

🌐 Le jumeau numérique : un modèle de précision au service de la santé.

PETROFF Éric, ARNALSTEEN Damien, *Flandre Orthopédie*

Qu'est-ce qu'un jumeau numérique ?

Le jumeau numérique est une **réplique virtuelle dynamique et personnalisée** d'une structure anatomique réelle. Il est construit à partir de données patients spécifiques : imagerie (scanner, IRM), cinématique articulaire, caractéristiques osseuses, voire données peropératoires. Contrairement à un simple modèle 3D, le jumeau numérique est **interactif et évolutif**, capable de simuler **en temps réel** des scénarios biomécaniques ou chirurgicaux.

Le jumeau numérique (*Digital Twin*) est devenu une référence en matière de simulation et d'analyse de **systèmes complexes**. Il s'impose aujourd'hui dans le secteur médical comme un outil précieux, permettant de reproduire des environnements physiologiques spécifiques aux patients. En modélisant de manière précise et dynamique des parties du corps humain, cette technologie permet aux médecins de mieux comprendre certaines pathologies et d'évaluer les risques et traitements potentiels.

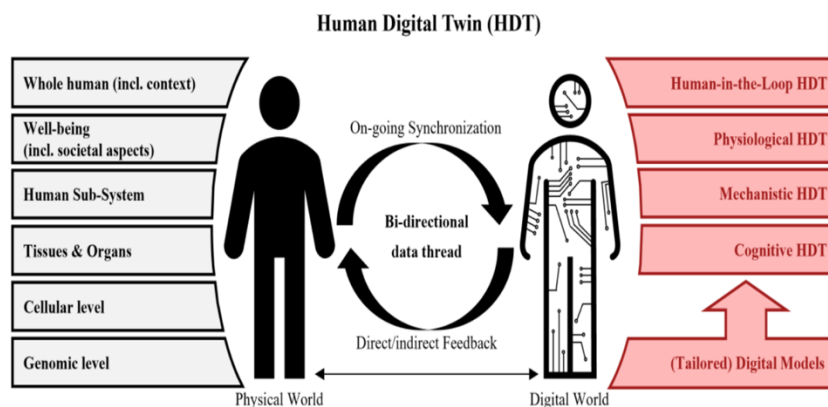


Figure 2: A General Conceptualization of Human Digital Twin (Lauer-Schmaltz et al., 2024)

🧠 Le jumeau numérique : un concept ancien au service du futur médical

Selon la Commission européenne, un jumeau numérique est une **représentation numérique d'entités ou de processus**, construite à partir de **données historiques et temps réel** permettant de simuler des scénarios futurs. Ce concept, apparu dans les années 1960 à la NASA, visait initialement à simuler des vaisseaux spatiaux pour en anticiper les défaillances. C'est en 1970 dans le cadre de l'agence spatiale américaine qu'il connût ce qui restera sans doute pour longtemps son plus haut fait d'armes : le sauvetage de l'équipage de la mission Apollo 13. Les ingénieurs de la Nasa possédaient des « simulateurs » du fonctionnement des composants principaux du module spatial. Ces simulateurs étaient contrôlés par un réseau

d'ordinateurs et pouvaient être synchronisés avec les données qui venaient de l'engin spatial. Et c'est en grande partie grâce à ces simulateurs connectés, ces doubles numériques, que les équipes au sol et dans l'espace ont pu, ensemble, établir un diagnostic et sauver la mission. Une performance d'autant plus remarquable qu'il s'agissait déjà non pas d'un jumeau numérique, mais d'un réseau de jumeaux numériques en interaction les uns avec autres, chacun modélisé par un système de simulation indépendant.

Aujourd'hui, cette technologie s'est considérablement enrichie grâce aux avancées en matière de connectivité, d'intelligence artificielle et de traitement de donnée.

Elle peut s'appliquer au domaine médical en construisant des **répliques numériques du corps humain**, alimentées par les données du patient (imagerie, biométrie, historique clinique...) et analysées par l'Intelligence Artificielle (IA).



Les fondations technologiques de cette révolution

L'essor du **Big Data**, les progrès de la **data science**, des **algorithmes d'intelligence artificielle**, et les capacités de **calculs haute performance (HPC)** ont permis une avancée spectaculaire dans le développement des jumeaux numériques pour la santé. Ces technologies offrent désormais aux chercheurs et cliniciens des outils puissants, des logiciels spécialisés, des plateformes collaboratives, et des infrastructures cybernétiques sécurisées.



Le jumeau numérique du patient : vers une médecine prédictive et personnalisée

Le jumeau numérique d'un patient est une **projection dynamique et personnalisée** de son organisme. Il permet de :

- Simuler les réactions à un traitement ou à une chirurgie ;
- Anticiper l'évolution d'une pathologie ;
- Tester virtuellement des médicaments, dosages ou protocoles thérapeutiques, les prothèses ;
- Créer des environnements d'entraînement pour les chirurgiens.

Ces **modèles génératifs**, formés sur de grandes bases de données cliniques, exploitent les capacités de l'IA pour apprendre et prédire des phénomènes biologiques complexes avec une précision inégalée.



Introduction au concept de jumeau numérique appliqué à la chirurgie prothétique orthopédique

Dans le cadre des avancées technologiques appliquées à la médecine, le **jumeau numérique** représente une innovation majeure au service de la chirurgie orthopédique.

Ce concept, initialement développé dans l'industrie (**Boeing - programme 777, Dassault Syst.- prog. Rafale, MediTwin, NASA - Apollo, Artemis...**, **Thalès Alenia Space associé à SERCO – Plateforme Destin E**) consiste à créer une **réplique virtuelle fidèle et dynamique d'un système physique** – ici, le corps humain ou une articulation spécifique – à partir de données

patient spécifiques (imagerie, biométrie, mouvement, etc.). Le jumeau numérique implique une **liaison permanente et en temps réel entre la modélisation et la réalité physique**.

1. Applications concrètes en chirurgie prothétique

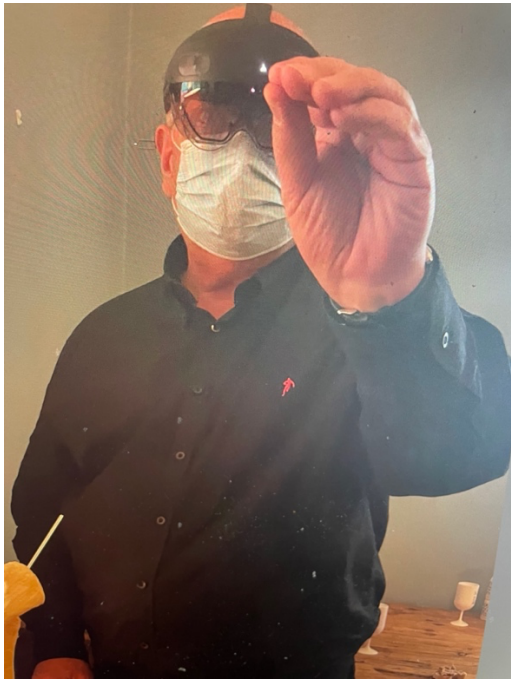
- **Planification pré-opératoire** précise et personnalisée : anticipation des gestes chirurgicaux, choix et positionnement optimal de l'implant, évaluation du stock osseux et de la tension capsulo-ligamentaire.
- **Simulation opératoire** : test virtuel de différentes stratégies opératoires selon les paramètres du patient.
- **Assistance peropératoire** : utilisation de la **réalité mixte (casques, hologrammes)** pour superposer le jumeau numérique à l'anatomie réelle pendant l'intervention.
- **Suivi post-opératoire** : comparaison entre les prédictions du modèle et l'évolution clinique réelle, détection précoce des complications potentielles. Les jumeaux numériques facilitent la **surveillance continue** des patients à domicile. Ils permettent de détecter précocement les dérives cliniques, d'adapter les traitements en temps réel et de limiter les hospitalisations inutiles. Intégrés aux plateformes de **télémédecine**, ils favorisent un suivi plus réactif et personnalisé.

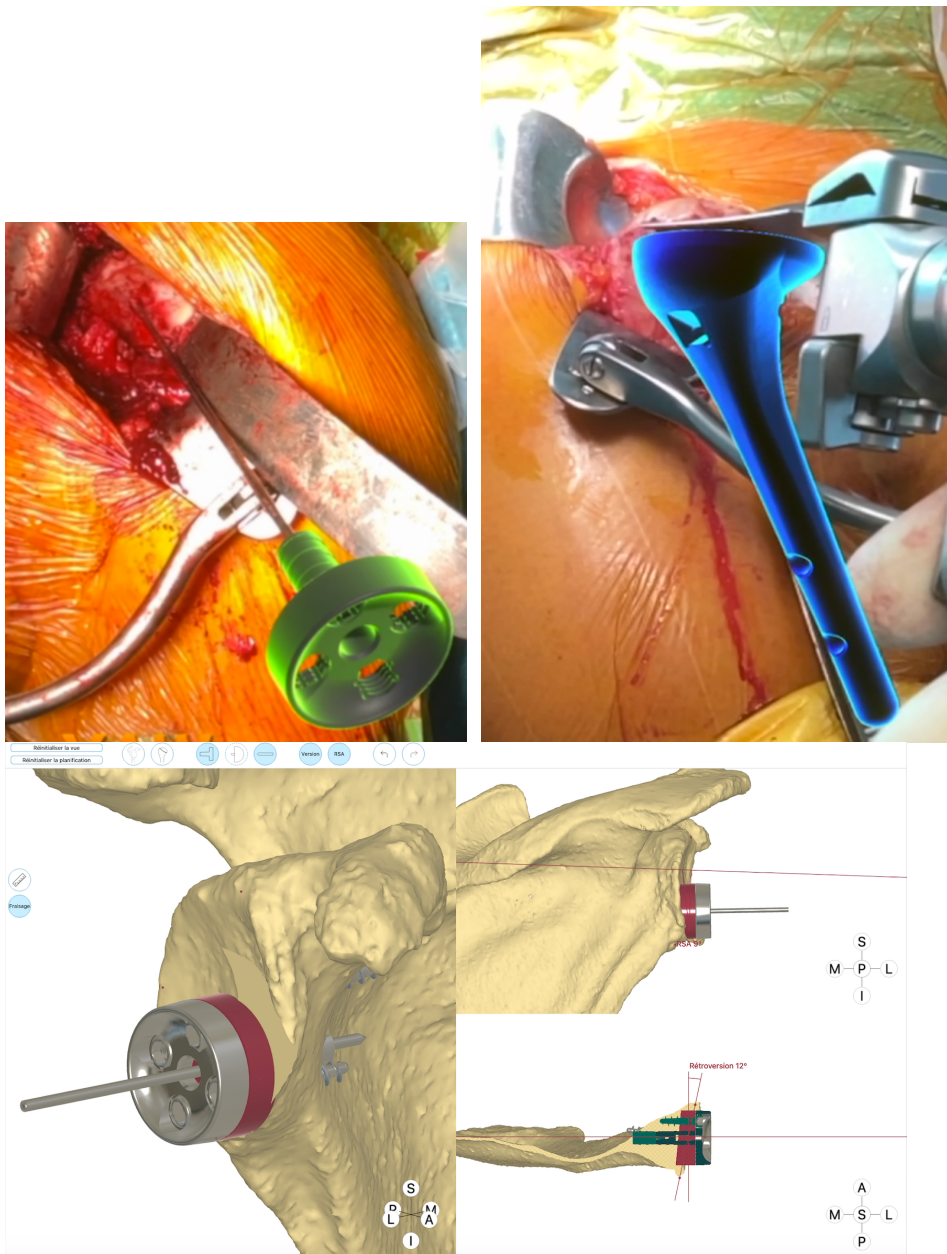


2. Technologies mobilisées

- **Imagerie médicale 3D** (CT, IRM) pour la reconstruction précise des structures ;
- **Modélisation biomécanique** pour simuler les comportements articulaires ;

- **Intelligence artificielle** pour l'analyse des données et l'adaptation dynamique du modèle ;
- **Réalité mixte et réalité augmentée** pour l'intégration visuelle en bloc opératoire.



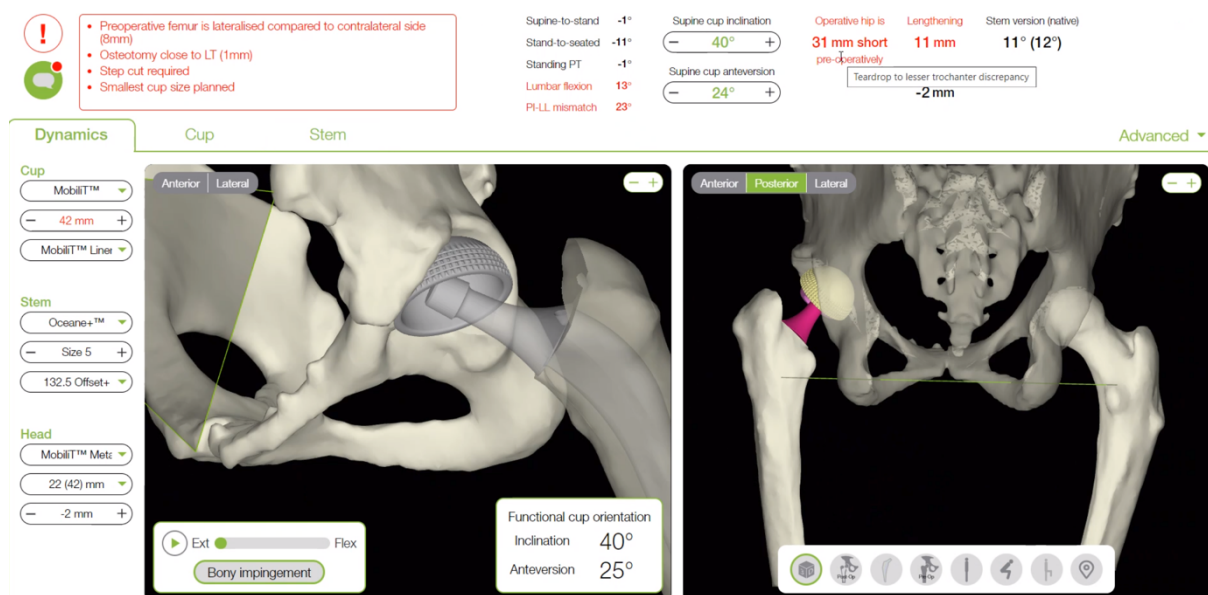


3. Applications principales

- Prothèse d'épaule, hanche, genou
- Chirurgie de révision
- Cas complexes ou anatomies atypiques

4. Bénéfices cliniques

- ✓ Chirurgie plus précise
- ✓ Moins de complications
- ✓ Stratégies sur-mesure
- ✓ Meilleure compréhension de la pathologie



Conclusion

La combinaison de l'IA et des jumeaux numériques façonne un **nouvel écosystème d'innovation en santé** :

- Diagnostics plus précoces
- Traitements personnalisés qui améliore la qualité des soins.
- Montée en compétences et valeur ajoutée des pratiques professionnelles
- Optimisation des parcours de soins (soins intensifs aux USA, radiologie en Irlande, Parcours Covid-19 etc...)
- Recherche accélérée (simulation *In Silico*)
- Meilleure accessibilité aux soins

L'IA et le jumeau numérique ne sont plus de simples outils exploratoires : ils s'imposent comme des **leviers concrets d'amélioration du système de santé**. Si les défis sont encore nombreux, leur impact futur sur la médecine — prédictive, préventive, personnalisée et participative — s'annonce considérable.



L'intégration des jumeaux numériques dans le champ de la **chirurgie orthopédique** représente une avancée majeure vers une médecine plus personnalisée, plus prédictive et plus précise. En modélisant en temps réel l'état physiologique du patient et en simulant différents scénarios opératoires, ces outils permettent d'optimiser la planification chirurgicale, d'améliorer la prise de décision et d'affiner les gestes techniques. Pour **Flandre Orthopédie** spécialisée dans les technologies de l'information (IT) appliquées à la chirurgie, l'adoption de cette approche constitue une opportunité stratégique : elle positionne l'innovation au service de la performance clinique et de la sécurité du patient. En ce sens, le jumeau numérique ne se limite pas à un simple outil technologique ; il devient **un levier de transformation pour repenser la chirurgie orthopédique** à l'aune de la médecine de demain.

