

Digital Twin en médecine – Défis éthiques et cadres de collaboration interdisciplinaire

Miruna – Elena Iliuță

Université Politehnica de Bucarest
Faculté d'Automatique et d'Informatique
Bucarest, Romania
miruna_elena.iliuta@upb.ro

Damien Trentesaux

Université Polytechnique Hauts-de-France, UPHF LAMIH-UMR CNRS
8201
Valenciennes, France
damien.trentesaux@uphf.fr

Mihnea – Alexandru Moiescu

Université Politehnica de Bucarest Faculté
d'Automatique et
d'Informatique Bucarest, Romania
mihnea.moiescu@upb.ro

Résumé—Dans le contexte de l'expansion rapide des technologies émergentes, en particulier l'intelligence artificielle (IA), redéfinit les paradigmes médicaux et commence à être intégrée dans la pratique clinique. La présente étude propose une architecture modulaire destinée à l'identification du glaucome et à la génération de suggestions de traitement personnalisées. Pour exploiter pleinement le potentiel offert par l'intégration de l'intelligence artificielle dans les processus cliniques, il est nécessaire de développer des règles et des principes éthiques qui fondent une utilisation responsable de ces technologies, à travers une collaboration constante entre experts issus de domaines interdisciplinaires tels que la technologie, la médecine et le droit. Notre démarche contribue au développement continu de la médecine personnalisée et à l'accélération du processus de numérisation à l'échelle de l'ensemble du système de santé.

Mots-clés—Intelligence artificielle, Digital Twin, diagnostic assisté par l'intelligence artificielle, traitement personnalisé, aspects éthiques

I. INTRODUCTION

L'intelligence artificielle (IA) est utilisée dans une grande majorité de domaines, allant de la fabrication jusqu'à la médecine, générant des transformations significatives grâce à la diversité des applications développées [1]. Outre les bénéfices qu'elle apporte, l'utilisation de cette technologie soulève également une série de défis éthiques qui doivent être pris en compte. Dans ce contexte, les aspects liés à la transparence des décisions algorithmiques, à la prise de responsabilité et à la protection des droits individuels, deviennent fondamentaux [2].

Parmi les technologies qui valorisent le potentiel transformateur de l'intelligence artificielle figure également le Digital Twin (DT). Le concept de Digital Twin, introduit pour la première fois par Grives [3], a été défini comme un modèle destiné à la gestion du cycle de vie des produits. L'objectif de l'utilisation du Digital Twin était d'améliorer la conception, la production et la maintenance des produits physiques grâce à l'emploi de répliques numériques synchronisées en temps réel avec le comportement de leurs homologues physiques. Ces répliques numériques exploitent les données collectées par les capteurs intégrés dans les objets physiques, ce qui facilite l'identification des défaillances, la surveillance de l'état des composants critiques et la réduction des risques opérationnels, conduisant ainsi à une diminution des coûts de maintenance [4].

Par la suite, l'utilisation du Digital Twin s'est étendue à une large gamme de domaines d'application tels que l'industrie automobile, l'éducation, la production d'énergie, les smart cities et, plus récemment, le domaine médical. L'un des domaines d'intérêt majeur concerne l'intégration de l'intelligence artificielle en médecine. Le Digital Twin se

distingue des modèles numériques traditionnels par le fait qu'il est mis à jour en temps réel avec des données provenant des équipements physiques, ce qui facilite la réalisation de prédictions et la surveillance continue du comportement du système. Au sein du Digital Twin, des données issues de sources variées – capteurs, dispositifs, big data – sont collectées et soumises à différentes étapes de prétraitement, facilitant ainsi leur intégration dans les modèles prédictifs. L'analyse de l'état de l'art de la littérature de spécialité met en évidence que dans le domaine médical, Digital Twin contribue au diagnostic précoce des pathologies, à la personnalisation des traitements et à l'automatisation des tâches administratives, apportant ainsi un soutien essentiel à la numérisation du système de santé [2].

L'objectif général de ce travail consiste en le développement d'un cadre de collaboration interdisciplinaire, matérialisé par l'identification des défis éthiques et l'élaboration d'un ensemble de principes destinés à faciliter l'intégration responsable du concept de Digital Twin en médecine, fondée sur des techniques d'intelligence artificielle. L'étude de cas se concentre sur le domaine clinique de l'ophtalmologie, visant l'identification du glaucome et la conception de plans de traitement personnalisés, tout en garantissant la conformité avec les réglementations en vigueur.

Cet article est structuré en six sections. La section 2 met l'accent sur la proposition d'une architecture de type Digital Twin dans le domaine médical, en particulier pour l'identification du glaucome. Les Sections 3 et 4 sont consacrées à la présentation des aspects fondamentaux qui assurent l'intégration de l'intelligence artificielle dans l'architecture de type Digital Twin appliquée au domaine médical, suivie de la formulation d'un ensemble de règles visant à faciliter une utilisation éthique et responsable de cette technologie. Les Sections 5 et 6 sont dédiées aux discussions et aux conclusions, avec la mise en évidence des perspectives de recherche futures.

II. II. ARCHITECTURE DU DIGITAL TWIN POUR L'IDENTIFICATION DU GLAUCOME

Dans cette section, une architecture conceptuelle est proposée pour l'identification des pathologies en utilisant des techniques d'intelligence artificielle, spécifique au concept de Digital Twin et adaptée au domaine médical. Dans le domaine médical, l'applicabilité de cette architecture se situe dans le champ clinique de l'ophtalmologie, avec un accent particulier sur le diagnostic du glaucome.

L'objectif de la proposition de cette architecture de type Digital Twin, intégrant des techniques d'intelligence artificielle, consiste à soutenir le processus clinique de diagnostic du glaucome par les médecins ophtalmologistes et à

contribuer à l'élaboration de plans de traitement personnalisés. Le Digital Twin est conçu uniquement comme un outil d'aide à la décision pour le personnel médical, en complémentarité avec l'expertise de ce dernier.

L'architecture développée, présentée à la fig. 1 est structurée en quatre modules fonctionnels : l'acquisition des données auprès du patient, la gestion et la synchronisation des données, la réalisation du modèle numérique et l'interface utilisateur [5].

Le premier module concerne l'acquisition des données auprès du patient et débute par l'anamnèse, au cours de laquelle sont collectées des informations sur les antécédents médicaux, la présence de co-pathologies et les traitements administrés. Cette étape comprend également la consultation ophtalmologique, qui inclut la mesure de la pression intraoculaire, la détermination du rapport cup/disc ainsi que l'évaluation de l'acuité visuelle. Un paramètre clé dans l'identification du glaucome est représenté par l'épaisseur cornéenne, une valeur inférieure à 550 microns indiquant un risque élevé de présence de la pathologie. Une tomographie en cohérence optique (OCT) est également réalisée afin d'identifier les modifications structurales pouvant survenir au niveau du nerf optique. L'ensemble de ces informations est intégré dans l'historique médical du patient et transmis au deuxième module de l'architecture, où elles seront prétraitées.

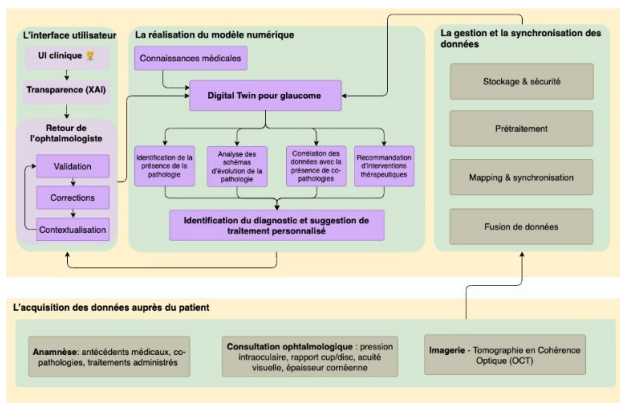


Fig. 1. Architecture du Digital Twin pour l'identification du glaucome

Au niveau du deuxième module de l'architecture [5] sont effectués le stockage, le traitement, la cartographie (mapping) et la gestion des données, tout en respectant les politiques de sécurité, de confidentialité et de disponibilité. Des protocoles de chiffrement des données sont également utilisés, accompagnés de procédures de sauvegarde et de restauration. Les données obtenues auprès du patient sont prétraitées à l'aide de méthodes de transformation et de compression, assurant ainsi leur standardisation en vue de leur intégration dans des modèles numériques de diagnostic et de traitement. L'analyse des données est réalisée à l'aide de méthodes statistiques et de réseaux neuronaux, dans le but de prédire les stades d'évolution de la pathologie. La mise en correspondance des données (data mapping) inclut l'analyse des séries temporelles, la corrélation et la synchronisation des données [6]. Les méthodes utilisées pour la fusion des données comprennent la synthèse, le filtrage, la corrélation et l'intégration. Cette fusion peut être effectuée aussi bien au niveau des données brutes qu'au niveau décisionnel, en recourant à des techniques probabilistes (filtrage de Kalman, estimation bayésienne, raisonnement classique) ainsi qu'à l'intelligence artificielle. Toutefois, le travail avec des données

en temps réel peut générer des difficultés liées au stockage, tandis que les algorithmes de traitement complexes peuvent poser des problèmes associés à la gestion de volumes massifs de données [7].

Au niveau du troisième module de l'architecture, le Digital Twin associé au glaucome est construit sur la base des connaissances médicales, en intégrant les données prétraitées dans le module précédent. Pour identifier la présence de la pathologie et analyser ses schémas d'évolution, des algorithmes de fouille de données (data mining) avec analyse séquentielle sont utilisés [5]. Dans le cadre de la gestion du glaucome, le paramètre clé est représenté par la pression intraoculaire. En fonction de ses valeurs, de la présence de co-pathologies et de l'historique médical, ce module génère des suggestions de traitement personnalisées, qui peuvent inclure l'administration de collyres, la prescription de médicaments ou la réalisation d'une intervention chirurgicale [8].

Le dernier module de l'architecture du Digital Twin est représenté par l'interface utilisateur, où le personnel médical a accès aux résultats fournis par le modèle numérique. Afin de prévenir l'opacité des algorithmes, les raisonnements ayant conduit à l'identification de la pathologie et à la proposition d'un traitement personnalisé sont explicités. Dans ce même module, l'ophtalmologiste fournit un retour d'expérience sur les résultats générés, dont l'intégration dans le Digital Twin contribue à l'amélioration continue du modèle. Il convient toutefois de souligner que le Digital Twin n'est qu'un outil de soutien à la décision pour le personnel médical, l'ophtalmologiste demeurant l'unique autorité responsable de l'établissement du diagnostic et de la prescription du traitement.

L'architecture proposée offre un cadre unifié pour le diagnostic des pathologies oculaires et l'élaboration de traitements personnalisés. Les sections suivantes présenteront une série de principes visant à consolider l'intégration responsable et éthique du concept de Digital Twin et des techniques d'intelligence artificielle en médecine.

III. ASPECTS FONDAMENTAUX DE L'INTÉGRATION ÉTHIQUE DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE EN MÉDECINE

L'intégration de l'intelligence artificielle en médecine apporte des bénéfices significatifs, mais l'utilisation de ces technologies émergentes dans la pratique clinique s'accompagne également d'un ensemble de défis éthiques qui doivent être pris en compte [2]. Selon l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), l'intégration de l'intelligence artificielle en médecine doit être réalisée de manière responsable, en mettant au premier plan le respect des droits des patients. Au niveau européen, les comités d'éthique ont élaboré des guides et des cadres normatifs qui incluent des principes fondamentaux visant à garantir le développement et l'utilisation éthique de ces technologies émergentes : Éthique et gouvernance de l'intelligence artificielle pour la santé (OMS) [9], le Règlement général sur la protection des données (RGPD) [10], la Stratégie européenne pour l'intelligence artificielle ainsi que les Lignes directrices en matière d'éthique pour une intelligence artificielle digne de confiance [11] [12].

L'intégration de l'intelligence artificielle dans le domaine médical est associée à un ensemble de défis éthiques tels que l'identification et la gestion de la responsabilité des décisions automatisées, le biais algorithmique, la garantie de la

confidentialité, de l'intégrité et de la disponibilité des données, la transparence des processus de diagnostic et de traitement personnalisé, ainsi que le respect du principe d'autonomie du patient [2]. Le non-respect de cet ensemble de principes conduit à l'émergence de risques éthiques ; ainsi, pour une approche proactive, il est recommandé de réaliser au préalable une analyse des risques.

Les défis éthiques apparaissent en effet dès l'étape d'acquisition et de gestion des données du patient. Au-delà des exigences techniques liées à la garantie de la confidentialité, de l'intégrité et de la disponibilité des données, l'aspect fondamental est représenté par l'obtention du consentement éclairé, par lequel le patient exprime son accord concernant l'utilisation de ses données exclusivement à des fins déclarées. Au cours des processus de modélisation et de simulation de l'évolution des pathologies, les images générées peuvent contenir des caractéristiques morphologiques identifiables au niveau individuel, ce qui leur confère un caractère sensible et constitue une violation des normes de protection des données.

À l'issue du processus d'analyse des données réalisé à l'aide d'algorithmes d'intelligence artificielle, une série de résultats sont générés afin d'apporter un soutien au personnel médical dans la prise de décisions cliniques. Ces résultats peuvent toutefois être influencés par le biais algorithmique, ce qui soulève des défis liés à la discrimination et à l'iniquité sociale [2]. Afin de minimiser la probabilité d'apparition et l'impact de ces risques, il est nécessaire de développer des algorithmes garantissant l'impartialité et l'équité, de sorte que les processus de simulation et de modélisation de l'évolution des pathologies restituent les scénarios cliniques possibles avec un haut niveau de précision tout en évitant toute forme de discrimination.

Le défi éthique le plus significatif est représenté par l'opacité des algorithmes de décision. Afin d'en atténuer les conséquences potentielles, les algorithmes doivent être en mesure de fournir les raisonnements ayant conduit à l'établissement du diagnostic et à l'élaboration du plan de traitement personnalisé, offrant ainsi au médecin la possibilité de comprendre et de valider les résultats présentés[2]. Dans ce contexte, la transparence des processus d'analyse et de décision se trouve renforcée, facilitant l'intégration éthique de l'intelligence artificielle en médecine. Par ailleurs, la gestion de la responsabilité en matière d'identification du diagnostic et de définition des plans de traitement personnalisé doit être encadrée par un cadre normatif, stipulant clairement que l'unique autorité décisionnelle revient au médecin.

IV. RÈGLES ET PRATIQUES POUR UNE UTILISATION ÉTHIQUE ET RESPONSABLE DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE DANS LE DOMAINE MÉDICAL

La conception d'un ensemble de règles et de pratiques destinées à faciliter la gestion éthique et responsable de l'intelligence artificielle dans le domaine médical nécessite la prise en compte de perspectives interdisciplinaires issues de la technologie, du droit et de la médecine. Les consultations menées avec des experts en technologie et en médecine ont conduit à la définition de principes fondamentaux, représentés par :

- Assurer la transparence et fournir des explications détaillées des raisonnements décisionnels générés par l'intelligence artificielle

- La mise en œuvre des algorithmes destinés à l'identification des pathologies et à l'élaboration de plans de traitement personnalisé doit être réalisée par des spécialistes en technologie, de manière à garantir une traçabilité claire des raisonnements décisionnels ;
- L'implication du personnel médical dans les phases de test, d'évaluation et de validation de ces modèles est essentielle, la responsabilité clinique du médecin demeurant intacte.
- Mise à jour et suivi des modèles d'intelligence artificielle
- Le suivi des modèles d'intelligence artificielle doit être assuré à intervalles réguliers par des spécialistes en technologie afin d'évaluer leur performance et leur fiabilité ;
- Le personnel médical doit évaluer l'impact des modèles d'intelligence artificielle sur les décisions cliniques, en contribuant à leur amélioration par un retour d'expérience constant.
- Surmonter les barrières de communication entre les spécialistes en technologie et en médecine –Les différences de langage technique, les perspectives distinctes sur les problématiques ainsi que les méthodologies propres à chaque domaine peuvent engendrer des barrières significatives. Pour les surmonter, il est nécessaire de mettre en place une communication efficace, de favoriser l'ouverture à de nouvelles idées et de promouvoir une compréhension mutuelle des exigences et des objectifs communs, afin d'atteindre un consensus et de développer des solutions efficaces.

À la suite de discussions avec des experts issus des domaines de la technologie et du droit, les idées fondamentales suivantes ont été identifiées :

- Assurer la confidentialité, l'intégrité et la disponibilité des données
- L'élaboration d'un cadre juridique par des spécialistes du droit, en collaboration avec des experts en technologie, contribue à garantir la conformité avec les réglementations internationales relatives à la protection des données ;
- Le chiffrement et l'anonymisation des données doivent être réalisés par des spécialistes en technologie pour assurer la sécurité des données des patients ;
- Prévention et correction du biais algorithmique - La conception et l'entraînement des modèles d'intelligence artificielle doivent être réalisés par des spécialistes en technologie sur des ensembles de données équitables et représentatifs. Il est recommandé d'intégrer dans ce processus des protocoles d'évaluation continue de la performance des modèles et de procéder à des ajustements périodiques afin de prévenir l'apparition de biais.
- Assurer un accès équitable à la technologie et éliminer toute forme de discrimination - Les spécialistes du droit doivent élaborer un cadre juridique garantissant l'accès équitable à l'utilisation de l'intelligence artificielle, indépendamment de l'âge, du genre, de l'origine ethnique ou du statut socio-économique.

Cette synergie entre ces trois domaines fondamentaux contribue à relever les défis éthiques et techniques, en

soutenant l'utilisation responsable de l'intelligence artificielle dans la pratique clinique.

V. DISCUSSION

À la suite de l'élaboration de l'ensemble de règles proposées précédemment dans le cadre d'une collaboration interdisciplinaire, une séance de réflexion (brainstorming) a été organisée avec cinq ophtalmologistes, chacun disposant de niveaux d'expérience différents. Du point de vue de leur pratique clinique, ceux-ci confirment que les règles formulées antérieurement peuvent être mises en relation avec la réalité pratique générée par l'intégration du Digital Twin et de l'intelligence artificielle dans la pratique clinique.

Outre le risque lié aux fuites de données provenant des patients, ce qui constitue une violation des normes de confidentialité et de protection des données, les médecins ont exprimé leur réticence face au faible niveau de transparence des algorithmes de suggestion des pathologies et d'élaboration des plans de traitement personnalisés. Une autre difficulté évoquée concerne l'accessibilité et l'équité dans l'utilisation de ces technologies émergentes, dans la mesure où l'infrastructure nécessaire n'est pas disponible dans toutes les unités médicales. La mise en œuvre et la maintenance des systèmes de type Digital Twin au sein des cabinets individuels impliquent des coûts considérables, tant pour l'acquisition de l'infrastructure nécessaire que pour la formation du personnel médical.

Un autre aspect souligné par le personnel médical concerne le fait que, indépendamment des résultats fournis par le Digital Twin, la responsabilité décisionnelle incombe toujours au médecin, tandis que la validation clinique constitue un pilier fondamental garantissant l'intégration éthique de ces technologies dans la pratique clinique.

Ainsi, les médecins soulignent la nécessité de mettre en œuvre l'ensemble de règles élaboré précédemment, en tant qu'élément central pour faciliter la transition vers la personnalisation et la numérisation de l'acte médical. En l'absence d'un cadre normatif garantissant la conformité aux principes déontologiques, l'intégration du Digital Twin et des technologies basées sur l'intelligence artificielle en médecine peut être associée à un niveau élevé de réticence de la part du personnel médical. En conclusion, l'ensemble de règles proposé a été validé par le personnel médical impliqué dans les discussions.

VI. CONCLUSIONS

Afin de faciliter la transition vers la médecine personnalisée et l'intégration responsable du Digital Twin dans la pratique clinique, il convient de prendre en considération les aspects éthiques fondamentaux qui garantissent non seulement la validation technique des modèles, mais aussi leur conformité aux réglementations en vigueur. Dans le cadre de cette étude, un ensemble de règles a été proposé pour la gestion proactive des risques éthiques, à la suite d'une analyse interdisciplinaire

réalisée avec des experts issus des domaines de la technologie, du droit et de la médecine.

Dans le cadre de cet article, une architecture de type Digital Twin, intégrant des techniques d'intelligence artificielle, a été proposée afin d'illustrer l'applicabilité de ce concept dans la pratique médicale, notamment pour l'identification du glaucome et l'élaboration de plans de traitement personnalisés. De plus, la vision du personnel médical concernant l'utilisation du Digital Twin dans la pratique clinique a été présentée, mettant en évidence à la fois les bénéfices et les inconvénients potentiels.

Les perspectives de recherche futures visent à tester et à valider le cadre de modélisation proposé, ainsi qu'à réaliser une analyse des risques concernant l'impact de l'intégration du Digital Twin et de l'intelligence artificielle en médecine.

RÉFÉRENCES

- [1] Javaid, M., Haleem, A., Singh, R. P., & Suman, R. (2022). Artificial intelligence applications for industry 4.0: A literature-based study. *Journal of Industrial Integration and Management*, 7(01), 83-111.
- [2] Iliuță, M. E., Trentesaux, D., Pop, E., & Moisesescu, M. A. (2024, November). Integration of Generative Artificial Intelligence in Medicine-First Steps Toward an Ethical Risk Management Methodology. In *2024 E-Health and Bioengineering Conference (EHB)* (pp. 1-6). IEEE.
- [3] Grieves, M. W. (2023). Digital twins: past, present, and future. In *The digital twin* (pp. 97-121). Cham: Springer International Publishing.
- [4] Iliuță, M. E., Moisesescu, M. A., Pop, E., Ionita, A. D., Caramihai, S. I., & Mitulescu, T. C. (2024). Digital twin—a review of the evolution from concept to technology and its analytical perspectives on applications in various fields. *Applied Sciences*, 14(13), 5454.
- [5] Iliuță, M. E., Moisesescu, M. A., Pop, E., & Mitulescu, T. C. (2023, November). Integration of Digital Twin models with Systems Medicine for Eye Diseases. In *International Conference on e-Health and Bioengineering* (pp. 694-701). Cham: Springer Nature Switzerland.
- [6] Qi, Q., Tao, F., Hu, T., Anwer, N., Liu, A., Wei, Y., ... & Nee, A. Y. C. (2021). Enabling technologies and tools for digital twin. *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 3-21.
- [7] Bode, F., Sandu, M., Năstase, I., & Calotă, R. (2021, May). Evaluation of a Ventilating System for Indoor Air Quality and Smoke Exhaust during Fire inside an Underground Parking. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 664, No. 1, p. 012009). IOP Publishing.
- [8] Zheng, Y., Yang, S., & Cheng, H. (2019). An application framework of digital twin and its case study. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 10, 1141-1153.
- [9] World Health Organization. (2021). Ethics and governance of artificial intelligence for health: WHO guidance. World Health Organization. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/341996>.
- [10] Regulation (EU) 2016/679 of the European Parliament and of the Council of 27 April 2016 – General Data Protection Regulation, <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2016/679/oj>.
- [11] Regulation (EU) 2017/745 of the European Parliament and of the Council of 5 April 2017 on medical devices, amending Directive 2001/83/EC, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32017R0745>.
- [12] Regulation (EU) 2017/745 of the European Parliament and of the Council of 5 April 2017 on medical devices, amending Directive 2001/83/EC, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32017R0745>.

CHAPITRE 2

SCIENCES PHYSIQUES