h .
W_{phs}	Temps d'attente du patient p avant le début du service s dans l'hôpital h .
Dis_p	Temps final de sortie du patient p du système hospitalier.

TABLE 3.7 – Variables temporelles liées aux services médicaux

Ces variables permettent de suivre l'évolution temporelle du patient dans son parcours de soins. Le patient arrive d'abord au service requis, attend si la ressource n'est pas immédiatement disponible, commence son service, puis termine ce service avant de passer éventuellement au service suivant.

Variable	Description
V_{phsk}	Variable binaire qui vaut 1 si le patient p utilise le poste parallèle k du service s dans l'hôpital h , et 0 sinon.
Z_{pqhsk}	Variable binaire qui vaut 1 si le patient p passe avant le patient q sur le même poste k du service s dans l'hôpital h , et 0 sinon.

TABLE 3.8 – Variables liées aux postes parallèles des services

Les variables V_{phsk} et Z_{pqhsk} permettent de gérer la capacité parallèle des services. Lorsqu'un service possède plusieurs postes, plusieurs patients peuvent être traités simultanément. Cependant, deux patients affectés au même poste ne peuvent pas être pris en charge au même moment. La variable Z_{pqhsk} sert donc à déterminer l'ordre de passage entre deux patients utilisant le même poste.

Variable	Description
VL_{phl}	Variable binaire qui vaut 1 si le patient p utilise le lit l dans l'hôpital h , et 0 sinon.
$ArrLit_{ph}$	Temps où le patient p devient prêt à occuper un lit dans l'hôpital h .
$DebLit_{ph}$	Temps de début d'occupation du lit par le patient p dans l'hôpital h .
$FinLit_{ph}$	Temps de libération du lit occupé par le patient p dans l'hôpital h .
$WLit_{ph}$	Temps d'attente du patient p avant l'obtention d'un lit dans l'hôpital h .
ZL_{pqhl}	Variable binaire qui vaut 1 si le patient p occupe le lit l avant le patient q dans l'hôpital h , et 0 sinon.

TABLE 3.9 – Variables liées à l'occupation dynamique des lits

Ces variables permettent de représenter l'occupation réelle des lits dans le temps. Lorsqu'un patient a besoin d'un lit, il doit attendre qu'un lit soit disponible. Un même lit ne peut pas être occupé simultanément par deux patients, ce qui nécessite de définir un ordre d'occupation entre les patients affectés au même lit.

Variable	Description
$VA_{phh'a}$	Variable binaire qui vaut 1 si le patient p utilise l'ambulance a de l'hôpital h pour aller vers l'hôpital h' , et 0 sinon.
$DebAmb_{phh'}$	Temps de début du transfert ambulance du patient p depuis l'hôpital h vers l'hôpital h' .
$FinAmb_{phh'}$	Temps de fin du transfert ambulance du patient p depuis l'hôpital h vers l'hôpital h' .
$WAmb_{phh'}$	Temps d'attente du patient p avant l'obtention d'une ambulance pour aller de l'hôpital h vers l'hôpital h' .
$ZA_{pqhh'ra}$	Variable binaire qui permet de définir l'ordre d'utilisation de la même ambulance a entre deux transferts partant du même hôpital h .

TABLE 3.10 – Variables liées aux ambulances

Les variables liées aux ambulances permettent de modéliser la disponibilité limitée des moyens de transport sanitaire. Lorsqu'un patient est transféré, il doit attendre qu'une ambulance soit disponible dans son hôpital d'origine. Une même ambulance ne peut pas assurer deux transferts simultanément.

Variable	Description
$AttTot_p$	Attente totale du patient p . Elle regroupe les temps d'attente dans les services, l'attente avant lit, l'attente avant ambulance, le temps de préparation et le temps de transfert.
$DepW_p$	Dépassement du seuil maximal souhaité $Wmax_p$ pour le patient critique p .

TABLE 3.11 – Variables liées au dépassement du temps maximal souhaité

Les variables $AttTot_p$ et $DepW_p$ sont utilisées pour gérer les patients critiques. Le dépassement du seuil $Wmax_p$ n'est pas interdit de manière stricte, mais il est pénalisé dans la fonction objectif. Cela permet au modèle de rester faisable même lorsque les ressources sont limitées.

3.3.5 Fonction objectif

La fonction objectif du modèle proposé vise à minimiser le temps total de prise en charge des patients dans le réseau hospitalier. Elle regroupe plusieurs composantes temporelles : le temps de préparation, le temps de transfert, les temps d'attente dans les services, les durées de traitement, le temps d'occupation des lits, l'attente avant l'obtention d'un lit, l'attente avant l'obtention d'une ambulance, ainsi que la pénalité liée au dépassement du temps maximal souhaité pour les patients critiques. La fonction objectif du modèle proposé vise à minimiser le temps total de prise en charge des patients dans le réseau hospitalier. Elle regroupe plusieurs composantes temporelles : le temps de préparation, le temps de transfert, le temps d'attente dans les services, les durées de traitement, le temps d'occupation des lits, l'attente avant l'obtention d'un lit, l'attente avant l'obtention d'une ambulance, ainsi que la pénalité liée au dépassement du temps maximal souhaité pour les patients critiques.

Le choix de minimiser le temps total de prise en charge est cohérent avec les travaux d'optimisation des systèmes d'urgence. En effet, Almehdawe et al. (2016) montrent que les décisions d'orientation des patients et d'allocation des ambulances peuvent être analysées en tenant compte des temps de déplacement, des temps d'attente et de la congestion hospitalière. Dans ce mémoire, cette logique est adaptée au réseau hospitalier étudié afin de réduire le temps global de parcours des patients.

La fonction objectif est formulée comme suit :

$$\begin{aligned}
\min Z = & \sum_{p \in P} \sum_{h \in H} Tprep_{ph} Y_{ph} \\
& + \sum_{p \in P} \sum_{h \in H} \sum_{\substack{h' \in H \\ h' \neq h}} Ttr_{phh'} X_{phh'} \\
& + \sum_{p \in P} \sum_{h \in H} \sum_{s \in S} W_{phs} \\
& + \sum_{p \in P} \sum_{h \in H} \sum_{s \in S} d_{ps} B_{ps} U_{ph} \\
& + \sum_{p \in P} \sum_{h \in H} NeedBed_p Tlit_p U_{ph} \\
& + \sum_{p \in P} \sum_{h \in H} WLit_{ph} \\
& + \sum_{p \in P} \sum_{h \in H} \sum_{\substack{h' \in H \\ h' \neq h}} W Amb_{phh'} \\
& + \mu \sum_{p \in P} Crit_p DepW_p
\end{aligned} \tag{3.1}$$

Le premier terme de la fonction objectif représente le temps de préparation des patients dans leurs hôpitaux d'origine. Ce temps correspond à la durée nécessaire avant le début de la prise en charge ou avant un éventuel transfert.

Le deuxième terme représente le temps de transfert entre hôpitaux. Il est activé uniquement lorsqu'un patient est transféré de son hôpital d'origine vers un autre hôpital du réseau.

Le troisième terme correspond aux temps d'attente des patients avant le début des services médicaux. Cette attente dépend de l'arrivée du patient au service et de la disponibilité des postes de prise en charge.

Le quatrième terme représente les durées de traitement dans les différents services médicaux requis par les patients. Il est calculé uniquement pour les services effectivement nécessaires au patient et dans l'hôpital final où il est pris en charge.

Le cinquième terme correspond à la durée d'occupation des lits pour les patients qui nécessitent une hospitalisation, le temps d'occupation du lit dépend du patient et non de l'hôpital.

Le sixième terme représente le temps d'attente avant l'obtention d'un lit. Ce terme permet de tenir compte de la disponibilité limitée des lits dans les hôpitaux.

Le septième terme correspond au temps d'attente avant l'obtention d'une ambulance. Il est pris en compte uniquement lorsqu'un patient doit être transféré vers un autre hôpital.

Enfin, le dernier terme représente la pénalité liée au dépassement du temps maximal souhaité pour les patients critiques. Le paramètre μ permet de donner une importance plus élevée à ce dépassement dans la fonction objectif. Ainsi, plus la valeur de μ est grande, plus le modèle cherche à réduire le dépassement du seuil $Wmax_p$ pour les patients critiques.

3.3.6 Contraintes du modèle

Les contraintes du modèle permettent de garantir la cohérence des décisions prises par le solveur. Elles assurent que chaque patient est correctement affecté à un hôpital d'origine, qu'il peut être transféré au maximum une seule fois, que le transfert se fait uniquement depuis son hôpital d'origine, et que chaque patient possède un seul hôpital final de prise en charge.

Contraintes d'affectation initiale et de transfert

Chaque patient possède un hôpital d'origine connu. La variable Y_{ph} est donc fixée à 1 lorsque l'hôpital h correspond à l'hôpital d'origine du patient p , et à 0 pour tous les autres hôpitaux.

$$Y_{ph} = 1 \quad \forall p \in P, \forall h \in H : h = origin_p \quad (3.2)$$

$$Y_{ph} = 0 \quad \forall p \in P, \forall h \in H : h \neq origin_p \quad (3.3)$$

Ces deux contraintes permettent d'imposer l'hôpital initial du patient. Ainsi, le modèle ne choisit pas librement l'hôpital d'arrivée initiale, car cette information est considérée comme une donnée d'entrée.

Chaque patient peut effectuer au maximum un seul transfert dans le réseau hospitalier. Cette contrainte évite qu'un patient soit transféré plusieurs fois entre différents établissements.

$$\sum_{h \in H} \sum_{\substack{h' \in H \\ h' \neq h}} X_{phh'} \leq 1 \quad \forall p \in P \quad (3.4)$$

Le transfert d'un patient ne peut être effectué qu'à partir de son hôpital d'origine. Autrement dit, si le patient p n'arrive pas initialement à l'hôpital h , alors il ne peut pas être transféré depuis cet hôpital.

$$X_{phh'} \leq Y_{ph} \quad \forall p \in P, \forall h, h' \in H : h' \neq h \quad (3.5)$$

Un patient ne peut pas être transféré d'un hôpital vers le même hôpital. Cette contrainte interdit les transferts artificiels qui n'ont pas de signification réelle.

$$X_{phh} = 0 \quad \forall p \in P, \forall h \in H \quad (3.6)$$

Chaque patient doit avoir un seul hôpital final de prise en charge. Cet hôpital final peut être son hôpital d'origine s'il n'est pas transféré, ou un autre hôpital s'il y a transfert.

$$\sum_{h \in H} U_{ph} = 1 \quad \forall p \in P \quad (3.7)$$

Enfin, la variable U_{ph} est liée aux variables d'arrivée initiale et de transfert. Pour chaque patient, l'hôpital final est déterminé selon trois cas : le patient reste dans son hôpital d'origine, il quitte cet hôpital vers un autre établissement, ou il arrive dans cet hôpital après un transfert.

$$U_{ph} = Y_{ph} - \sum_{\substack{h' \in H \\ h' \neq h}} X_{phh'} + \sum_{\substack{g \in H \\ g \neq h}} X_{pgh} \quad \forall p \in P, \forall h \in H \quad (3.8)$$

Cette dernière contrainte est essentielle, car elle assure la cohérence entre l'hôpital d'origine, la décision de transfert et l'hôpital final du patient. Si aucun transfert n'est effectué, alors l'hôpital final reste l'hôpital d'origine. Si un transfert est effectué, l'hôpital final devient l'hôpital de destination.

Contraintes de disponibilité des services

La disponibilité des services médicaux constitue une contrainte essentielle dans le modèle. En effet, un patient ne peut être affecté à un hôpital final que si cet hôpital dispose de tous les services médicaux nécessaires à sa prise en charge.

Pour cela, le paramètre B_{ps} indique si le patient p a besoin du service s , tandis que le paramètre R_{hs} indique si le service s est disponible dans l'hôpital h . La variable U_{ph} indique l'hôpital final choisi pour le patient.

La contrainte de disponibilité des services est formulée comme suit :

$$B_{ps} U_{ph} \leq R_{hs} \quad \forall p \in P, \forall h \in H, \forall s \in S \quad (3.9)$$

Cette contrainte impose que si le patient p est affecté à l'hôpital h et qu'il a besoin du service s , alors ce service doit obligatoirement être disponible dans cet hôpital. Autrement dit, si $B_{ps} = 1$ et $U_{ph} = 1$, alors il faut nécessairement que $R_{hs} = 1$.

Dans le cas contraire, si le service demandé n'est pas disponible dans l'hôpital considéré, le modèle ne peut pas choisir cet hôpital comme hôpital final pour ce patient. Cette contrainte permet donc d'éviter une affectation irréaliste d'un patient vers un établissement incapable de répondre à ses besoins médicaux.

Contraintes temporelles des services

Les contraintes temporelles permettent de suivre le parcours de chaque patient dans les services médicaux requis. Elles assurent la cohérence entre le temps d'arrivée au service, le temps de début du service, le temps de fin du service et le temps d'attente. Elles permettent également de distinguer deux situations : le patient est pris en charge dans son hôpital d'origine, ou il est pris en charge dans un autre hôpital après un transfert.

Les variables temporelles doivent être activées uniquement lorsque le patient est affecté à l'hôpital considéré et lorsqu'il a besoin du service médical correspondant. Dans le cas contraire, ces variables doivent rester nulles. Cette logique est assurée par les contraintes suivantes :

$$Arr_{phs} \leq M \cdot U_{ph} \quad \forall p \in P, \forall h \in H, \forall s \in S \quad (3.10)$$

$$Deb_{phs} \leq M \cdot U_{ph} \quad \forall p \in P, \forall h \in H, \forall s \in S \quad (3.11)$$

$$Fin_{phs} \leq M \cdot U_{ph} \quad \forall p \in P, \forall h \in H, \forall s \in S \quad (3.12)$$

$$W_{phs} \leq M \cdot U_{ph} \quad \forall p \in P, \forall h \in H, \forall s \in S \quad (3.13)$$

$$Arr_{phs} \leq M \cdot B_{ps} \quad \forall p \in P, \forall h \in H, \forall s \in S \quad (3.14)$$

$$Deb_{phs} \leq M \cdot B_{ps} \quad \forall p \in P, \forall h \in H, \forall s \in S \quad (3.15)$$

$$Fin_{phs} \leq M \cdot B_{ps} \quad \forall p \in P, \forall h \in H, \forall s \in S \quad (3.16)$$

$$W_{phs} \leq M \cdot B_{ps} \quad \forall p \in P, \forall h \in H, \forall s \in S \quad (3.17)$$

Lorsque le patient est pris en charge dans son hôpital d'origine sans transfert, l'arrivée au premier service correspond au temps d'arrivée initial du patient auquel on ajoute le temps de préparation dans cet hôpital. Cette relation est activée uniquement pour le premier service du parcours du patient.

$$\begin{aligned}
Arr_{phs} &\geq t0_p + Tprep_{ph} - M(2 - U_{ph} - B_{ps}) \\
\forall p \in P, \forall h \in H, \forall s \in S, \\
h &= origin_p, Ord_{ps} = 1
\end{aligned} \tag{3.18}$$

$$\begin{aligned}
Arr_{phs} &\leq t0_p + Tprep_{ph} + M(2 - U_{ph} - B_{ps}) \\
\forall p \in P, \forall h \in H, \forall s \in S, \\
h &= origin_p, Ord_{ps} = 1
\end{aligned} \tag{3.19}$$

Lorsque le patient est transféré vers un autre hôpital, son arrivée au premier service dans l'hôpital de destination est égale au temps de fin du transfert en ambulance.

$$\begin{aligned}
Arr_{ph's} &\geq FinAmb_{phh'} - M(2 - X_{phh'} - B_{ps}) \\
\forall p \in P, \forall h, h' \in H, \forall s \in S, \\
h' &\neq h, Ord_{ps} = 1
\end{aligned} \tag{3.20}$$

$$\begin{aligned}
Arr_{ph's} &\leq FinAmb_{phh'} + M(2 - X_{phh'} - B_{ps}) \\
\forall p \in P, \forall h, h' \in H, \forall s \in S, \\
h' &\neq h, Ord_{ps} = 1
\end{aligned} \tag{3.21}$$

L'enchaînement des services est assuré par les contraintes suivantes. Si un service s' vient directement après un service s dans le parcours du patient, alors l'arrivée au service s' doit correspondre à la fin du service précédent s .

$$\begin{aligned}
Arr_{phs'} &\geq Fin_{phs} - M(3 - U_{ph} - B_{ps} - B_{ps'}) \\
\forall p \in P, \forall h \in H, \forall s, s' \in S, \\
Ord_{ps'} &= Ord_{ps} + 1
\end{aligned} \tag{3.22}$$

$$\begin{aligned}
Arr_{phs'} &\leq Fin_{phs} + M(3 - U_{ph} - B_{ps} - B_{ps'}) \\
\forall p \in P, \forall h \in H, \forall s, s' \in S, \\
Ord_{ps'} &= Ord_{ps} + 1
\end{aligned} \tag{3.23}$$

Le service ne peut commencer qu'après l'arrivée du patient à ce service. Cette contrainte garantit que le patient ne peut pas être traité avant d'être effectivement disponible dans le service.

$$Deb_{phs} \geq Arr_{phs} \quad \forall p \in P, \forall h \in H, \forall s \in S \tag{3.24}$$

La fin du service est déterminée par le temps de début du service et par la durée de traitement du patient dans ce service.

$$Fin_{phs} \geq Deb_{phs} + d_{ps} - M(2 - U_{ph} - B_{ps}) \quad \forall p \in P, \forall h \in H, \forall s \in S \tag{3.25}$$

$$Fin_{phs} \leq Deb_{phs} + d_{ps} + M(2 - U_{ph} - B_{ps}) \quad \forall p \in P, \forall h \in H, \forall s \in S \tag{3.26}$$

Enfin, le temps d'attente avant le service est calculé comme la différence entre le temps de début du service et le temps d'arrivée au service.

$$W_{phs} \geq Deb_{phs} - Arr_{phs} - M(2 - U_{ph} - B_{ps}) \quad \forall p \in P, \forall h \in H, \forall s \in S \quad (3.27)$$

$$W_{phs} \leq Deb_{phs} - Arr_{phs} + M(2 - U_{ph} - B_{ps}) \quad \forall p \in P, \forall h \in H, \forall s \in S \quad (3.28)$$

Ces contraintes permettent donc de construire un parcours temporel cohérent pour chaque patient. Elles garantissent que les services sont exécutés dans l'ordre défini par le paramètre Ord_{ps} , que les temps de début et de fin sont correctement calculés, et que les temps d'attente sont pris en compte dans la fonction objectif.

Contraintes de capacité des services parallèles

Dans le système étudié, un même service médical peut disposer de plusieurs postes parallèles dans un hôpital donné. Par exemple, un service de radiologie, de laboratoire ou de consultation peut prendre en charge plusieurs patients simultanément si plusieurs postes sont disponibles. Cependant, deux patients ne peuvent pas utiliser le même poste au même moment. Les contraintes suivantes permettent donc de gérer l'affectation des patients aux postes parallèles et d'éviter les chevauchements temporels.

Chaque patient affecté à un hôpital final h et nécessitant le service s doit être affecté à un seul poste parallèle disponible dans ce service.

$$\sum_{k \in K_{hs}} V_{phsk} = U_{ph} B_{ps} \quad \forall p \in P, \forall h \in H, \forall s \in S \quad (3.29)$$

Cette contrainte signifie que si le patient p est pris en charge dans l'hôpital h et qu'il a besoin du service s , alors il doit être affecté à un poste k de ce service. Si le patient n'est pas affecté à cet hôpital ou s'il n'a pas besoin de ce service, aucune affectation à un poste n'est réalisée.

La variable Z_{pqhsk} est utilisée pour définir l'ordre de passage entre deux patients p et q lorsqu'ils utilisent le même poste k du service s dans l'hôpital h . Cette variable ne peut être activée que si les deux patients sont affectés au même poste.

$$Z_{pqhsk} \leq V_{phsk} \quad \forall p, q \in P, p < q, \forall h \in H, \forall s \in S, \forall k \in K_{hs} \quad (3.30)$$

$$Z_{pqhsk} \leq V_{qhsk} \quad \forall p, q \in P, p < q, \forall h \in H, \forall s \in S, \forall k \in K_{hs} \quad (3.31)$$

Les contraintes suivantes assurent le non-chevauchement entre deux patients affectés au même poste. Si le patient p passe avant le patient q , alors le début du service de q doit être supérieur ou égal à la fin du service de p . Dans le cas inverse, le patient q passe avant le patient p .

$$Deb_{qhs} \geq Fin_{phs} - M(1 - Z_{pqhsk}) - M(2 - V_{phsk} - V_{qhsk}) \quad (3.32)$$

$$\forall p, q \in P, p < q, \forall h \in H, \forall s \in S, \forall k \in K_{hs}$$

$$Deb_{phs} \geq Fin_{qhs} - MZ_{pqhsk} - M(2 - V_{phsk} - V_{qhsk}) \quad (3.33)$$

$$\forall p, q \in P, p < q, \forall h \in H, \forall s \in S, \forall k \in K_{hs}$$

Ces contraintes permettent d'organiser les patients dans les services disposant de ressources parallèles. Elles autorisent la prise en charge simultanée de plusieurs patients lorsque plusieurs postes sont disponibles, mais elles interdisent l'utilisation simultanée du même poste par deux patients. Ainsi, le modèle reproduit mieux la capacité réelle des services hospitaliers.

Contraintes de priorité des patients critiques

Dans le système hospitalier, certains patients peuvent être considérés comme critiques. Ces patients doivent être pris en charge avec une priorité plus élevée que les patients non critiques lorsqu'ils utilisent le même service et le même poste parallèle. Les contraintes suivantes permettent donc d'intégrer cette priorité dans l'ordonnancement des patients.

Lorsque le patient p est critique et que le patient q n'est pas critique, alors le patient p doit passer avant le patient q s'ils sont affectés au même poste k du service s dans l'hôpital h .

$$\begin{aligned} Z_{pqhsk} &\geq V_{phsk} + V_{qhsk} - 1 \\ \forall p, q \in P, p < q, \forall h \in H, \forall s \in S, \forall k \in K_{hs}, \\ Crit_p &= 1, Crit_q = 0 \end{aligned} \quad (3.34)$$

Cette contrainte impose que si les deux patients sont affectés au même poste et que le patient p est critique, alors la variable Z_{pqhsk} prend la valeur 1. Cela signifie que le patient p passe avant le patient q .

Dans le cas inverse, lorsque le patient p n'est pas critique et que le patient q est critique, alors le patient q doit passer avant le patient p . Comme la variable Z_{pqhsk} vaut 1 lorsque p passe avant q , elle doit être forcée à 0 lorsque le patient q est prioritaire.

$$\begin{aligned} Z_{pqhsk} &\leq 2 - V_{phsk} - V_{qhsk} \\ \forall p, q \in P, p < q, \forall h \in H, \forall s \in S, \forall k \in K_{hs}, \\ Crit_p &= 0, Crit_q = 1 \end{aligned} \quad (3.35)$$

Ces contraintes permettent donc de donner une priorité opérationnelle aux patients critiques dans les services hospitaliers. Elles n'annulent pas les contraintes de capacité, mais elles imposent un ordre de passage prioritaire lorsque deux patients utilisent la même ressource. Ainsi, le modèle évite qu'un patient critique soit retardé par un patient non critique sur le même poste de prise en charge.

Contraintes d'occupation dynamique des lits

L'occupation des lits est modélisée de manière dynamique afin de représenter la disponibilité réelle des lits dans le temps. Un patient qui nécessite une hospitalisation doit être affecté à un lit disponible dans son hôpital final. Cependant, un même lit ne peut pas être occupé simultanément par deux patients. Les contraintes suivantes permettent donc de gérer l'affectation des patients aux lits, le début d'occupation, la fin d'occupation et l'attente avant l'obtention d'un lit.

Chaque patient nécessitant un lit doit être affecté à un seul lit disponible dans son hôpital final.

$$\sum_{l \in L_h} VL_{phl} = NeedBed_p U_{ph} \quad \forall p \in P, \forall h \in H \quad (3.36)$$

Cette contrainte signifie que si le patient p est affecté à l'hôpital h et qu'il a besoin d'un lit, alors il doit être affecté à un lit l de cet hôpital. Si le patient n'a pas besoin de lit, aucune affectation à un lit n'est réalisée.

Les variables liées aux lits sont activées uniquement si le patient est affecté à l'hôpital considéré et s'il a besoin d'un lit.

$$ArrLit_{ph} \leq M \cdot U_{ph} \quad \forall p \in P, \forall h \in H \quad (3.37)$$

$$DebLit_{ph} \leq M \cdot U_{ph} \quad \forall p \in P, \forall h \in H \quad (3.38)$$

$$FinLit_{ph} \leq M \cdot U_{ph} \quad \forall p \in P, \forall h \in H \quad (3.39)$$

$$WLit_{ph} \leq M \cdot U_{ph} \quad \forall p \in P, \forall h \in H \quad (3.40)$$

$$ArrLit_{ph} \leq M \cdot NeedBed_p \quad \forall p \in P, \forall h \in H \quad (3.41)$$

$$DebLit_{ph} \leq M \cdot NeedBed_p \quad \forall p \in P, \forall h \in H \quad (3.42)$$

$$FinLit_{ph} \leq M \cdot NeedBed_p \quad \forall p \in P, \forall h \in H \quad (3.43)$$

$$WLit_{ph} \leq M \cdot NeedBed_p \quad \forall p \in P, \forall h \in H \quad (3.44)$$

Le patient ne peut devenir prêt à occuper un lit qu'après la fin des services médicaux requis. Ainsi, l'arrivée au lit doit être supérieure ou égale à la fin de chaque service médical dont le patient a besoin.

$$\begin{aligned} ArrLit_{ph} &\geq Fin_{phs} - M(3 - U_{ph} - NeedBed_p - B_{ps}) \\ &\forall p \in P, \forall h \in H, \forall s \in S \end{aligned} \quad (3.45)$$

Le début d'occupation du lit ne peut avoir lieu qu'après que le patient soit prêt à occuper ce lit.

$$DebLit_{ph} \geq ArrLit_{ph} \quad \forall p \in P, \forall h \in H \quad (3.46)$$

Le temps d'attente avant l'obtention d'un lit est calculé comme la différence entre le début d'occupation du lit et le moment où le patient devient prêt à occuper ce lit.

$$WLit_{ph} \geq DebLit_{ph} - ArrLit_{ph} - M(2 - U_{ph} - NeedBed_p) \quad \forall p \in P, \forall h \in H \quad (3.47)$$

$$WLit_{ph} \leq DebLit_{ph} - ArrLit_{ph} + M(2 - U_{ph} - NeedBed_p) \quad \forall p \in P, \forall h \in H \quad (3.48)$$

La fin d'occupation du lit est déterminée par le début d'occupation du lit et par la durée d'occupation du lit du patient.

$$FinLit_{ph} \geq DebLit_{ph} + Tlit_p - M(2 - U_{ph} - NeedBed_p) \quad \forall p \in P, \forall h \in H \quad (3.49)$$

$$FinLit_{ph} \leq DebLit_{ph} + Tlit_p + M(2 - U_{ph} - NeedBed_p) \quad \forall p \in P, \forall h \in H \quad (3.50)$$

La variable ZL_{pqhl} permet de définir l'ordre d'occupation d'un même lit entre deux patients. Elle ne peut être activée que si les deux patients sont affectés au même lit.

$$ZL_{pqhl} \leq VL_{phl} \quad \forall p, q \in P, p < q, \forall h \in H, \forall l \in L_h \quad (3.51)$$

$$ZL_{pqhl} \leq VL_{qhl} \quad \forall p, q \in P, p < q, \forall h \in H, \forall l \in L_h \quad (3.52)$$

Les contraintes suivantes empêchent deux patients d'occuper le même lit au même moment. Si le patient p occupe le lit avant le patient q , alors le début d'occupation du lit par q doit être supérieur ou égal à la fin d'occupation du lit par p . Dans le cas inverse, le patient q occupe le lit avant le patient p .

$$\begin{aligned} DebLit_{qh} &\geq FinLit_{ph} - M(1 - ZL_{pqhl}) - M(2 - VL_{phl} - VL_{qhl}) \\ &\forall p, q \in P, p < q, \forall h \in H, \forall l \in L_h \end{aligned} \quad (3.53)$$

$$\begin{aligned} DebLit_{ph} &\geq FinLit_{qh} - MZL_{pqhl} - M(2 - VL_{phl} - VL_{qhl}) \\ &\forall p, q \in P, p < q, \forall h \in H, \forall l \in L_h \end{aligned} \quad (3.54)$$

Ces contraintes permettent de représenter l'utilisation réelle des lits hospitaliers. Elles assurent qu'un patient ayant besoin d'un lit est affecté à un lit disponible, que l'occupation commence après la fin des services médicaux requis, et qu'un même lit ne peut pas être utilisé simultanément par deux patients.

Contraintes d'utilisation des ambulances

Les ambulances représentent des ressources limitées dans le réseau hospitalier. Lorsqu'un patient est transféré de son hôpital d'origine vers un autre hôpital, il doit être affecté à une ambulance disponible dans l'hôpital de départ. Une même ambulance ne peut pas effectuer deux transferts simultanément. Les contraintes suivantes permettent donc de gérer l'affectation des transferts aux ambulances, les temps de début et de fin de transfert, ainsi que l'attente avant l'obtention d'une ambulance.

Chaque transfert effectué par un patient doit être affecté à une seule ambulance disponible dans l'hôpital de départ.

$$\sum_{a \in A_h} VA_{phh'a} = X_{phh'} \quad \forall p \in P, \forall h, h' \in H, h' \neq h \quad (3.55)$$

Cette contrainte signifie que si le patient p est transféré de l'hôpital h vers l'hôpital h' , alors une ambulance a appartenant à l'hôpital de départ h doit être utilisée. Si aucun transfert n'est réalisé, aucune ambulance n'est affectée.

Les variables temporelles liées aux ambulances sont activées uniquement lorsqu'un transfert est réellement effectué.

$$DebAmb_{phh'} \leq M \cdot X_{phh'} \quad \forall p \in P, \forall h, h' \in H \quad (3.56)$$

$$FinAmb_{phh'} \leq M \cdot X_{phh'} \quad \forall p \in P, \forall h, h' \in H \quad (3.57)$$

$$W Amb_{phh'} \leq M \cdot X_{phh'} \quad \forall p \in P, \forall h, h' \in H \quad (3.58)$$

Le transfert en ambulance ne peut commencer qu'après l'arrivée initiale du patient et après son temps de préparation dans l'hôpital de départ.

$$\begin{aligned} DebAmb_{phh'} &\geq t0_p + Tprep_{ph} - M(1 - X_{phh'}) \\ \forall p \in P, \forall h, h' \in H, h' \neq h \end{aligned} \quad (3.59)$$

Le temps d'attente avant l'obtention d'une ambulance est calculé comme la différence entre le temps de début du transfert et le moment où le patient devient prêt pour le transfert.

$$\begin{aligned} WAmb_{phh'} &\geq DebAmb_{phh'} - (t0_p + Tprep_{ph}) - M(1 - X_{phh'}) \\ \forall p \in P, \forall h, h' \in H, h' \neq h \end{aligned} \quad (3.60)$$

$$\begin{aligned} WAmb_{phh'} &\leq DebAmb_{phh'} - (t0_p + Tprep_{ph}) + M(1 - X_{phh'}) \\ \forall p \in P, \forall h, h' \in H, h' \neq h \end{aligned} \quad (3.61)$$

La fin du transfert en ambulance est déterminée par le temps de début du transfert et par la durée de transfert entre les deux hôpitaux.

$$\begin{aligned} FinAmb_{phh'} &\geq DebAmb_{phh'} + Ttr_{phh'} - M(1 - X_{phh'}) \\ \forall p \in P, \forall h, h' \in H, h' \neq h \end{aligned} \quad (3.62)$$

$$\begin{aligned} FinAmb_{phh'} &\leq DebAmb_{phh'} + Ttr_{phh'} + M(1 - X_{phh'}) \\ \forall p \in P, \forall h, h' \in H, h' \neq h \end{aligned} \quad (3.63)$$

La variable $ZA_{pqhh'ra}$ permet de définir l'ordre d'utilisation d'une même ambulance entre deux transferts partant du même hôpital h . Elle ne peut être activée que si les deux patients utilisent la même ambulance a .

$$\begin{aligned} ZA_{pqhh'ra} &\leq VA_{phh'a} \\ \forall p, q \in P, p < q, \forall h, h', r \in H, h' \neq h, r \neq h, \forall a \in A_h \end{aligned} \quad (3.64)$$

$$\begin{aligned} ZA_{pqhh'ra} &\leq VA_{qhra} \\ \forall p, q \in P, p < q, \forall h, h', r \in H, h' \neq h, r \neq h, \forall a \in A_h \end{aligned} \quad (3.65)$$

Les contraintes suivantes empêchent une même ambulance d'effectuer deux transferts simultanément. Si le transfert du patient p est réalisé avant celui du patient q , alors le début du transfert de q doit être supérieur ou égal à la fin du transfert de p . Dans le cas inverse, le transfert du patient q est réalisé avant celui du patient p .

$$\begin{aligned} DebAmb_{qhr} &\geq FinAmb_{phh'} - M(1 - ZA_{pqhh'ra}) - M(2 - VA_{phh'a} - VA_{qhra}) \\ \forall p, q \in P, p < q, \forall h, h', r \in H, h' \neq h, r \neq h, \forall a \in A_h \end{aligned} \quad (3.66)$$

$$\begin{aligned} DebAmb_{phh'} &\geq FinAmb_{qhr} - MZA_{pqhh'ra} - M(2 - VA_{phh'a} - VA_{qhra}) \\ \forall p, q \in P, p < q, \forall h, h', r \in H, h' \neq h, r \neq h, \forall a \in A_h \end{aligned} \quad (3.67)$$

Ces contraintes permettent de représenter l'utilisation réelle des ambulances dans le réseau hospitalier. Elles assurent qu'un transfert est affecté à une ambulance disponible, que le transfert commence après la préparation du patient, que le temps d'attente avant ambulance est calculé, et qu'une ambulance ne peut pas effectuer deux transferts au même moment.

Contraintes de temps final de sortie et de dépassement de Wmax

Les contraintes suivantes permettent de déterminer le temps final de sortie de chaque patient du système hospitalier. Le patient peut quitter le système après la fin de ses services médicaux

lorsqu'il n'a pas besoin de lit, ou après la libération du lit lorsqu'une hospitalisation est nécessaire.

Le temps final de sortie doit être supérieur ou égal au temps de fin de chaque service médical réalisé par le patient.

$$\begin{aligned} Dis_p &\geq Fin_{phs} - M(2 - U_{ph} - B_{ps}) \\ \forall p \in P, \forall h \in H, \forall s \in S \end{aligned} \quad (3.68)$$

Si le patient a besoin d'un lit, alors son temps final de sortie doit également être supérieur ou égal au temps de libération du lit.

$$\begin{aligned} Dis_p &\geq FinLit_{ph} - M(2 - U_{ph} - NeedBed_p) \\ \forall p \in P, \forall h \in H \end{aligned} \quad (3.69)$$

L'attente totale du patient est calculée en regroupant les différents temps qui influencent son délai global de prise en charge. Elle comprend les temps d'attente dans les services, le temps d'attente avant l'obtention d'un lit, le temps d'attente avant l'obtention d'une ambulance, le temps de préparation et le temps de transfert.

$$\begin{aligned} AttTot_p &= \sum_{h \in H} \sum_{s \in S} W_{phs} + \sum_{h \in H} W_{Lit_{ph}} \\ &\quad + \sum_{h \in H} \sum_{\substack{h' \in H \\ h' \neq h}} W_{Amb_{phh'}} \\ &\quad + \sum_{h \in H} T_{prep_{ph}} Y_{ph} + \sum_{h \in H} \sum_{\substack{h' \in H \\ h' \neq h}} T_{tr_{phh'}} X_{phh'} \\ \forall p \in P \end{aligned} \quad (3.70)$$

Le dépassement du temps maximal souhaité est calculé uniquement pour les patients critiques. Lorsque le patient n'est pas critique, la contrainte est désactivée grâce à la grande constante M .

$$\begin{aligned} DepW_p &\geq AttTot_p - Wmax_p - M(1 - Crit_p) \\ \forall p \in P \end{aligned} \quad (3.71)$$

Ces contraintes permettent de compléter la formulation mathématique du modèle. Elles assurent que le temps de sortie du patient est cohérent avec son parcours de soins, que l'attente totale est correctement calculée, et que le dépassement du seuil $Wmax_p$ pour les patients critiques est pris en compte dans la fonction objectif.

3.4 Collecte, structuration et préparation des données réelles

3.4.1 Présentation des sources de données hospitalières

La construction du modèle mathématique nécessite la collecte et la structuration de plusieurs catégories de données. Ces données concernent principalement le réseau hospitalier étudié, les capacités des établissements, les services médicaux disponibles, les ressources matérielles, les temps de transfert, ainsi que les caractéristiques des patients à prendre en charge.

Dans ce travail, les données utilisées proviennent de plusieurs sources complémentaires. Certaines données sont issues de documents officiels et statistiques, notamment les annuaires statis-

tiques de l'Algérie, qui permettent d'identifier les infrastructures hospitalières, le nombre d'établissements, les capacités en lits et les ressources disponibles dans la wilaya de Tlemcen (ONS, 2018). D'autres informations proviennent de travaux universitaires et de mémoires portant sur les établissements hospitaliers de la wilaya, notamment le CHU de Tlemcen, les services d'urgences médico-chirurgicales, les EPH de la wilaya et certaines spécialités médicales (Zerrouk, 2022).

Les données relatives au réseau hospitalier de Tlemcen permettent d'identifier les principaux établissements considérés dans le modèle. Il s'agit notamment du CHU Tidjani Damerdji de Tlemcen, des EPH de Maghnia, Ghazaouet, Sebdou, Remchi et Nedroma, ainsi que de l'EHS Mère-Enfant de Tlemcen. Ces établissements sont représentés dans le modèle par l'ensemble des hôpitaux H . Les capacités en lits, les services disponibles et les ressources médicales associées sont utilisées pour définir les paramètres du modèle, notamment L_h , R_{hs} , $CapServ_{hs}$ et Amb_h .

Les données relatives aux urgences et à la prise en charge des patients permettent de mieux comprendre le parcours réel du patient dans le système hospitalier. Elles concernent les étapes d'accueil, de tri, de consultation, d'examens complémentaires, d'hospitalisation, de transfert et de sortie. Ces informations sont utilisées pour construire les paramètres liés aux besoins médicaux des patients, tels que B_{ps} , $NeedBed_p$, $Crit_p$, Ord_{ps} et $Wmax_p$.

Cependant, toutes les données nécessaires au modèle ne sont pas toujours disponibles de manière directe ou complète dans les sources consultées. Pour cette raison, certaines données ont été structurées ou adaptées afin de rendre le modèle exploitable sous IBM ILOG CPLEX. Il s'agit notamment des temps de préparation, des temps de transfert, des durées de traitement, des durées d'occupation des lits, de la capacité parallèle des services et des scénarios de patients. Ces données sont construites de manière cohérente avec le contexte réel du réseau hospitalier, tout en respectant les exigences de la modélisation mathématique.

Ainsi, les données utilisées dans ce travail peuvent être classées en trois catégories principales : les données réelles collectées à partir des sources hospitalières et statistiques, les données structurées à partir des informations disponibles, et les données de paramétrage nécessaires à la résolution du modèle. Cette distinction permet de garantir la cohérence entre le cas d'étude réel et la formulation mathématique proposée.

Le tableau 3.12 résume les principales sources de données utilisées dans ce travail et leur rôle dans la construction du modèle d'optimisation.

Source	Données exploitées	Rôle dans le modèle
Office National des Statistiques	Infrastructures sanitaires, nombre d'établissements, capacités hospitalières et évolution des lits dans la wilaya de Tlemcen.	Définition du contexte hospitalier et validation des capacités globales du réseau.
Direction de la Santé et de la Population de Tlemcen	Présentation du secteur sanitaire de la wilaya, établissements hospitaliers et organisation du réseau public.	Identification des hôpitaux considérés dans l'étude.
Zerrouk (2022)	Données relatives au service des urgences du CHU de Tlemcen, ressources, capacités, flux de patients et parcours de prise en charge.	Construction du parcours patient et choix de certains paramètres liés aux urgences.
Travaux universitaires sur les EPH de la wilaya	Informations sur certains établissements comme Maghnia, Ghazaouet, Remchi et Nedroma, leurs services et leurs capacités.	Complément des données sur les hôpitaux périphériques du réseau.
Paramétrage du modèle d'optimisation	Données structurées : patients, services requis, temps de transfert, durées de traitement, lits, ambulances et capacités parallèles.	Données d'entrée utilisées dans IBM ILOG CPLEX pour résoudre le modèle.

TABLE 3.12 – Principales sources de données utilisées pour la construction du modèle

En résumé, la collecte des données a permis de construire une base de paramètres adaptée au modèle mathématique. Les informations réelles servent à représenter le réseau hospitalier de Tlemcen, tandis que les données structurées permettent de tester le comportement du modèle dans différents scénarios. Cette étape est indispensable avant la résolution exacte, car la qualité des résultats dépend directement de la cohérence des données introduites dans le solveur.

3.4.2 Cartographie et quantification des ressources

Après l'identification des sources de données, une étape de cartographie et de quantification des ressources a été réalisée afin de transformer les informations hospitalières en paramètres exploitables dans le modèle mathématique. Cette étape consiste à représenter chaque établissement du réseau par un code, à définir ses capacités principales, à identifier les services médicaux disponibles et à structurer les ressources nécessaires à la prise en charge des patients.

Dans ce travail, le réseau hospitalier étudié est composé de sept établissements principaux. Chaque établissement est représenté par un code $H1$, $H2$, ..., $H7$ afin de faciliter son intégration dans le modèle d'optimisation. Les capacités en lits utilisées dans le modèle sont issues des données collectées sur le réseau hospitalier de Tlemcen et ont été structurées sous forme du paramètre L_h (DSP Tlemcen, s.d.).

Code	Établissement hospitalier	Lits disponibles	Ambulances
H1	CHU Tidjani Damerdji Tlemcen	642	8
H2	EPH Maghnia	249	4
H3	EPH Ghazaouet	232	3
H4	EPH Sebdou	232	3
H5	EPH Remchi	120	2
H6	EPH Nedroma	100	2
H7	EHS Mère-Enfant Tlemcen	204	2

TABLE 3.13 – Quantification des ressources hospitalières utilisées dans le modèle

Les lits disponibles représentent la capacité d’hospitalisation de chaque établissement. Dans le modèle, cette capacité est utilisée pour limiter l’affectation des patients nécessitant une hospitalisation. Le paramètre L_h permet donc de vérifier qu’un patient ayant besoin d’un lit ne peut être affecté qu’à un établissement disposant d’une capacité suffisante.

Les ambulances sont également considérées comme une ressource limitée. Elles sont représentées par le paramètre Amb_h , qui indique le nombre d’ambulances disponibles dans chaque hôpital. Lorsqu’un patient doit être transféré vers un autre établissement, le modèle vérifie qu’une ambulance est disponible dans son hôpital d’origine. Cette ressource est importante, car elle influence directement le temps d’attente avant transfert et le temps total de prise en charge.

En plus des lits et des ambulances, le modèle prend en compte les services médicaux disponibles dans le réseau. Les services retenus correspondent aux principales spécialités et ressources techniques nécessaires à la prise en charge des patients dans le cadre de cette étude. Chaque service est représenté par un code numérique afin de faciliter son intégration dans les paramètres R_{hs} , B_{ps} , d_{ps} et Ord_{ps} .

Code	Service	Code	Service
1	Réanimation	9	Échographie
2	Cardiologie	10	Gynécologie
3	Chirurgie	11	Orthopédie
4	Médecine	12	Hémodialyse
5	Pédiatrie	13	Neurologie
6	Radiologie	14	Pneumologie
7	Scanner	15	Stomatologie
8	Laboratoire		

TABLE 3.14 – Services médicaux considérés dans le modèle

La disponibilité des services varie d’un hôpital à un autre. Cette disponibilité est représentée par le paramètre binaire R_{hs} , qui vaut 1 si le service s est disponible dans l’hôpital h , et 0 sinon. Cette information est essentielle dans le modèle, car un patient ne peut être orienté vers un hôpital final que si tous les services dont il a besoin y sont disponibles.

La capacité parallèle des services est représentée par le paramètre $CapServ_{hs}$. Ce paramètre indique le nombre de postes pouvant fonctionner simultanément pour un service donné dans un hôpital donné. Par exemple, un service de laboratoire ou de radiologie peut prendre en charge plusieurs patients en parallèle si plusieurs postes sont disponibles. Cette capacité permet d'intégrer une logique d'ordonnancement dans le modèle, car deux patients affectés au même poste ne peuvent pas être traités au même moment.

Les données relatives aux patients sont ensuite structurées à partir des besoins médicaux. Pour chaque patient, le modèle précise l'hôpital d'origine $origin_p$, le temps d'arrivée initial $t0_p$, les services requis B_{ps} , l'ordre de passage dans les services Ord_{ps} , le besoin éventuel d'un lit $NeedBed_p$, la criticité $Crit_p$ et le seuil maximal souhaité $Wmax_p$. Ces données permettent de construire un parcours de soins propre à chaque patient.

Les temps de préparation, de transfert, de traitement et d'occupation des lits sont également introduits comme paramètres du modèle. Le temps de préparation $Tprep_{ph}$ représente le temps nécessaire avant la prise en charge ou le transfert du patient. Le temps de transfert $Ttr_{phh'}$ représente la durée du déplacement entre deux hôpitaux. La durée de service d_{ps} indique le temps nécessaire pour réaliser le service s pour le patient p . Enfin, $Tlit_p$ représente la durée d'occupation d'un lit par le patient lorsque celui-ci nécessite une hospitalisation.

Il est important de préciser que certaines ressources proviennent directement des données réelles collectées, notamment les établissements considérés, les capacités en lits et les principales ressources hospitalières. D'autres données ont été adaptées et structurées afin de rendre le modèle exploitable dans IBM ILOG CPLEX. Cette structuration est nécessaire pour passer d'une description réelle du réseau hospitalier à une formulation mathématique capable de générer des décisions d'orientation, de transfert et d'affectation des ressources.

Ainsi, la cartographie des ressources permet de relier le cas d'étude réel au modèle mathématique. Elle constitue une étape intermédiaire entre la collecte des données et la résolution exacte, car elle transforme les informations hospitalières en paramètres numériques compatibles avec l'optimisation.

3.5 Résolution exacte et validation du modèle sous IBM ILOG CPLEX

3.5.1 Choix de l'environnement d'optimisation et du solveur CPLEX

Après la formulation mathématique du problème, une étape de résolution exacte est nécessaire afin de déterminer les décisions optimales d'orientation, de transfert et d'affectation des ressources. Dans ce travail, le modèle proposé a été implémenté et résolu à l'aide de l'environnement IBM ILOG CPLEX Optimization Studio. Le recours à une résolution exacte s'inscrit dans une logique classique de modélisation des systèmes hospitaliers et des services d'urgence. Des travaux comme ceux de Hatami-Marbini et al. (2022) montrent l'intérêt d'utiliser la modélisation mathématique pour représenter les décisions liées aux ressources médicales, puis de compléter cette approche par la simulation afin d'analyser le comportement dynamique du système. Dans ce mémoire, cette logique est adoptée à travers une première étape de résolution exacte sous CPLEX, suivie d'une approche de simulation dynamique présentée dans le chapitre suivant.

Le choix de CPLEX se justifie par la nature du modèle mathématique développé. En effet, le problème étudié contient à la fois des variables binaires et des variables continues. Les variables binaires permettent de représenter les décisions d'affectation des patients aux hôpitaux, les transferts, l'utilisation des postes de service, l'affectation des lits et l'utilisation des ambulances. Les variables continues permettent de représenter les temps d'arrivée, de début, de fin, d'attente et

de sortie. Le modèle appartient donc à la famille des problèmes de programmation linéaire mixte en nombres entiers, généralement notée MILP.

IBM ILOG CPLEX Optimizer est un solveur d'optimisation conçu pour résoudre des problèmes de programmation linéaire, de programmation mixte en nombres entiers et de programmation quadratique (IBM, s.d.). Il est donc adapté à la résolution du modèle proposé, car celui-ci combine des contraintes linéaires, des variables binaires et des variables continues.

L'utilisation de CPLEX permet également de séparer clairement le fichier du modèle et le fichier des données. Le fichier `.mod` contient la formulation mathématique, c'est-à-dire les ensembles, les paramètres, les variables de décision, la fonction objectif et les contraintes. Le fichier `.dat` contient les valeurs numériques utilisées pour tester le modèle, comme le nombre de patients, le nombre d'hôpitaux, les services requis, les capacités en lits, les ambulances, les temps de transfert et les durées de traitement.

Cette séparation entre le modèle et les données facilite les tests de scénarios. Il devient possible de garder la même formulation mathématique tout en modifiant uniquement les données d'entrée. Ainsi, plusieurs scénarios peuvent être analysés, par exemple avec 8 patients, 15 patients ou 30 patients, afin d'évaluer le comportement du modèle lorsque la taille du problème augmente.

Dans cette étude, CPLEX est utilisé pour obtenir une solution optimale ou réalisable selon les contraintes imposées. Les résultats obtenus permettent d'identifier, pour chaque patient, son hôpital d'origine, son hôpital final, l'existence ou non d'un transfert, les services réalisés, les temps d'attente, l'utilisation des lits, l'utilisation des ambulances et le dépassement éventuel du seuil maximal souhaité pour les patients critiques.

La résolution exacte sous CPLEX constitue donc une étape importante de validation du modèle. Elle permet de vérifier la cohérence de la formulation mathématique et d'analyser la capacité du modèle à générer des décisions adaptées au contexte hospitalier étudié.

3.5.2 Résultats de l'optimisation pour le scénario de référence

Le scénario de référence correspond au premier jeu de données utilisé pour valider le modèle mathématique sous IBM ILOG CPLEX. Ce scénario considère 8 patients, 7 hôpitaux et 15 services médicaux. L'objectif de cette résolution est de vérifier la capacité du modèle à déterminer l'hôpital final de chaque patient, à organiser les transferts nécessaires, à affecter les patients aux services, aux lits et aux ambulances, tout en minimisant le temps total de prise en charge.

Les résultats obtenus montrent que la valeur de la fonction objectif est égale à 13282. Le modèle a identifié 4 patients maintenus dans leur hôpital d'origine et 4 patients transférés vers un autre établissement. Les temps d'attente dans les services, les lits et les ambulances sont globalement nuls. Les très petites valeurs négatives affichées par CPLEX, comme -3.1810^{-11} , sont dues à la tolérance numérique du solveur et sont donc considérées comme égales à zéro.

Indicateur	Valeur obtenue
Valeur de la fonction objectif	13282
Attente totale dans les services	0
Attente totale avant obtention des lits	0
Attente totale avant obtention des ambulances	0
Dépassement total du seuil W_{max}	11
Nombre de patients transférés	4
Temps final maximal de sortie	638

TABLE 3.15 – Indicateurs globaux du scénario de référence

Le tableau 3.16 présente les décisions obtenues pour chaque patient. Il indique l'hôpital d'origine, l'hôpital final, le statut du patient, l'attente totale et le dépassement éventuel du seuil W_{max} .

Patient	Hôpital d'origine	Hôpital final	Statut	$AttTot_p$	$DepW_p$
1	H2 – Maghnia	H2 – Maghnia	Maintenu	8	0
2	H4 – Sebdou	H1 – CHU Tlemcen	Transféré	25	0
3	H5 – Remchi	H1 – CHU Tlemcen	Transféré	33	0
4	H2 – Maghnia	H2 – Maghnia	Maintenu	8	0
5	H6 – Nedroma	H5 – Remchi	Transféré	21	0
6	H3 – Ghazaouet	H3 – Ghazaouet	Maintenu	8	0
7	H3 – Ghazaouet	H1 – CHU Tlemcen	Transféré	71	11
8	H1 – CHU Tlemcen	H1 – CHU Tlemcen	Maintenu	8	0

TABLE 3.16 – Décisions d'orientation des patients dans le scénario de référence

D'après ces résultats, les patients 1, 4, 6 et 8 sont pris en charge dans leur hôpital d'origine. Cela signifie que les services nécessaires à leur parcours sont disponibles dans l'établissement initial et qu'un transfert n'est pas nécessaire. En revanche, les patients 2, 3, 5 et 7 sont transférés vers un autre hôpital, car leur hôpital d'origine ne permet pas de satisfaire l'ensemble des besoins médicaux ou des ressources nécessaires.

Les résultats montrent également que le CHU de Tlemcen joue un rôle central dans le réseau. Trois patients transférés sont orientés vers le CHU, à savoir les patients 2, 3 et 7. Cela s'explique par la disponibilité plus importante des services spécialisés et des ressources hospitalières dans cet établissement. Le patient 5 est transféré de l'EPH de Nedroma vers l'EPH de Remchi, ce qui montre que le modèle ne choisit pas automatiquement le CHU, mais sélectionne l'hôpital final selon les besoins du patient, les services disponibles et le temps total de prise en charge.

Le tableau 3.17 présente les transferts réalisés par ambulance dans le scénario de référence.

Patient	Départ	Arrivée	Ambulance	Début	Fin
2	H4 – Sebdou	H1 – CHU Tlemcen	2	10	27
3	H5 – Remchi	H1 – CHU Tlemcen	1	12	37
5	H6 – Nedroma	H5 – Remchi	1	16	29
7	H3 – Ghazaouet	H1 – CHU Tlemcen	1	20	83

TABLE 3.17 – Transferts réalisés par ambulance

Les transferts sont organisés de manière à respecter la disponibilité des ambulances. Chaque transfert est affecté à une ambulance de l’hôpital de départ. Les temps d’attente avant ambulance sont nuls, ce qui signifie que les ambulances nécessaires sont disponibles au moment où les patients deviennent prêts pour le transfert.

Le tableau 3.18 présente l’analyse du seuil W_{max} pour les patients critiques.

Patient	Critique	W_{max_p}	$AttTot_p$	$DepW_p$	Statut
3	Oui	80	33	0	Respecté
7	Oui	60	71	11	Dépassé

TABLE 3.18 – Analyse du dépassement de W_{max} pour les patients critiques

Le patient 3 est critique, mais son attente totale est égale à 33, ce qui reste inférieur au seuil maximal autorisé de 80. Le seuil W_{max} est donc respecté pour ce patient. En revanche, le patient 7 est également critique, avec une attente totale de 71 pour un seuil maximal de 60. Le dépassement est donc égal à 11. Ce dépassement est pris en compte dans la fonction objectif à travers la pénalité associée au paramètre μ .

Les résultats relatifs aux lits montrent que quatre patients nécessitent une occupation de lit : les patients 2, 3, 7 et 8. Tous ces patients sont affectés au CHU de Tlemcen. Les temps d’attente avant obtention d’un lit sont nuls, ce qui indique que les lits affectés sont disponibles au moment où les patients terminent leurs services médicaux.

Patient	Hôpital	Lit	Arrivée lit	Début lit	Fin lit
2	H1 – CHU Tlemcen	604	132	132	332
3	H1 – CHU Tlemcen	1	92	92	392
7	H1 – CHU Tlemcen	444	188	188	588
8	H1 – CHU Tlemcen	179	138	138	638

TABLE 3.19 – Occupation dynamique des lits dans le scénario de référence

En conclusion, les résultats du scénario de référence montrent que le modèle est capable de générer une solution cohérente pour l’orientation des patients, les transferts, l’affectation aux services, l’utilisation des ambulances et l’occupation des lits. Les patients sont orientés vers les hôpitaux capables de satisfaire leurs besoins médicaux, et les ressources sont utilisées sans chevauchement. Le seul dépassement observé concerne le patient critique 7, ce qui montre l’intérêt de la pénalité $DepW_p$ dans la fonction objectif.

3.5.3 Tests de montée en charge et évaluation des limites

Après la validation du modèle sur le scénario de référence, des tests de montée en charge ont été réalisés afin d'évaluer le comportement du modèle lorsque le nombre de patients augmente. L'objectif de ces tests est d'analyser la capacité du modèle à produire des décisions cohérentes dans des scénarios plus chargés, tout en observant l'évolution de la complexité de résolution sous IBM ILOG CPLEX.

Trois scénarios ont été considérés. Le premier scénario correspond au cas de référence avec 8 patients. Le deuxième scénario correspond à une charge moyenne avec 15 patients. Le troisième scénario correspond à une charge plus élevée avec 30 patients. Pour ces trois scénarios, le nombre d'hôpitaux et le nombre de services restent constants, avec 7 hôpitaux et 15 services médicaux. Seul le nombre de patients varie, ce qui permet d'étudier l'impact de l'augmentation du flux de patients sur la résolution exacte.

Scénario	Patients	Hôpitaux	Services	Objectif du test
Scénario 1	8	7	15	Validation du modèle de référence
Scénario 2	15	7	15	Évaluation du modèle avec une charge moyenne
Scénario 3	30	7	15	Évaluation des limites de résolution exacte

TABLE 3.20 – Scénarios de montée en charge du modèle

Les résultats obtenus pour les scénarios de 8 et 15 patients montrent que le modèle est capable de générer des solutions cohérentes. Dans le scénario de référence à 8 patients, la valeur de la fonction objectif est égale à 13282. Le modèle a identifié 4 patients transférés et 4 patients maintenus dans leur hôpital d'origine. Le dépassement total du seuil W_{max} est égal à 11, et le temps final maximal de sortie est égal à 638.

Pour le scénario à 15 patients, la valeur de la fonction objectif augmente pour atteindre environ 26244. Le modèle identifie 9 patients transférés et 6 patients maintenus dans leur hôpital d'origine. L'attente dans les services est égale à 83,5, l'attente liée aux ambulances est égale à 61,5, tandis que l'attente liée aux lits reste nulle. Le dépassement total du seuil W_{max} est égal à 22, et le temps final maximal de sortie est égal à 703.

Scénario	Patients	Fonction objectif	Transferts	Dépassement W_{max}	Temps final max
Scénario 1	8	13282	4	11	638
Scénario 2	15	26244	9	22	703
Scénario 3	30	Non obtenu	Non obtenu	Non obtenu	Non obtenu

TABLE 3.21 – Comparaison des résultats des scénarios de montée en charge

Le passage de 8 à 15 patients montre une augmentation importante de la valeur de la fonction objectif, du nombre de transferts et du dépassement total du seuil W_{max} . Cette évolution est logique, car l'augmentation du nombre de patients entraîne une utilisation plus importante des services, des ambulances et des lits. Elle augmente également le nombre de décisions d'affectation et d'ordonnancement à prendre par le solveur.

Le scénario de 30 patients met en évidence une limite importante de la résolution exacte. En effet, la résolution sous CPLEX n'a pas abouti dans un temps raisonnable. Après plusieurs heures de calcul, le solveur continuait à chercher une solution ou à prouver l'optimalité, sans produire de résultat final exploitable. Ce constat ne signifie pas nécessairement que le problème est infaisable, mais il montre que la taille du modèle devient trop importante pour une résolution exacte rapide.

Cette difficulté s'explique par la nature combinatoire du modèle. Lorsque le nombre de patients augmente, le nombre de variables et de contraintes augmente fortement. Les variables liées aux couples de patients, comme Z_{pqhsk} pour les postes de service, ZL_{pqhl} pour les lits et $ZA_{pqhh'ra}$ pour les ambulances, deviennent particulièrement nombreuses. Ces variables servent à empêcher les chevauchements entre patients, mais elles augmentent rapidement la complexité du modèle lorsque le nombre de patients devient élevé.

Ainsi, les tests de montée en charge montrent que le modèle exact est pertinent pour analyser des scénarios de taille limitée ou moyenne, comme les scénarios de 8 et 15 patients. En revanche, pour un scénario plus important comme celui de 30 patients, la résolution exacte devient difficile à exploiter dans un temps raisonnable. Cette limite justifie l'intérêt de compléter l'approche mathématique par une approche de simulation dynamique, plus adaptée à la représentation continue des flux de patients, des files d'attente et de la disponibilité variable des ressources hospitalières.

3.6 Analyse des performances et limites de l'approche statique

Les résultats obtenus sous IBM ILOG CPLEX montrent que le modèle mathématique proposé permet de représenter de manière cohérente le problème d'orientation et de transfert des patients dans le réseau hospitalier étudié. Pour les scénarios de 8 et 15 patients, le modèle est capable de déterminer l'hôpital final de chaque patient, d'identifier les transferts nécessaires, d'affecter les patients aux services médicaux, aux lits et aux ambulances, tout en respectant les contraintes de disponibilité et de non-chevauchement des ressources.

Dans le scénario de référence à 8 patients, le modèle a donné une solution exploitable avec une valeur de fonction objectif égale à 13282. Les résultats montrent que 4 patients sont maintenus dans leur hôpital d'origine, tandis que 4 patients sont transférés vers un autre établissement. Les temps d'attente dans les services, les lits et les ambulances sont globalement nuls, ce qui montre que les ressources disponibles suffisent pour traiter ce scénario de petite taille. Le seul dépassement observé concerne un patient critique, avec un dépassement total de W_{max} égal à 11.

Dans le scénario de 15 patients, la fonction objectif augmente pour atteindre environ 26244. Le nombre de transferts passe de 4 à 9, ce qui montre que l'augmentation du nombre de patients entraîne une sollicitation plus importante du réseau hospitalier. Les résultats montrent également l'apparition d'une attente dans les services et dans les ambulances, avec une attente totale dans les services de 83,5 et une attente totale liée aux ambulances de 61,5. Le dépassement total du seuil W_{max} atteint 22. Cette évolution montre que le modèle reste capable de produire une solution cohérente, mais que la charge du système commence à influencer les performances globales.

Cependant, le scénario de 30 patients met en évidence une limite importante de l'approche exacte. La résolution sous CPLEX n'a pas abouti dans un temps raisonnable. Après plusieurs heures de calcul, le solveur continuait à chercher une solution ou à prouver l'optimalité, sans produire de résultat final exploitable. Ce résultat ne signifie pas nécessairement que le problème

est infaisable, mais il montre que la résolution exacte devient difficile lorsque la taille du problème augmente.

Cette difficulté s'explique par la nature combinatoire du modèle. En effet, lorsque le nombre de patients augmente, le nombre de variables et de contraintes augmente fortement. Les variables d'affectation, de transfert, d'utilisation des lits, d'utilisation des ambulances et de passage dans les services deviennent plus nombreuses. De plus, les contraintes de non-chevauchement comparent les patients deux à deux afin d'éviter l'utilisation simultanée d'une même ressource. Ainsi, les variables Z_{pqhsk} , ZL_{pqhl} et $ZA_{pqhh'ra}$ augmentent rapidement avec le nombre de patients, ce qui rend la résolution plus lourde.

L'approche statique présente également une autre limite importante : elle suppose que l'ensemble des patients est connu à l'avance. Dans un système hospitalier réel, les patients arrivent de manière continue et imprévisible. Le nombre d'arrivées varie selon les heures, les jours, les périodes de forte demande et les situations d'urgence. Le modèle exact représente donc une situation figée à un instant donné, mais il ne permet pas de suivre facilement l'évolution dynamique du système dans le temps.

De plus, certains paramètres sont considérés comme déterministes dans le modèle, comme les temps de préparation, les temps de transfert, les durées de traitement et les durées d'occupation des lits. Or, dans la réalité, ces temps peuvent varier selon l'état du patient, la disponibilité du personnel, la charge du service, les retards dans les examens complémentaires ou les imprévus organisationnels. Cette incertitude est difficile à représenter dans un modèle statique exact.

L'approche mathématique reste donc très utile pour formaliser le problème, structurer les décisions et obtenir des solutions optimales ou cohérentes pour des scénarios limités. Elle permet de comprendre les interactions entre les patients, les hôpitaux, les services, les lits et les ambulances. Elle permet également de vérifier la faisabilité des décisions et d'analyser l'effet de certaines contraintes sur la prise en charge des patients.

Néanmoins, les limites observées montrent que cette approche ne suffit pas pour représenter entièrement le fonctionnement réel d'un système hospitalier. Le passage à une approche de simulation dynamique devient donc nécessaire. La simulation permettra de prendre en compte les arrivées progressives des patients, les files d'attente, les variations de disponibilité des ressources, les durées variables de traitement et les perturbations pouvant apparaître dans le système.

Ainsi, l'analyse des performances du modèle exact permet de justifier le développement du chapitre suivant. Le chapitre 4 sera consacré à une approche de simulation dynamique, qui complète la modélisation mathématique en offrant une représentation plus flexible et plus réaliste du fonctionnement hospitalier.

3.7 Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter le cas d'étude, la formulation mathématique du problème et la résolution exacte du modèle proposé. Dans un premier temps, le contexte du système de santé algérien et du réseau hospitalier de la wilaya de Tlemcen a été décrit. Cette présentation a permis d'identifier les principaux établissements considérés dans l'étude, notamment le CHU de Tlemcen, les EPH de la wilaya et l'EHS Mère-Enfant.

Ensuite, une modélisation mathématique mono-objectif a été développée afin de représenter le problème d'orientation et de transfert des patients entre les hôpitaux. Le modèle vise à minimiser le temps total de prise en charge des patients en tenant compte des temps de préparation, des temps de transfert, des temps d'attente, des durées de traitement, de l'occupation des lits, de l'utilisation des ambulances et du dépassement éventuel du seuil maximal souhaité pour les patients critiques.

La formulation proposée intègre plusieurs contraintes opérationnelles importantes, notamment la disponibilité des services médicaux, l'affectation des patients à un hôpital final, l'ordre de passage dans les services, la capacité parallèle des postes de service, la priorité des patients critiques, l'occupation dynamique des lits et l'utilisation non simultanée des ambulances. Ces contraintes permettent de rapprocher le modèle du fonctionnement réel d'un réseau hospitalier.

La résolution exacte du modèle a été réalisée sous IBM ILOG CPLEX. Les résultats du scénario de référence à 8 patients montrent que le modèle est capable de produire des décisions cohérentes concernant l'orientation des patients, les transferts, l'affectation aux services, l'utilisation des lits et des ambulances. Le scénario de 15 patients a permis d'évaluer le comportement du modèle avec une charge plus importante. Les résultats montrent une augmentation de la fonction objectif, du nombre de transferts et du dépassement du seuil W_{max} , ce qui traduit une sollicitation plus forte des ressources hospitalières.

Cependant, le scénario de 30 patients a montré une limite importante de l'approche exacte. La résolution n'a pas abouti dans un temps raisonnable, ce qui met en évidence la complexité combinatoire du modèle lorsque le nombre de patients augmente. Cette limite ne remet pas en cause la validité du modèle, mais elle montre que l'approche statique exacte devient difficile à exploiter pour des scénarios de grande taille ou pour un système hospitalier fonctionnant de manière continue.

Ainsi, ce chapitre a permis de valider la cohérence du modèle mathématique et de montrer son intérêt pour l'aide à la décision dans un réseau hospitalier. Toutefois, les limites observées justifient le passage vers une approche complémentaire basée sur la simulation dynamique. Le chapitre suivant sera donc consacré à la modélisation dynamique du système hospitalier, afin de mieux représenter les flux de patients, les files d'attente, les variations des ressources et les perturbations du fonctionnement réel.

Chapitre 4

Conception et simulation du Digital Twin pour le réseau hospitalier

4.1 Introduction

Le chapitre précédent a permis de formuler et de résoudre un modèle mathématique exact pour l'orientation et le transfert des patients dans le réseau hospitalier étudié. Les résultats obtenus sous IBM ILOG CPLEX ont montré que le modèle est capable de produire des décisions cohérentes pour des scénarios de taille limitée ou moyenne. Cependant, les tests de montée en charge ont également montré les limites de cette approche exacte lorsque le nombre de patients augmente, notamment dans le scénario de 30 patients où la résolution devient difficile dans un temps raisonnable.

Afin de dépasser ces limites, ce chapitre propose une approche complémentaire basée sur la simulation dynamique et le concept de jumeau numérique. Contrairement au modèle statique, la simulation permet de représenter l'évolution du système hospitalier dans le temps. Elle prend en compte l'arrivée progressive des patients, les files d'attente, l'occupation des ressources, les transferts entre hôpitaux, la disponibilité des ambulances et l'évolution de la charge des établissements.

Le jumeau numérique développé dans ce travail représente virtuellement le réseau hospitalier de la wilaya de Tlemcen. Il permet de suivre le comportement du système en temps réel ou en temps simulé, d'observer l'état des hôpitaux, de visualiser les patients actifs, de détecter les situations de surcharge et d'analyser les décisions d'orientation. La simulation repose sur un moteur à événements discrets développé avec SimPy, associé à une interface graphique réalisée avec PyQt5. Le système intègre également une visualisation 2D et une visualisation 3D permettant de suivre l'état du réseau hospitalier de manière plus intuitive.

Dans cette approche, les données du réseau hospitalier sont conservées : les hôpitaux, les services médicaux, les lits, les ambulances, les capacités opérationnelles, les temps de transfert et les parcours de soins. Ces données servent de base à la simulation du système hospitalier et permettent de reproduire le fonctionnement du réseau étudié dans un environnement virtuel.

L'objectif de ce chapitre est donc de présenter la conception du jumeau numérique, son architecture globale, les outils logiciels utilisés, la logique de simulation, l'algorithme d'affectation dynamique des patients, ainsi que les scénarios testés. Les résultats obtenus permettront d'analyser le comportement du réseau hospitalier dans un contexte plus réaliste et plus dynamique que celui du modèle exact.

4.2 Architecture globale du jumeau numérique

L'architecture globale du jumeau numérique proposé repose sur la connexion entre le système hospitalier réel et son équivalent virtuel. Cette logique est cohérente avec les travaux de Han et al. (2023), qui présentent le jumeau numérique comme un cadre permettant de relier les opérations hospitalières réelles à une représentation numérique capable d'aider à la prise de décision. Dans ce travail, le système réel correspond au réseau hospitalier physique composé des différents établissements de la wilaya de Tlemcen, tandis que le système virtuel correspond à l'application de simulation développée pour représenter le comportement dynamique de ce réseau.

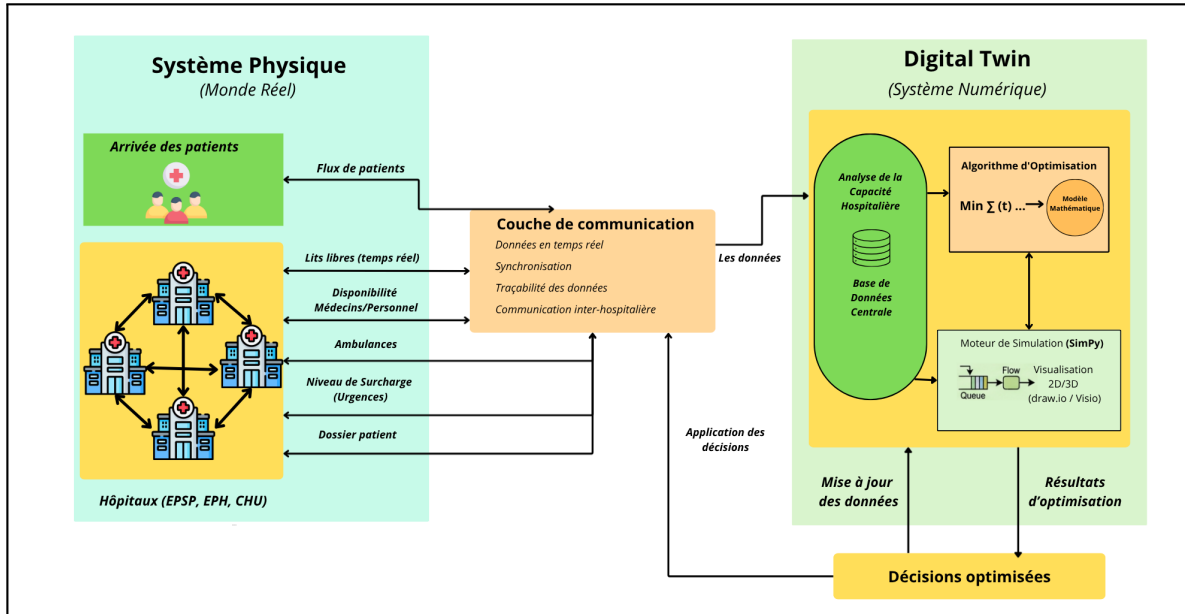


FIGURE 4.1 – Architecture globale du jumeau numérique proposé pour le réseau hospitalier

Comme le montre la figure 4.1, l'architecture proposée est composée de trois parties principales. La première partie représente le système physique, c'est-à-dire le réseau hospitalier réel avec les hôpitaux, les patients, les lits, les ambulances, les services médicaux et le personnel. La deuxième partie correspond à la couche de communication, qui assure la transmission et la synchronisation des données entre le système réel et le système numérique. La troisième partie représente le Digital Twin, qui contient la base de données, l'algorithme de décision dynamique, le moteur de simulation et l'interface de visualisation.

Cette organisation en système physique, couche de communication et système numérique s'inspire des architectures de jumeaux numériques appliquées aux systèmes hospitaliers. Dans ce type d'approche, les données issues du terrain sont collectées, centralisées puis exploitées par le système virtuel afin de soutenir la décision et d'améliorer la gestion des ressources hospitalières (Han et al., 2023 ; Zheng et al., 2025).

Le principe général consiste à collecter les informations provenant du système physique, à les transmettre vers la couche de communication, puis à les exploiter dans le jumeau numérique afin de produire des décisions d'orientation et de transfert des patients. Ces décisions peuvent ensuite être visualisées, analysées et appliquées dans le système réel. Cette boucle entre le monde réel et le monde virtuel permet au jumeau numérique de suivre l'évolution du réseau hospitalier et de s'adapter aux changements de charge.

Dans cette architecture, le système physique regroupe les hôpitaux, les patients, les lits disponibles, les ambulances, les médecins, le personnel médical, les services hospitaliers et les dossiers patients. Ces éléments représentent les ressources et les flux réels du réseau hospitalier. Les données issues de ce système permettent d'alimenter le système numérique.

La couche de communication joue le rôle d'intermédiaire entre le monde réel et le monde virtuel. Elle assure la transmission des données nécessaires à la simulation, comme les arrivées des patients, les disponibilités des lits, les capacités des services, les ambulances disponibles et l'état de charge des hôpitaux. Dans le cadre de ce travail, cette couche est représentée de manière conceptuelle, car les données sont introduites dans le programme de simulation à partir des fichiers du projet.

Le système numérique, ou Digital Twin, est composé de plusieurs modules. Le premier module correspond à la base de données centrale, qui contient les informations fixes du réseau hospitalier, comme les hôpitaux, les services, les lits, les ambulances, les capacités des services et les temps moyens de transfert. Le deuxième module correspond à l'algorithme de décision dynamique, qui choisit l'hôpital final le plus adapté pour chaque patient. Le troisième module correspond au moteur de simulation à événements discrets, qui reproduit l'évolution du système dans le temps. Ce choix est cohérent avec les travaux de Karakra et al. (2019), qui proposent un jumeau numérique basé sur la simulation pour représenter les parcours patients à l'hôpital. Enfin, le dernier module correspond à l'interface de visualisation, qui permet de suivre les patients, les hôpitaux, les transferts et les indicateurs de performance.

L'architecture proposée permet donc de représenter le fonctionnement hospitalier sous une forme dynamique. Elle ne se limite pas à une décision unique prise au début de l'horizon de planification, mais permet de suivre l'évolution du système au fur et à mesure de l'arrivée des patients. Cette approche est plus adaptée à un contexte hospitalier réel, où les demandes de soins apparaissent progressivement et où les ressources disponibles peuvent évoluer dans le temps.

4.2.1 Interactions entre le système physique et le système virtuel

Les interactions entre le système physique et le système virtuel constituent le principe fondamental du jumeau numérique. Le système physique fournit les données nécessaires au fonctionnement de la simulation, tandis que le système virtuel traite ces données et produit des informations utiles pour l'aide à la décision.

Dans le cas étudié, le système physique est représenté par le réseau hospitalier de Tlemcen. Les principales informations échangées concernent les arrivées de patients, les hôpitaux d'origine, les besoins médicaux, la criticité des patients, le besoin éventuel d'un lit, les services disponibles, les ambulances et les capacités d'accueil des établissements.

Le système virtuel reçoit ces informations et les utilise pour créer une représentation numérique du patient et de son parcours. Lorsqu'un patient arrive dans le système, le jumeau numérique identifie son hôpital d'origine, son niveau de criticité, les services médicaux dont il a besoin et la nécessité éventuelle d'une hospitalisation. Ensuite, l'algorithme de décision dynamique évalue les hôpitaux capables de prendre en charge ce patient.

Cette évaluation tient compte de plusieurs éléments : la disponibilité des services requis, le temps de transfert entre l'hôpital d'origine et l'hôpital candidat, la charge actuelle de l'hôpital, l'attente estimée dans les services, la disponibilité des lits et l'impact du transfert sur les patients critiques. Le système virtuel choisit ensuite l'hôpital final le plus adapté selon ces critères.

Une fois la décision prise, la simulation reproduit le parcours du patient. Le patient passe par plusieurs étapes : arrivée, préparation, éventuel transfert en ambulance, attente avant service, prise en charge dans les services médicaux, éventuelle occupation d'un lit, puis sortie du système. À chaque étape, l'état du patient est mis à jour dans l'interface.

L'interaction entre les deux systèmes peut donc être résumée de la manière suivante : le système physique fournit les données d'entrée, le système virtuel simule le comportement du réseau, puis les résultats obtenus permettent d'analyser l'état du système et de soutenir la prise de décision.

4.2.2 Flux de données et logique de décision

Le flux de données du jumeau numérique commence par l'arrivée d'un patient dans le réseau hospitalier. Chaque patient est caractérisé par un identifiant, un hôpital d'origine, un niveau de criticité, un besoin éventuel de lit, un seuil maximal souhaité pour les patients critiques et un parcours médical composé d'un ou de plusieurs services.

Ces données sont ensuite transmises au module de décision dynamique. Ce module commence par vérifier les hôpitaux capables de satisfaire le parcours médical du patient. Un hôpital est considéré comme admissible uniquement s'il dispose de tous les services requis par le patient. Si plusieurs hôpitaux sont admissibles, le système compare leurs performances estimées.

La logique de décision repose sur une estimation du temps total de prise en charge. Cette estimation inclut le temps de préparation, le temps de transfert, la durée des services médicaux, l'attente estimée devant les services, l'attente éventuelle des ambulances, la disponibilité des lits et la charge actuelle de l'hôpital. Pour les patients critiques, le système ajoute une pénalité lorsque l'attente estimée risque de dépasser le seuil maximal souhaité.

Après cette évaluation, l'hôpital ayant le meilleur score est choisi comme hôpital final. Si l'hôpital final est différent de l'hôpital d'origine, un transfert est déclenché. Le patient utilise alors une ambulance de l'hôpital de départ, puis arrive dans l'hôpital final pour poursuivre son parcours de soins.

Pendant la simulation, les données sont mises à jour en continu. La charge des hôpitaux évolue selon les arrivées et les sorties des patients. Les files d'attente changent selon la disponibilité des services. Les lits et les ambulances sont occupés puis libérés au fil du temps. Ces informations alimentent l'interface graphique et permettent de suivre l'évolution du réseau hospitalier.

Ainsi, la logique de décision du jumeau numérique reprend l'esprit du modèle mathématique exact présenté dans le chapitre précédent, mais elle l'adapte à un contexte dynamique. Au lieu de résoudre un modèle global pour un ensemble fixe de patients, le système prend des décisions progressivement, en fonction de l'état courant du réseau hospitalier.

4.3 Environnement de développement et outils logiciels

Le jumeau numérique proposé a été développé sous Python, qui constitue le langage principal de l'application. Ce choix se justifie par la flexibilité de Python, sa simplicité d'écriture et la disponibilité de bibliothèques adaptées à la simulation, à la visualisation et au traitement des données. Dans ce travail, Python est utilisé pour définir les données du réseau hospitalier, générer les patients, appliquer la logique de décision, exécuter la simulation et afficher les résultats à travers une interface graphique.

La simulation dynamique repose sur la bibliothèque SimPy. SimPy est une bibliothèque Python destinée à la simulation à événements discrets, dans laquelle le comportement des entités actives peut être représenté sous forme de processus évoluant dans un environnement de simulation. Elle permet également de modéliser des ressources partagées, comme les services médicaux, les lits et les ambulances. Ce choix est adapté au cas étudié, car le système hospitalier fonctionne selon une succession d'événements : arrivée d'un patient, préparation, attente, transfert, prise en charge dans un service, occupation d'un lit et sortie du système.

L'interface graphique a été développée avec PyQt5. PyQt5 fournit des liaisons Python pour Qt et permet de construire des applications graphiques interactives. Dans ce travail, cette bibliothèque est utilisée pour créer la fenêtre principale de simulation, les boutons de contrôle, les tableaux de suivi, les indicateurs de performance, les fenêtres de détail des hôpitaux et la carte 2D du réseau hospitalier.

Une visualisation 3D a également été intégrée au prototype. Cette vue repose sur PyQtWebEngine et QWebChannel, qui permettent d'intégrer une interface HTML et JavaScript dans une application PyQt5 et de synchroniser les données entre Python et la vue graphique. Cette visualisation permet de représenter les hôpitaux sous forme de bâtiments, d'afficher la charge de chaque établissement, de visualiser les patients actifs et de suivre les transferts entre hôpitaux.

Les résultats de simulation peuvent être exportés sous forme de fichier Excel. Cette fonctionnalité permet de sauvegarder les informations relatives aux patients simulés, comme l'hôpital d'origine, l'hôpital final, le temps d'arrivée, le temps de sortie, le temps de séjour, l'attente totale, le besoin de lit, la criticité, le respect du seuil W_{max} et l'existence d'un transfert. L'exportation facilite ensuite l'analyse des résultats et leur intégration dans le rapport.

L'application est organisée en plusieurs fichiers Python, chacun ayant un rôle précis. Le fichier `main.py` constitue le point d'entrée de l'application. Il initialise l'application PyQt5, applique la palette graphique et lance la fenêtre principale. Le fichier `data.py` contient les données fixes du réseau hospitalier, notamment les hôpitaux, les services, les capacités, les lits, les ambulances, les temps de transfert et les parcours types. Le fichier `model.py` regroupe les fonctions de génération des patients et l'algorithme greedy de décision dynamique. Le fichier `simulation.py` contient le moteur de simulation à événements discrets, l'interface principale, les ressources SimPy et la gestion des événements. Enfin, le fichier `view3d.py` contient la visualisation 3D et le mécanisme de synchronisation entre Python et l'interface web intégrée.

Ainsi, l'environnement de développement combine plusieurs outils complémentaires. Python assure la logique générale du système, SimPy permet la simulation dynamique, PyQt5 fournit l'interface graphique, PyQtWebEngine et QWebChannel assurent l'intégration de la vue 3D, et Excel facilite l'exploitation des résultats. Cette combinaison permet de construire un prototype de jumeau numérique capable de représenter le comportement du réseau hospitalier de manière interactive et dynamique.

4.4 Logique de fonctionnement de la simulation et algorithme Greedy

La simulation développée dans ce travail repose sur une approche dynamique à événements discrets. Contrairement au modèle exact présenté dans le chapitre précédent, la simulation ne considère pas tous les patients dès le début de l'horizon de planification. Les patients arrivent progressivement dans le système, selon le temps de simulation, et chaque patient est traité comme une entité active qui suit un parcours de soins.

Lorsqu'un patient arrive dans le réseau hospitalier, le système génère ou reçoit ses informations principales : l'identifiant du patient, l'hôpital d'origine, le niveau de criticité, le besoin éventuel d'un lit, le seuil maximal souhaité W_{max} pour les patients critiques et la liste des services médicaux requis. Ces informations permettent au jumeau numérique de construire le parcours du patient dans le système.

Le fonctionnement général de la simulation peut être résumé en plusieurs étapes. D'abord, le patient arrive dans son hôpital d'origine. Ensuite, il passe par une phase de préparation. Après cette phase, le système décide si le patient doit rester dans son hôpital d'origine ou être transféré vers un autre hôpital. Cette décision est prise à l'aide d'un algorithme greedy d'affectation dyna-

mique. Si un transfert est nécessaire, le patient attend une ambulance disponible, puis se déplace vers l'hôpital final choisi. Une fois arrivé, il passe par les services médicaux requis dans son parcours. Si le patient nécessite une hospitalisation, il attend un lit disponible, l'occupe pendant une durée donnée, puis quitte le système.

4.4.1 Principe général de la simulation à événements discrets

La simulation à événements discrets permet de représenter l'évolution du système hospitalier dans le temps. Dans cette approche, le temps avance d'un événement à un autre. Chaque événement correspond à une action importante dans le parcours du patient, par exemple l'arrivée, le début de préparation, le début du transfert, l'entrée dans un service, la fin d'un service, l'occupation d'un lit ou la sortie du patient.

Les ressources hospitalières sont représentées sous forme de ressources limitées. Les services médicaux sont modélisés comme des ressources pouvant traiter un nombre limité de patients en parallèle. Les lits sont représentés par des ressources hospitalières disponibles dans chaque établissement. Les ambulances sont également modélisées comme des ressources limitées rattachées à l'hôpital d'origine.

Lorsqu'un patient demande une ressource occupée, il doit attendre dans une file d'attente. Par exemple, si un service médical est saturé, le patient attend jusqu'à ce qu'une place se libère. De la même façon, si une ambulance ou un lit n'est pas disponible, le patient reste en attente jusqu'à la disponibilité de cette ressource.

Cette logique permet de représenter le fonctionnement réel d'un système hospitalier de manière plus flexible qu'un modèle statique. La charge des hôpitaux, les files d'attente, les ressources occupées et les patients actifs évoluent en continu pendant la simulation.

4.4.2 Algorithme greedy d'affectation dynamique des patients

L'affectation dynamique des patients repose sur un algorithme de type greedy. Un algorithme greedy consiste à prendre, à chaque étape, la meilleure décision immédiate selon l'état courant du système. Ce principe est largement utilisé dans les problèmes d'optimisation combinatoire, où une décision locale est prise progressivement afin de construire une solution. Edmonds (1971) a notamment étudié les conditions dans lesquelles une approche greedy peut produire une solution optimale dans certaines structures mathématiques particulières.

Dans le cas étudié, l'algorithme greedy ne cherche pas à optimiser globalement tous les patients du système comme dans une résolution exacte. Il choisit plutôt l'hôpital final le plus adapté pour le patient courant, en fonction des informations disponibles au moment de son arrivée. Cette logique est adaptée au fonctionnement dynamique d'un jumeau numérique, car les patients arrivent progressivement et l'état du réseau hospitalier change au cours du temps.

Le principe de l'algorithme est le suivant. Pour chaque patient, le système commence par identifier les hôpitaux capables de fournir tous les services médicaux requis. Un hôpital est donc considéré comme admissible seulement si tous les services du parcours du patient sont disponibles dans cet hôpital.

Ensuite, pour chaque hôpital admissible, le système calcule un score estimé de prise en charge. Ce score regroupe plusieurs composantes : le temps de préparation du patient, le temps de transfert si l'hôpital final est différent de l'hôpital d'origine, la durée totale des services médicaux, l'attente estimée devant les services, l'attente éventuelle d'une ambulance, l'attente éventuelle d'un lit, la charge actuelle de l'hôpital et l'occupation des ressources.

Pour les patients critiques, l'algorithme ajoute une attention particulière au risque de dépassement du seuil W_{max} . Si l'attente estimée dépasse ce seuil, une pénalité importante est ajoutée

au score. Cela permet d'éviter, autant que possible, d'orienter un patient critique vers un hôpital où il risque d'attendre trop longtemps.

Après le calcul des scores, l'algorithme choisit l'hôpital ayant le score le plus faible. Ce choix correspond à la meilleure décision immédiate selon l'état courant du système. Si l'hôpital choisi est différent de l'hôpital d'origine, un transfert est déclenché. Sinon, le patient est pris en charge sur place.

Cette approche greedy est adaptée à une simulation dynamique, car elle permet de prendre rapidement une décision à chaque arrivée de patient. Elle est plus légère qu'une résolution exacte globale et peut être utilisée en temps réel dans le jumeau numérique. Cependant, elle ne garantit pas forcément une solution globalement optimale pour tous les patients, car chaque décision est prise localement, selon l'état du système au moment de l'arrivée du patient.

4.4.3 Pseudo-code de l'algorithme Greedy

Le pseudo-code suivant présente la logique générale de l'algorithme greedy utilisé pour l'affectation dynamique des patients.

Algorithm 1 Algorithme greedy d'affectation dynamique des patients

Require: Patient p , hôpital d'origine h_{origin} , parcours médical $Parcours_p$, état courant du réseau

Ensure: Hôpital final h^*

```
1: Identifier les hôpitaux admissibles :  
    $H_{adm} \leftarrow \{h \in H \mid \text{tous les services de } Parcours_p \text{ sont disponibles dans } h\}$   
2: if  $H_{adm}$  est vide then  
3:   Choisir l'hôpital qui couvre le plus grand nombre de services requis  
4: end if  
5: for chaque hôpital  $h \in H_{adm}$  do  
6:   Calculer le temps de préparation  $T_{prep}$   
7:   Calculer le temps de transfert  $T_{tr}$  entre  $h_{origin}$  et  $h$   
8:   Estimer l'attente devant les services médicaux  
9:   Calculer la durée totale des services du parcours  
10:  Estimer l'attente ambulance si  $h \neq h_{origin}$   
11:  Estimer l'attente lit si le patient a besoin d'un lit  
12:  Calculer la charge actuelle de l'hôpital  
13:  Calculer le score :  
      $Score(h) = T_{prep} + T_{tr} + AttenteServices + DureeServices$   
        $+ AttenteAmbulance + AttenteLit + PenaliteCharge$   
14:  if le patient est critique then  
15:    Ajouter une pénalité si le risque de dépassement de  $W_{max}$  existe  
16:  end if  
17: end for  
18: Choisir l'hôpital avec le score minimal :  
      $h^* \leftarrow \arg \min_{h \in H_{adm}} Score(h)$   
19: if  $h^* \neq h_{origin}$  then  
20:   Déclencher un transfert par ambulance vers  $h^*$   
21: else  
22:   Prendre en charge le patient sur place  
23: end if  
24: return  $h^*$ 
```

Ce pseudo-code montre que l'algorithme greedy prend une décision locale pour chaque patient, en fonction de l'état instantané du système. Il ne garantit pas une optimisation globale sur tous les patients, mais il permet une décision rapide, cohérente et adaptée au fonctionnement dynamique d'un jumeau numérique hospitalier.

4.5 Exécution de la simulation et élaboration des scénarios

Après la conception de l'architecture du jumeau numérique et la définition de la logique de décision greedy, cette section présente la manière dont la simulation est exécutée. L'objectif est d'expliquer le fonctionnement pratique de l'application, les paramètres utilisés, les modes d'exécution disponibles, les principales interfaces graphiques et les scénarios simulés pour analyser le comportement du réseau hospitalier.

La simulation est lancée à partir du fichier principal `main.py`. Ce fichier initialise l'application graphique, applique la configuration visuelle de l'interface et ouvre la fenêtre principale du jumeau numérique. Une fois l'application lancée, l'utilisateur peut définir les paramètres de simulation, démarrer l'exécution, suivre l'évolution des patients, visualiser l'état des hôpitaux et exporter les résultats obtenus.

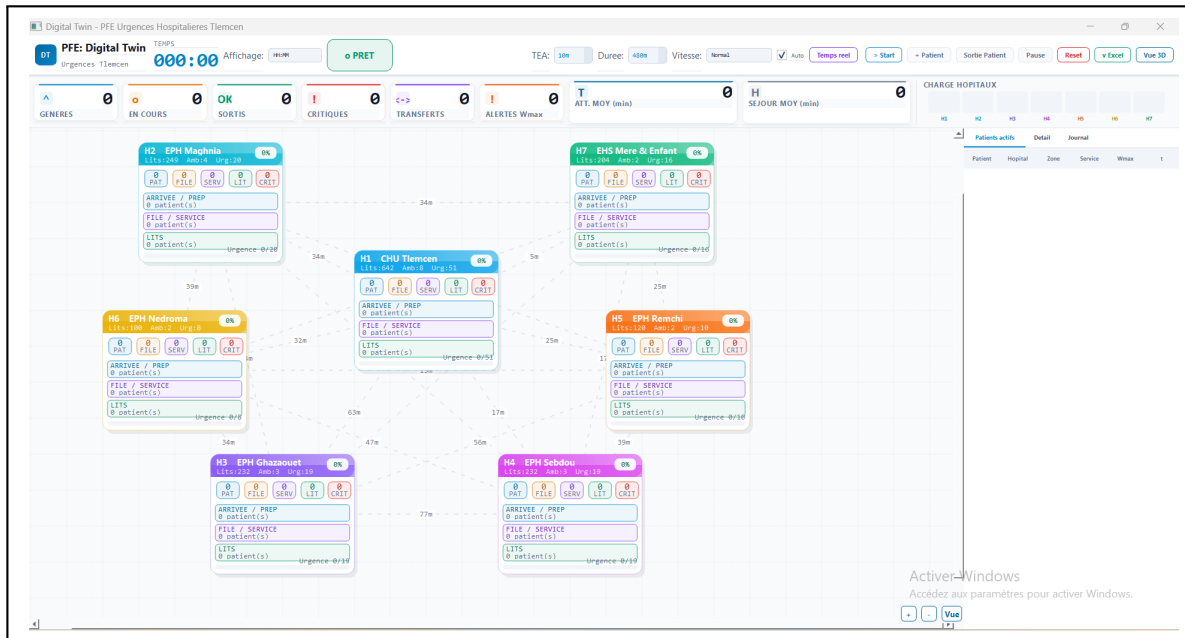


FIGURE 4.2 – Interface principale de la simulation en vue 2D

La figure 4.2 représente l'interface principale qui apparaît après l'exécution de l'application. Cette interface regroupe les paramètres de simulation, les boutons de contrôle, les indicateurs de performance, la carte 2D du réseau hospitalier et le panneau de suivi des patients actifs. Elle constitue l'écran principal à partir duquel l'utilisateur pilote le jumeau numérique.

4.5.1 Paramètres d'exécution de la simulation

Plusieurs paramètres sont utilisés pour contrôler le fonctionnement de la simulation. Le premier paramètre est le temps moyen entre deux arrivées de patients, noté TEA dans l'interface. Il représente l'intervalle moyen séparant l'arrivée de deux patients successifs. Une valeur faible de ce paramètre signifie que les patients arrivent plus rapidement, ce qui augmente la charge du système hospitalier.

Le deuxième paramètre est la durée de simulation. Elle permet de définir l'horizon temporel observé. Dans le prototype développé, la durée peut être fixée en minutes. Par exemple, une durée de 480 minutes représente une journée de simulation de huit heures.

Le troisième paramètre est la vitesse d'exécution. L'application propose plusieurs modes de vitesse, notamment le mode lent, normal, rapide, maximal et temps réel. Le mode maximal permet d'obtenir rapidement les résultats d'un scénario, tandis que le mode temps réel permet de suivre progressivement l'évolution du système, comme dans une situation opérationnelle.

Le mode automatique permet de générer les patients automatiquement pendant la simulation. Dans ce cas, les patients sont créés selon une logique probabiliste et possèdent un hôpital d'origine, un parcours médical, un niveau de criticité, un besoin éventuel de lit et un seuil W_{max} pour les patients critiques. Ce mode est utile pour tester le comportement global du système dans différents niveaux de charge.

4.5.2 Mode temps réel, ajout et sortie manuelle des patients

Le mode temps réel représente un élément essentiel dans le fonctionnement du jumeau numérique. En effet, un jumeau numérique ne se limite pas à une simulation statique exécutée une seule fois ; il doit permettre de suivre l'état du système au fur et à mesure de son évolution. Dans le cas du réseau hospitalier étudié, cela signifie que les arrivées des patients, les changements d'état, les transferts, l'occupation des ressources et les sorties doivent pouvoir être observés et mis à jour pendant l'exécution de la simulation.

Dans le prototype développé, le temps réel est représenté par une exécution interactive de la simulation. L'utilisateur peut suivre l'évolution du système à travers l'interface graphique, observer les patients actifs, visualiser l'état des hôpitaux, contrôler la vitesse de simulation et introduire manuellement de nouveaux patients. Cette logique permet de rapprocher le fonctionnement du prototype d'un environnement réel, dans lequel les informations arrivent progressivement et les décisions doivent être prises au moment opportun.

Le mode temps réel permet donc de créer une boucle dynamique entre les données, la décision et la visualisation. Lorsqu'un patient est ajouté dans le système, ses informations sont directement prises en compte par le jumeau numérique. L'algorithme greedy analyse alors l'état courant du réseau hospitalier, vérifie les hôpitaux capables de fournir les services requis, estime les temps de prise en charge et choisit l'hôpital final le plus adapté. Cette décision est ensuite affichée dans l'interface, ce qui permet à l'utilisateur de suivre le parcours du patient.

The screenshot shows a web-based interface for adding a patient. The main window is titled 'Ajouter un patient réel' and contains a form with the following fields and options:

- ID / Identifiant patient unique ***: A text input field containing 'P1'.
- Hopital d'arrivee / origine**: A dropdown menu with 'H1 - CHU Tlemcen' selected.
- ✓ Patient critique**: A checked checkbox.
- ✓ Besoin d'un lit**: A checked checkbox.
- Wmax si patient critique**: A text input field containing '10 min'.
- Services requis, dans l'ordre choisi**: A list of services with checkboxes:
 - S1 - REA
 - ✓ S2 - CARD
 - S3 - CHIR
 - S4 - MED
 - S5 - PEDIA
 - S6 - RADIO
 - ✓ S7 - SCAN
 - S8 - LABO
 - S9 - ECHO
 - S10 - GYN

At the bottom, there is a note: 'Conseil: coche LABO, RADIO, SCAN, CHIR... selon le besoin medical du patient.' and two buttons: 'Annuler' and 'Ajouter au systeme'.

FIGURE 4.3 – Fenêtre d'ajout manuel d'un patient dans le jumeau numérique

La figure 4.3 montre la fenêtre d'ajout manuel d'un patient. L'utilisateur peut saisir l'identifiant du patient, choisir son hôpital d'origine, indiquer s'il s'agit d'un patient critique, préciser s'il a besoin d'un lit, définir le seuil $W_{\max}$ et sélectionner les services médicaux requis. Une fois ces informations validées, le patient est intégré dans la simulation et l'algorithme greedy choisit

dynamiquement son hôpital final.

Cette fonctionnalité illustre l'intérêt du jumeau numérique en temps réel. Au lieu d'attendre la fin de la simulation pour analyser les résultats, le système permet d'observer immédiatement l'effet d'une nouvelle arrivée sur l'état du réseau. Par exemple, l'ajout d'un patient critique peut modifier la charge d'un hôpital, augmenter l'utilisation des ressources ou déclencher un transfert vers un autre établissement. Le tableau de bord, la carte 2D et la vue 3D sont alors mis à jour afin de refléter la nouvelle situation.

Le système permet également de gérer la sortie manuelle d'un patient actif. Cette fonctionnalité est utile pour représenter une situation dans laquelle un patient quitte le système ou lorsque l'utilisateur souhaite terminer son parcours dans la simulation. Elle permet donc de maintenir une interaction directe entre l'utilisateur et le jumeau numérique.

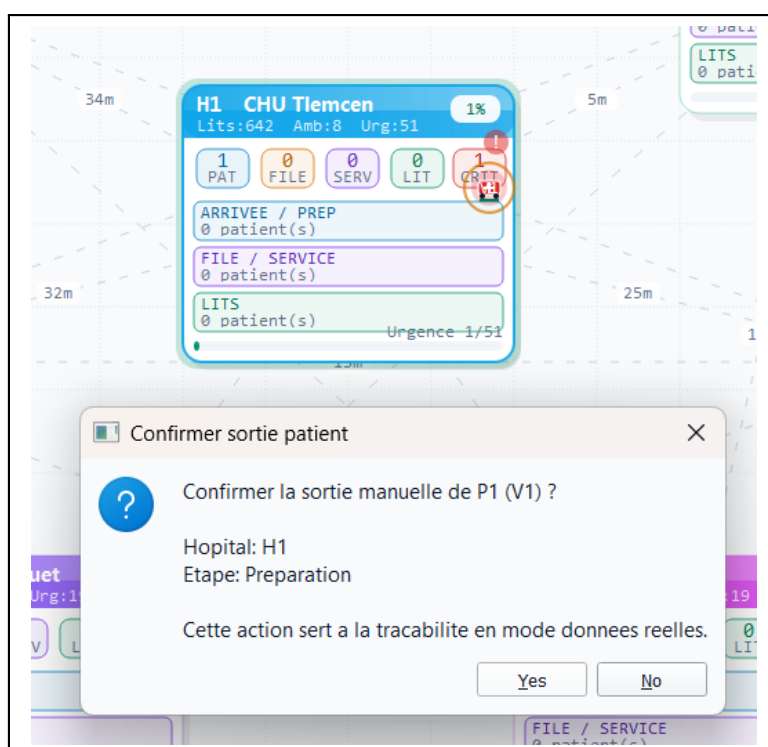


FIGURE 4.4 – Fenêtre de sortie manuelle d'un patient

La figure 4.4 présente la fenêtre de sortie manuelle d'un patient. L'utilisateur peut sélectionner un patient actif et demander sa sortie du système. Cependant, cette sortie n'est pas autorisée dans toutes les situations. Si le patient est en cours de traitement dans un service médical, en transfert par ambulance ou en occupation d'un lit, il ne peut pas être sorti directement du système. Cette règle permet d'éviter une sortie incohérente pendant une étape importante du parcours de soins.

Ainsi, le mode temps réel ne sert pas seulement à afficher la simulation. Il permet aussi de faire évoluer le système, d'ajouter de nouvelles informations, de mettre à jour les décisions et de suivre l'effet de ces décisions sur les ressources hospitalières. Cette capacité d'interaction et de mise à jour continue constitue l'un des principaux apports du jumeau numérique proposé.

4.5.3 Visualisation du réseau hospitalier

Le jumeau numérique développé permet de visualiser le réseau hospitalier sous deux formes principales : une carte 2D et une vue 3D. La carte 2D représente les hôpitaux, les routes de

transfert, les patients actifs, les zones internes et les ambulances. Elle permet de suivre l'état du réseau de manière simple et directe.

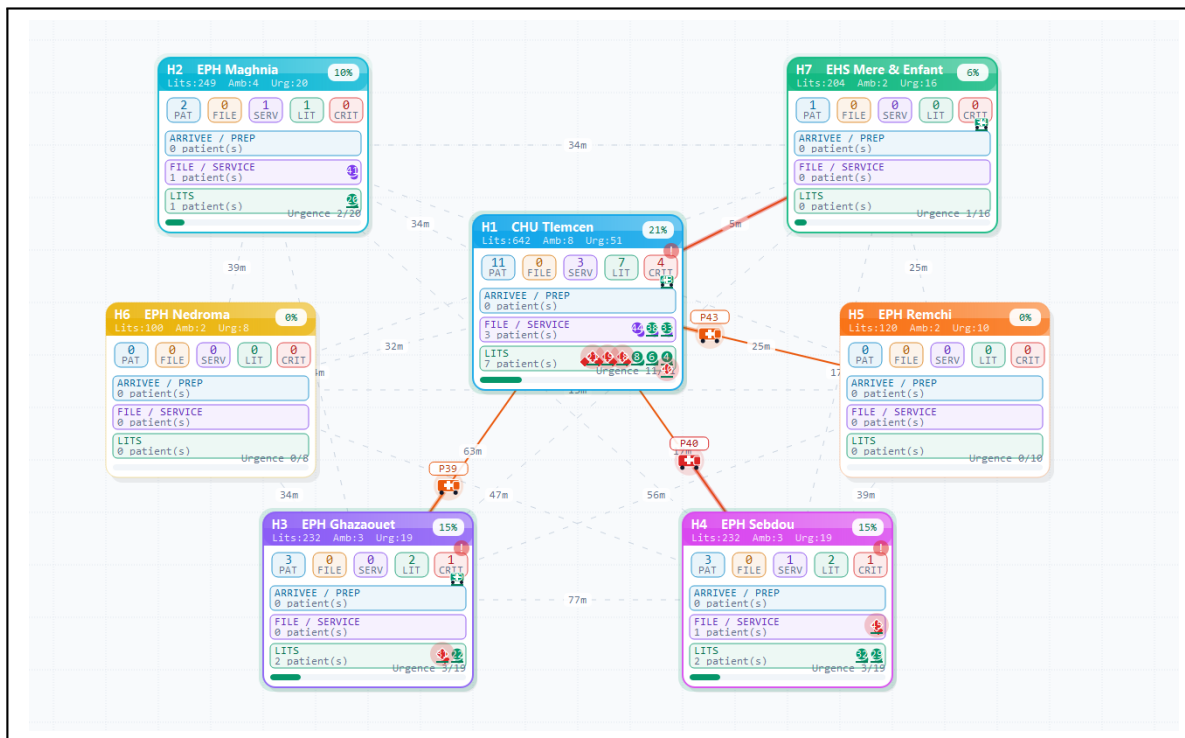


FIGURE 4.5 – Carte 2D du réseau hospitalier simulé

La figure 4.5 présente la carte 2D utilisée pour suivre le comportement du réseau hospitalier. Chaque hôpital est représenté par une carte contenant ses informations principales, comme le nombre de patients actifs, la capacité opérationnelle, les lits, les ambulances et l'occupation des zones internes. Cette vue permet aussi de suivre les transferts entre les établissements.

Lorsqu'un hôpital est sélectionné dans la carte 2D, une fenêtre de détail s'affiche. Elle permet de consulter les informations internes de l'établissement, les patients actifs, les zones de prise en charge, les services disponibles et l'état des ressources.

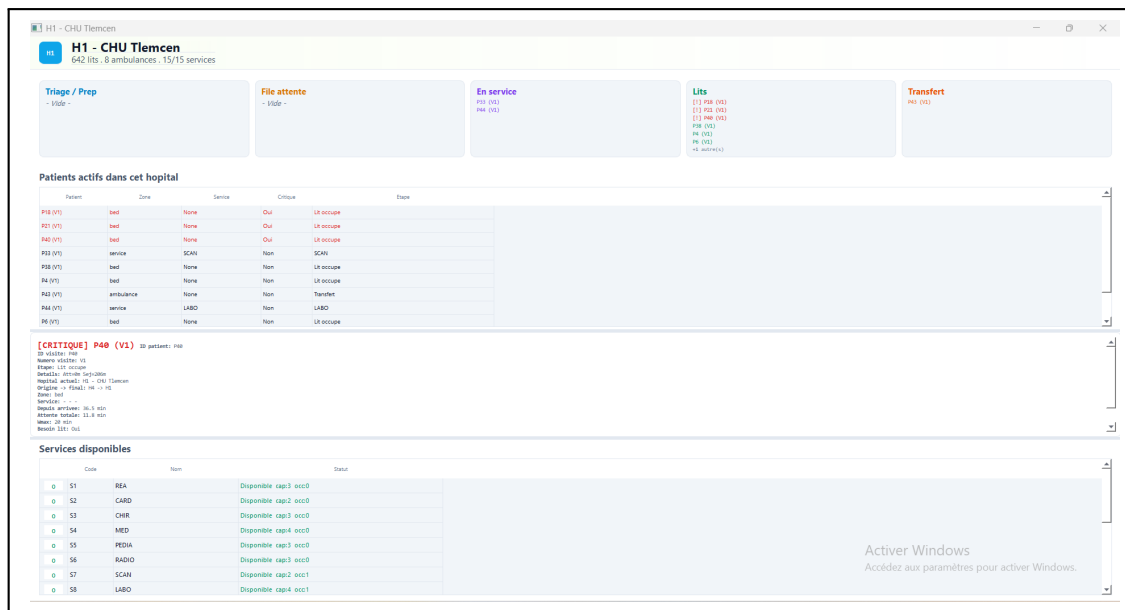


FIGURE 4.6 – Fenêtre de détail d'un hôpital dans la vue 2D

La figure 4.6 présente la fenêtre de détail affichée lorsqu'un hôpital est sélectionné dans la carte 2D. Cette fenêtre permet de consulter les patients actifs dans l'établissement, les zones internes, les services disponibles, les capacités et l'occupation des ressources. Elle offre ainsi une vision plus détaillée de l'état d'un hôpital donné pendant la simulation.

La vue 3D offre une représentation plus visuelle du jumeau numérique. Elle permet d’observer les hôpitaux sous forme de bâtiments, d’afficher la charge de chaque établissement et de suivre les patients actifs ainsi que les transferts entre hôpitaux.

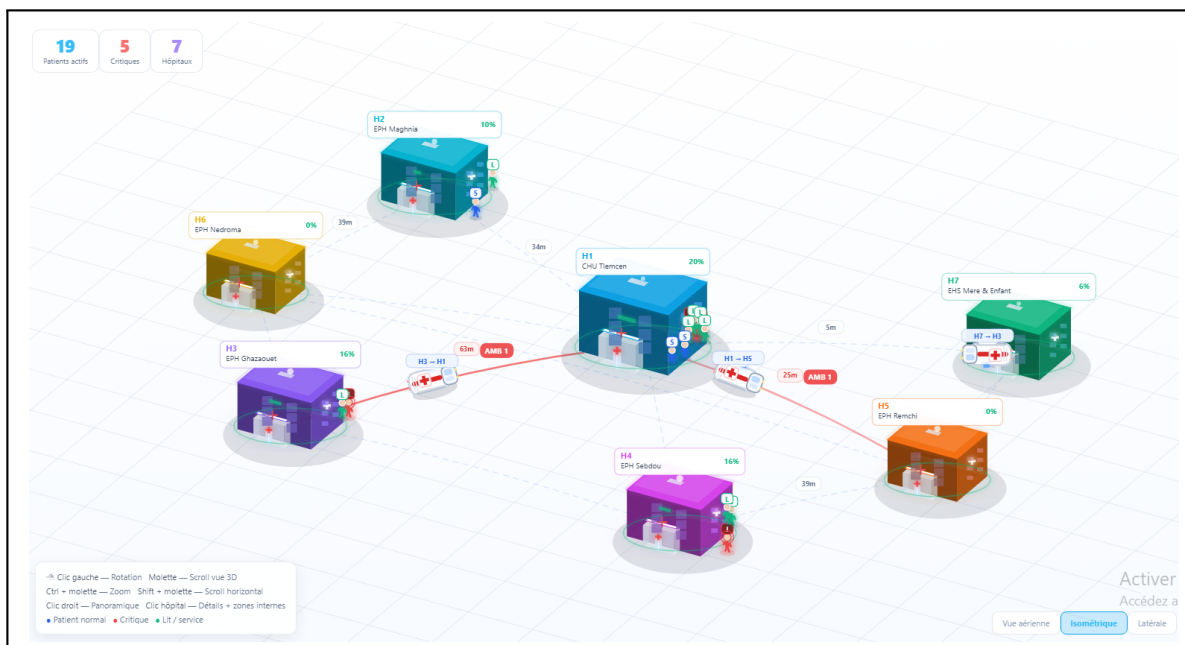


FIGURE 4.7 – Visualisation 3D du jumeau numérique hospitalier

La figure 4.7 montre la vue 3D du jumeau numérique. Cette visualisation améliore la compréhension du système simulé, car elle permet d’observer rapidement les hôpitaux les plus chargés,

les patients critiques et les transferts en cours. Elle donne une représentation plus intuitive du fonctionnement global du réseau hospitalier.

Dans la vue 3D, il est également possible de cliquer sur un hôpital afin d'afficher un panneau de détail. Ce panneau présente la charge de l'établissement, sa capacité, ses services disponibles, ses zones internes et les patients présents dans l'hôpital.



FIGURE 4.8 – Panneau de détail d'un hôpital dans la vue 3D

La figure 4.8 montre le panneau de détail associé à la vue 3D. Lorsqu'un hôpital est sélectionné, le système affiche ses principaux indicateurs en temps réel, notamment le nombre de patients actifs, la capacité, le taux d'occupation, les services disponibles et la répartition des patients dans les différentes zones internes.

4.5.4 Scénarios de simulation

Afin d'analyser le comportement du jumeau numérique, plusieurs scénarios peuvent être testés. Les scénarios sont construits en modifiant principalement le temps moyen entre les arrivées des patients et la durée de simulation. Ces paramètres permettent de représenter différents niveaux de charge du réseau hospitalier.

Dans ce travail, trois scénarios sont proposés. Le premier scénario représente une charge normale, avec un temps moyen entre arrivées relativement élevé. Le deuxième scénario représente une charge moyenne, où les patients arrivent plus fréquemment. Le troisième scénario représente

une charge élevée, dans laquelle les arrivées sont plus rapprochées, ce qui augmente la pression sur les services, les lits et les ambulances.

Scénario	TEA	Durée	Objectif du scénario
Scénario 1	15 min	480 min	Observer le comportement du réseau avec une charge normale.
Scénario 2	10 min	480 min	Évaluer le comportement du système avec une charge moyenne.
Scénario 3	5 min	480 min	Tester le jumeau numérique dans une situation de forte charge.

TABLE 4.1 – Scénarios proposés pour l’exécution de la simulation

Ces scénarios permettent d’étudier l’évolution des indicateurs de performance lorsque la pression sur le réseau hospitalier augmente. Plus le TEA est faible, plus les patients arrivent rapidement, ce qui peut entraîner une augmentation des files d’attente, des transferts, du nombre de patients critiques en retard et du temps moyen de séjour.

4.5.5 Indicateurs collectés pendant la simulation

Pendant l’exécution, la simulation collecte plusieurs indicateurs permettant d’évaluer la performance du système hospitalier. Ces indicateurs sont affichés dans l’interface et peuvent être exportés vers un fichier Excel pour une analyse plus détaillée.

Les principaux indicateurs suivis sont : le nombre total de patients générés, le nombre de patients en cours de traitement, le nombre de patients sortis, le nombre de patients critiques, le nombre de transferts, le nombre d’alertes liées au dépassement du seuil W_{max} , l’attente moyenne et le temps moyen de séjour.

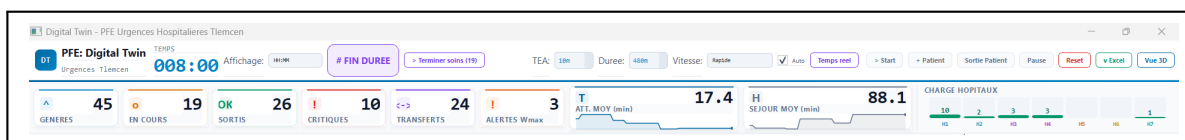


FIGURE 4.9 – Tableau de bord des indicateurs de simulation

La figure 4.9 montre le tableau de bord de la simulation. Ces indicateurs permettent de suivre l’état global du système et d’évaluer l’effet des décisions d’affectation dynamique sur la performance du réseau hospitalier. Ils facilitent aussi la comparaison entre les différents scénarios simulés.

Les résultats obtenus peuvent être sauvegardés sous forme d’un fichier Excel. Ce fichier contient les informations détaillées de chaque patient, comme l’hôpital d’origine, l’hôpital final, le temps d’arrivée, le temps de sortie, le temps de séjour, l’attente totale, le besoin de lit, la criticité, le respect du seuil W_{max} et l’existence d’un transfert.

Patient	Statut	Origine	Hôpital final	Transfert	$W_{\max}$ respecté	Séjour total	Parcours
P1	Normal	H3	H3	Non	Oui	01 :35	LABO → RADIO → SCAN → CHIR
P4	Critique	H1	H1	Non	Oui	00 :45	LABO → MED → CHIR
P3	Critique	H3	H2	Oui	Non	02 :54	LABO → PNEUMO
P24	Critique	H5	H1	Oui	Non	03 :33	LABO → NEURO
P36	Critique	H2	H2	Non	Oui	00 :30	LABO → MED
P50	Critique	H1	H1	Non	Oui	04 :32	RADIO → SCAN → ORTHO → CHIR

TABLE 4.2 – Extrait des résultats exportés vers Excel

Le tableau 4.2 présente un extrait des résultats exportés vers Excel. Il illustre la structure des informations sauvegardées pour chaque patient, notamment le statut, l'hôpital d'origine, l'hôpital final, l'existence d'un transfert, le respect éventuel du seuil $W_{\max}$, la durée totale de séjour ainsi que le parcours médical suivi. Cet extrait permet de visualiser concrètement la nature des données produites par le jumeau numérique sans surcharger le document avec l'ensemble du fichier exporté.

Cette étape d'exécution permet donc de générer les données nécessaires à l'évaluation du jumeau numérique. Les indicateurs obtenus, notamment les patients sortis, les transferts réalisés, les patients critiques, les dépassements de $W_{\max}$, l'attente moyenne et le séjour moyen, seront analysés dans la section suivante afin d'évaluer les performances du système simulé.

4.6 Résultats de la simulation et analyse

Cette section présente les résultats obtenus à partir de l'exécution du jumeau numérique hospitalier. L'objectif est d'analyser le comportement du réseau simulé, l'orientation des patients, les transferts réalisés, la prise en charge des patients critiques, les dépassements du seuil $W_{\max}$, ainsi que les principaux indicateurs de performance.

4.6.1 Scénario de base : fonctionnement normal

Le scénario de base représente un fonctionnement normal du réseau hospitalier simulé. Dans ce scénario, les patients arrivent progressivement dans le système, et l'algorithme greedy choisit dynamiquement l'hôpital final le plus adapté selon les services disponibles, la charge actuelle des établissements, les temps de transfert, la disponibilité des ressources et la criticité des patients.

Indicateur	Valeur	Interprétation
Patients sortis	50	Nombre total de patients ayant terminé leur parcours dans la simulation.
Patients critiques	10	Nombre de patients nécessitant une prise en charge prioritaire.
Transferts réalisés	25	Nombre de patients orientés vers un autre hôpital que leur hôpital d'origine.
Sorties manuelles	0	Aucun patient n'a été sorti manuellement dans ce scénario.
Dépassements de W_{max}	4	Nombre de patients critiques ayant dépassé le seuil maximal souhaité.
Attente moyenne	23 min	Temps moyen d'attente observé pendant le parcours des patients.
Séjour moyen	3 h 48 min	Durée moyenne passée par un patient dans le système hospitalier simulé.

TABLE 4.3 – Résultats du scénario de base

Les résultats du scénario de base montrent que le jumeau numérique est capable de traiter 50 patients jusqu'à la fin de leur parcours. Parmi ces patients, 10 sont critiques, ce qui permet de tester la capacité du système à gérer des patients prioritaires. Le nombre de transferts est égal à 25, ce qui représente la moitié des patients sortis. Cela montre que la coordination entre les hôpitaux est importante dans le réseau étudié.

Le nombre de dépassements de W_{max} est égal à 4. Cela signifie que certains patients critiques ont subi une attente supérieure au seuil maximal souhaité. Même si l'algorithme greedy prend en compte la criticité, il ne peut pas toujours éviter les dépassements lorsque les ressources sont occupées ou lorsque le patient doit être orienté vers un hôpital disposant des services nécessaires.

L'attente moyenne est de 23 minutes, tandis que le séjour moyen est de 3 heures et 48 minutes. Cette différence est logique, car le séjour moyen inclut non seulement l'attente, mais aussi la préparation, les transferts, les durées de service et l'occupation éventuelle d'un lit.

4.6.2 Scénario de crise : surcharge des urgences

Le scénario de crise représente une situation de surcharge des urgences. Dans ce type de scénario, le temps moyen entre les arrivées des patients est réduit, ce qui signifie que les patients arrivent plus rapidement dans le réseau hospitalier. Cette situation augmente la pression sur les services, les lits et les ambulances.

Dans une situation de surcharge, plusieurs effets peuvent apparaître. Les files d'attente devant les services médicaux deviennent plus longues, les ambulances peuvent être plus sollicitées, les lits peuvent devenir moins disponibles et les patients critiques risquent davantage de dépasser le seuil W_{max} . Le rôle du jumeau numérique est alors d'observer ces effets et d'aider à mieux orienter les patients selon l'état courant du réseau.

Élément observé	Fonctionnement normal	Situation de crise
Arrivée des patients	Arrivées progressives et espacées.	Arrivées rapprochées et plus fréquentes.
Charge des hôpitaux	Charge généralement maîtrisée.	Risque de surcharge dans certains établissements.
Files d'attente	Attentes limitées.	Attentes plus importantes devant les services.
Ambulances	Disponibilité généralement suffisante.	Risque d'attente avant transfert.
Patients critiques	Dépassements de W_{max} limités.	Risque plus élevé de dépassement de W_{max} .
Décision d'affectation	Orientation selon le meilleur score courant.	Orientation plus difficile à cause de la saturation des ressources.

TABLE 4.4 – Comparaison qualitative entre fonctionnement normal et surcharge

Le scénario de crise permet donc de tester la robustesse du jumeau numérique face à une augmentation de la demande. Il met en évidence les limites du réseau lorsque plusieurs patients arrivent dans un intervalle de temps réduit. Cette analyse est utile pour identifier les ressources les plus sensibles, comme les services spécialisés, les lits et les ambulances.

4.6.3 Analyse du tableau de bord et des indicateurs de performance

Le tableau de bord du jumeau numérique permet de suivre l'état du système pendant l'exécution de la simulation. Il affiche les indicateurs principaux, notamment le nombre de patients générés, le nombre de patients en cours, le nombre de patients sortis, les patients critiques, les transferts, les alertes W_{max} , l'attente moyenne et le séjour moyen.

Ces indicateurs jouent le rôle de KPIs, c'est-à-dire d'indicateurs clés de performance. Ils permettent d'évaluer rapidement si le système fonctionne normalement ou s'il commence à présenter des signes de saturation.

Indicateur	Rôle dans l'analyse
Patients sortis	Mesure la capacité du système à terminer les parcours de soins.
Patients critiques	Permet de suivre les patients nécessitant une priorité de prise en charge.
Transferts réalisés	Évalue l'intensité de la coordination entre les hôpitaux.
Dépassements de W_{max}	Mesure la qualité de prise en charge des patients critiques.
Attente moyenne	Évalue le niveau global des files d'attente dans le système.
Séjour moyen	Mesure la durée globale passée par les patients dans le réseau hospitalier.

TABLE 4.5 – Principaux indicateurs de performance du jumeau numérique

L'analyse du tableau de bord montre que le jumeau numérique permet de suivre le fonctionnement du réseau hospitalier de manière dynamique. Contrairement au modèle exact présenté dans le chapitre précédent, la simulation ne donne pas seulement une solution finale. Elle permet d'observer l'évolution du système dans le temps, les arrivées des patients, les transferts, les attentes, l'occupation des ressources et les alertes liées aux patients critiques.

Les transferts réalisés montrent que l'algorithme greedy ne se limite pas à une prise en charge locale. Il oriente les patients vers l'hôpital le plus adapté selon l'état courant du réseau. Cette logique permet une meilleure utilisation des ressources disponibles dans l'ensemble du réseau hospitalier.

Les dépassements de W_{max} montrent cependant que le système peut encore être amélioré. Même avec une affectation dynamique, certains patients critiques peuvent dépasser le seuil maximal souhaité lorsque les ressources sont saturées ou lorsque le transfert vers un hôpital spécialisé est nécessaire. Cela représente une piste d'amélioration importante pour une version future du jumeau numérique.

En résumé, les résultats et les indicateurs de performance montrent que le jumeau numérique développé permet de représenter le fonctionnement dynamique du réseau hospitalier. Il permet de suivre les patients, d'analyser les transferts, d'observer les attentes, de détecter les dépassements de W_{max} et d'évaluer la performance globale du système simulé.

4.7 Conclusion

Ce chapitre a présenté la conception et la simulation du jumeau numérique appliqué au réseau hospitalier étudié. Contrairement au modèle mathématique exact présenté dans le chapitre précédent, l'approche développée dans ce chapitre permet de représenter le fonctionnement du système de manière dynamique, en tenant compte de l'arrivée progressive des patients, de l'évolution des files d'attente, de l'occupation des ressources et des transferts entre hôpitaux.

Dans un premier temps, l'architecture globale du jumeau numérique a été présentée. Cette architecture repose sur l'interaction entre le système physique, la couche de communication et le système numérique. Le système physique correspond au réseau hospitalier réel, tandis que le

système numérique regroupe la base de données, le moteur de simulation, l'algorithme greedy de décision dynamique et les interfaces de visualisation.

Ensuite, l'environnement de développement a été décrit. Le prototype a été développé en Python, avec SimPy pour la simulation à événements discrets et PyQt5 pour l'interface graphique. Une visualisation 2D et une visualisation 3D ont également été intégrées afin de suivre l'état du réseau hospitalier, les patients actifs, les transferts, la charge des hôpitaux et les indicateurs de performance.

La logique de fonctionnement de la simulation repose sur un algorithme greedy d'affectation dynamique. À chaque arrivée de patient, le système identifie les hôpitaux capables de fournir les services requis, estime un score de prise en charge pour chaque hôpital admissible, puis choisit l'hôpital final le plus adapté selon l'état courant du réseau. Cette approche permet de prendre des décisions rapides et adaptées au contexte dynamique de la simulation.

Les résultats obtenus montrent que le jumeau numérique permet de suivre le parcours des patients, d'observer les transferts entre hôpitaux, d'analyser la prise en charge des patients critiques et de mesurer plusieurs indicateurs de performance. Le scénario de base a montré que le système est capable de traiter les patients jusqu'à leur sortie, tout en enregistrant les temps d'attente, les temps de séjour, les transferts et les dépassements éventuels du seuil $W_{\max}$.

L'analyse des indicateurs a également montré l'intérêt du tableau de bord comme outil d'aide à la décision. Les indicateurs tels que les patients sortis, les patients critiques, les transferts réalisés, les alertes $W_{\max}$, l'attente moyenne et le séjour moyen permettent d'évaluer rapidement l'état du réseau simulé et d'identifier les situations de surcharge.

Cependant, le jumeau numérique développé reste un prototype. Certaines données sont structurées ou estimées, notamment les temps de service, les temps de préparation, les durées d'occupation des lits et les profils des patients. Dans une application réelle, ces données devraient être alimentées par des sources hospitalières actualisées afin d'améliorer la précision de la simulation.

En conclusion, ce chapitre a montré que la simulation dynamique constitue un complément pertinent au modèle mathématique exact. Elle permet de représenter plus finement le fonctionnement d'un réseau hospitalier, de suivre l'évolution du système dans le temps et de fournir des indicateurs utiles pour l'aide à la décision. Le jumeau numérique proposé offre ainsi une base intéressante pour améliorer l'orientation des patients, la gestion des transferts et l'utilisation des ressources hospitalières.

Conclusion générale

Ce projet de fin d'études a porté sur la conception d'un jumeau numérique appliqué à la gestion hospitalière, avec une application au réseau hospitalier de la wilaya de Tlemcen. L'objectif principal était de proposer une approche d'aide à la décision permettant d'améliorer l'orientation et le transfert des patients entre les hôpitaux, en tenant compte des services disponibles, des ressources hospitalières, des lits, des ambulances, des temps de transfert et de la criticité des patients.

Dans un premier temps, une étude générale sur les jumeaux numériques et l'Industrie 4.0 a été réalisée. Cette partie a permis de présenter les concepts fondamentaux du jumeau numérique, son origine, ses composants, ses niveaux d'intégration et ses domaines d'application. Ensuite, une revue de la littérature a été menée afin d'analyser les travaux existants sur l'utilisation des jumeaux numériques dans le domaine hospitalier, notamment pour la gestion des flux de patients, des ressources et des parcours de soins.

La partie méthodologique du travail a d'abord reposé sur une modélisation mathématique mono-objectif. Le modèle proposé vise à minimiser le temps total de prise en charge des patients, tout en respectant les contraintes liées aux services, aux capacités, aux lits, aux ambulances, aux transferts et au seuil maximal souhaité pour les patients critiques. La résolution exacte sous IBM ILOG CPLEX a permis de valider la cohérence du modèle sur des scénarios de petite et moyenne taille.

Cependant, les tests de montée en charge ont montré les limites de l'approche exacte. Lorsque le nombre de patients augmente, la résolution devient plus difficile dans un temps raisonnable. Cette limite a justifié le passage vers une approche complémentaire basée sur la simulation dynamique.

Dans ce cadre, un prototype de jumeau numérique a été développé en Python, en utilisant SimPy pour la simulation à événements discrets et PyQt5 pour l'interface graphique. Le système permet de représenter le réseau hospitalier, de générer ou d'ajouter des patients, de suivre leurs parcours, d'observer les transferts entre hôpitaux et de mesurer plusieurs indicateurs de performance.

La logique de décision du jumeau numérique repose sur un algorithme greedy d'affectation dynamique. À chaque arrivée de patient, l'algorithme identifie les hôpitaux admissibles, estime un score de prise en charge et choisit l'hôpital final le plus adapté selon l'état courant du réseau. Cette approche permet de prendre des décisions rapides et adaptées à un contexte dynamique.

Les résultats de simulation ont montré que le jumeau numérique permet de suivre le fonctionnement du réseau hospitalier dans le temps. Les indicateurs obtenus, comme les patients sortis, les transferts réalisés, les patients critiques, les dépassements de $W_{\max}$, l'attente moyenne et le séjour moyen, permettent d'évaluer la performance du système simulé. Les visualisations 2D et 3D facilitent également la compréhension de l'état du réseau et des situations de surcharge.

En conclusion, ce travail montre que la combinaison entre modélisation mathématique, optimisation exacte et simulation dynamique constitue une approche pertinente pour l'aide à la décision en gestion hospitalière. Le modèle exact permet de formaliser le problème, tandis que

le jumeau numérique permet de représenter l'évolution du système de manière plus réaliste et interactive.

Comme perspectives, il serait intéressant d'intégrer des données hospitalières réelles en temps réel, d'améliorer l'algorithme de décision, d'ajouter une réoptimisation périodique et de développer des scénarios de crise plus détaillés. Ces améliorations pourraient renforcer l'utilisation du jumeau numérique comme outil d'aide à la gestion des patients et des ressources hospitalières.

Références bibliographiques

- Institut des Hautes Études pour la Science et la Technologie (IHEST). (2022). *Rapport des ateliers sur les jumeaux numériques*. IHEST.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA). (1970). *Apollo 13 mission report*. NASA.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA). (2012). *Modeling, simulation, information technology & processing roadmap*. NASA.
- Duclos, V. (2023). Big data. *Anthropen*.
- Glaessgen, E., & Stargel, D. (2012). The digital twin paradigm for future NASA and U.S. Air Force vehicles. In *Proceedings of the 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference* (Paper No. 1818). AIAA.
- Grieves, M. (2014). *Digital twin : Manufacturing excellence through virtual factory replication*. Florida Institute of Technology.
- Grieves, M., & Vickers, J. (2017). Digital twin : Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. In F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt, & A. Alves (Eds.), *Transdisciplinary perspectives on complex systems : New findings and approaches* (pp. 85–113). Springer.
- Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). *Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0*. acatech – National Academy of Science and Engineering.
- Jones, S. (2021). *Qu'est-ce qu'un jumeau numérique ? Comment les modèles de données intelligents façonnent le BTP*. Autodesk.
- Kaur, H. S. (2022). Identification overview of Industry 4.0 essential attributes and heterogeneous technologies. *Applied Sciences*, 12(11), 5672.
- Laurière, J.-L. (1987). *Intelligence artificielle : Résolution de problèmes par l'homme et la machine*. Eyrolles.
- Julien, N., & Martin, É. (2020). *Le jumeau numérique : De l'intelligence artificielle à l'industrie agile*. Dunod.
- Rüßmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Justus, J., Engel, P., & Harnisch, M. (2015). *Industry 4.0 : The future of productivity and growth in manufacturing industries*. Boston Consulting Group.
- Saad, R. (2016). *Modèle collaboratif pour l'Internet of Things (IoT)* [Thèse de doctorat, Université du Québec à Chicoutimi].
- Vaidya, S., Ambad, P., & Bhosle, S. (2018). Industry 4.0 : A glimpse. *Procedia Manufacturing*, 20, 233–238.
- Köhler, D., & Weisz, J.-D. (2016). Industrie 4.0 : Comment caractériser cette quatrième révolution industrielle et ses enjeux ? *Annales des Mines – Réalités industrielles*, 4, 51–56.
- Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H.-A. (2013). A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18–23.

- Rosen, R., von Wichert, G., Lo, G., & Bettenhausen, K. D. (2015). About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 567–572.
- Brenner, B., & Hummel, V. (2017). Digital twin as an enabler for an innovative digital shop-floor management system. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*. IEEE.
- Schleich, B., Anwer, N., Mathieu, L., & Wartzack, S. (2017). Shaping the digital twin for design and production engineering. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 66(1), 141–144.
- Zhang, H., Liu, Q., Chen, X., Zhang, D., & Leng, J. (2017). Digital twin-driven smart manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, 48, 82–91.
- Negri, E., Fumagalli, L., & Macchi, M. (2017). A review of the roles of digital twin in CPS-based production systems. *Procedia Manufacturing*, 11, 939–948.
- Liu, Z., Meyendorf, N., & Mrad, N. (2018). The role of data fusion in predictive maintenance using digital twin. *AIP Conference Proceedings*, 1949, 020023.
- Semeraro, C., Lezoche, M., Panetto, H., & Dassisti, M. (2021). Digital twin paradigm : A systematic literature review. *Computers in Industry*, 130, 103469.
- Boschert, S., Heinrich, C., & Rosen, R. (2018). Next generation digital twin. In *Proceedings of TMCE 2018* (pp. 7–11). Las Palmas de Gran Canaria, Spain.
- Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W. (2018). Digital twin in manufacturing : A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 1016–1022.
- Schützer, K., de Andrade Bertazzi, J., Sallati, C., Anderl, R., & Zancul, E. (2019). Contribution to the development of a digital twin based on product lifecycle to support the manufacturing process. *Procedia CIRP*, 84, 82–87.
- de Tchana, Y. T., Ducellier, G., & Remy, S. (2019). Conception d’un jumeau numérique unique pour la gestion du cycle de vie d’une infrastructure linéaire. In *Actes de la conférence Smart/AIP-PRIMECA*.
- Hamzaoui, M. A., & Julien, N. (2022). Social cyber-physical systems and digital twins networks : A perspective about the future digital twin ecosystems. *IFAC-PapersOnLine*, 55(8), 31–36.
- Fuller, A., Fan, Z., Day, C., & Barlow, C. (2020). Digital twin : Enabling technologies, challenges and open research. *IEEE Access*, 8, 108952–108971.
- Attaran, M., & Celik, B. G. (2023). Digital twin : Benefits, use cases, challenges, and opportunities. *Decision Analytics Journal*, 6, 100165.
- Sun, T., He, X., & Li, Z. (2023). Digital twin in healthcare : Recent updates and challenges. *Digital Health*, 9.
- Belmallem, C., & Ferhati, K. (2025). Real-world applications of digital twin technology in performance management : Lessons from global healthcare case studies. *International Journal of Innovative Technologies in Social Science*, 1(45).
- Gitto, S., Giuliani, G., & Lasciarrea, A. (2025). A digital twin system to enable better healthcare management. In *Working Conference on Virtual Enterprises* (pp. 221–237). Springer Nature Switzerland.
- Han, Y., Li, Y., Li, Y., Yang, B., & Cao, L. (2023). Digital twinning for smart hospital operations : Framework and proof of concept. *Technology in Society*, 74, 102317.

- Hasan, M. A., Mustofa, R., Hossain, N. U. I., & Islam, M. S. (2025). Smart health practices : Strategies to improve healthcare efficiency through digital twin technology. *Smart Health*, 36, 100541.
- Mcheick, H., Achouh, P., & Msheik, B. (2025). Enhancing healthcare with digital twins : A comparative approach using AI and AI-enhanced digital twins. *Procedia Computer Science*, 265, 374–381.
- Repetto, M., Colapinto, C., Jayaraman, R., Appio, F., & La Torre, D. (2025). Blockchain-enabled predictive digital twin approach for healthcare : Enhancing accuracy and performance with federated learning. *International Journal of Production Economics*, 109768.
- Roopa, M. S., & Venugopal, K. R. (2025). Digital twins for cyber-physical healthcare systems : Architecture, requirements, systematic analysis and future prospects. *IEEE Access*.
- Yang, Y., Liu, Y. M., Chen, Y. H., & Chen, L. (2025). Application of blockchain-based digital twin technology in healthcare : A scoping review. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 109231. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2025.109231>
- Zheng, R., Ng, S. T., Shao, Y., Li, Z., & Xing, J. (2025). Leveraging digital twin for healthcare emergency management system : Recent advances, critical challenges, and future directions. *Reliability Engineering & System Safety*, 261, 111079.
- Pellegrino, M., Lombardo, G., & Poggi, A. (2024). Towards digital twins in healthcare : Optimizing operating room and recovery room dynamics. *Procedia Computer Science*, 246, 4732–4740.
- Olawade, D. B., Ighodaro, O., Erhieyovwe, E. O., Hankamo, N. E., Hamza, I. T., & Analikwu, C. C. (2025). The role of digital twin technology in modern emergency care. *International Journal of Medical Informatics*, 106229.
- Kuruppu Appuhamilage, G. D. K., Hussain, M., Zaman, M., & Ali Khan, W. (2025). A health digital twin framework for discrete-event simulation-based optimized critical care workflows. *npj Digital Medicine*, 8(1), 376.
- Karakra, A., Fontanili, F., Lamine, E., & Lamothe, J. (2019). HospiT'Win : A predictive simulation-based digital twin for patient pathways in hospital. In *Proceedings of the IEEE EMBS International Conference on Biomedical & Health Informatics (BHI)*. IEEE.
- Hu, X., Cao, H., Shi, J., Dai, Y., & Dai, W. (2021). Study of hospital emergency resource scheduling based on digital twin technology. In *Proceedings of the IEEE 2nd International Conference on Information Technology, Big Data and Artificial Intelligence (ICIBA)* (Vol. 2, pp. 1059–1063). IEEE.
- Balasubramanyam, A., Ramesh, R., Sudheer, R., & Honnavalli, P. B. (2024). Revolutionizing healthcare : A review unveiling the transformative power of digital twins. *IEEE Access*, 12, 69652–69676.
- Rahim, M., Lalouani, W., Toubal, E., & Emokpae, L. (2024). A digital twin-based platform for medical cyber-physical systems. *IEEE Access*, 12, 174591–174607.
- Lee, Y., Choi, M. H., Song, Y. S., Lee, J. G., Park, J. Y., & Li, K. J. (2024). Building an indoor digital twin : A use case for a hospital digital twin to analyze COVID-19 transmission. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 13(12), 460.
- Brahamia, B. (2022). The health care system in Algeria. *CRC 1342 Social Policy Country Briefs*, No. 28.
- Alsamara, T., Ghazi, F., & Mallaoui, H. (2022). Administrative organization of health care institutions in Algeria : Between centralization and decentralization. *Open Access Macedonian Journal of Medical Sciences*, 10(E), 1114–1118.

- Ouali, A., Zehnati, A., & Audibert, M. (2025). Efficiency and productivity of public hospitals in Algeria. *Santé Publique*, 37(2), 89–99.
- Direction de la Santé et de la Population de Tlemcen. (s.d.). *Présentation du secteur sanitaire de la wilaya de Tlemcen*.
- Office National des Statistiques. (2018). *Annuaire statistique de l'Algérie n° 35 : Chapitre VI – Santé*. ONS.
- Zerrouk, A. (2022). *Modélisation et amélioration du service des urgences : Cas d'hôpital de Tlemcen* [Mémoire de master, Université Aboubakr Belkaïd de Tlemcen]. DSpace Université de Tlemcen.
- Messaoudi, A. (s.d.). Tlemcen : Des prestations médicales de qualité. *El Moudjahid*.
- Benrezkallah, L., & Taleb, A. (2021). Qualité des soins aux urgences médicales du centre hospitalo-universitaire de Tlemcen : Place de la coordination entre les personnels intra et interservices. *Revue Prévention & Ergonomie*, 9(2).
- Addoun, O. M. A., Aid, S., & Kerakeri, N. E. H. (2017). *Évacuations sanitaires : Service des urgences médico-chirurgicales* [Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de docteur en médecine, Université Abou Bekr Belkaïd, Tlemcen].
- IBM. (s.d.). *IBM ILOG CPLEX Optimizer*. IBM. <https://www.ibm.com/products/ilog-cplex-optimization-suite>
- SimPy. (s.d.). *Overview : SimPy documentation*. <https://simpy.readthedocs.io/>
- Riverbank Computing. (s.d.). *PyQt5 reference guide*. <https://www.riverbankcomputing.com/static/Docs/PyQt5/>
- Qt. (s.d.). *Qt WebChannel*. <https://doc.qt.io/qt-6/qtwebchannel-index.html>
- Edmonds, J. (1971). Matroids and the greedy algorithm. *Mathematical Programming*, 1, 127–136. <https://doi.org/10.1007/BF01584082>
- Almehdawe, E., Jewkes, B., & He, Q.-M. (2016). Analysis and optimization of an ambulance offload delay and allocation problem. *Omega*, 65, 148–158.
- Hatami-Marbini, A., Varzgani, N., Sajadi, S. M., & Kamali, A. (2022). An emergency medical services system design using mathematical modeling and simulation-based optimization approaches. *Decision Analytics Journal*, 3, 100059.