

# Le jumeau numérique n'est pas un modèle d'organe

Généalogie d'une contraction, asymétrie épistémique, et distinction entre régime péri-interventionnel, régime d'indication et régime prédictif

## Introduction

Le terme *jumeau numérique* s'est imposé dans l'agenda de la santé française avec une intensité remarquable. Le lancement du consortium MEDITWIN en décembre 2023, soutenu par France 2030 et piloté par Dassault Systèmes avec plusieurs Instituts Hospitalo-Universitaires, le CHU de Nantes et Inria, a installé dans le débat public une représentation désormais dominante : celle d'un organe simulé en trois dimensions, animé par des équations multi-physiques, interrogeable avant une intervention chirurgicale ou un geste spécialisé.

Cette représentation est scientifiquement solide, cliniquement prometteuse et industriellement structurante.

Elle ne suffit pas, à elle seule, à définir le concept qu'elle incarne.

Le terme *jumeau numérique* ne désigne pas canoniquement un modèle mécaniste d'organe. Il désigne une classe plus large de représentations numériques couplées à un référent réel : objet, système, organe, patient, trajectoire, cohorte, territoire ou parcours de soins. La réduction implicite du concept à l'organe simulé constitue donc une contraction sémantique tardive, rendue possible par la puissance démonstrative de certains cas d'usage. Cette contraction est compréhensible. Elle produit néanmoins des effets théoriques, industriels et politiques qu'il n'est plus possible de laisser implicites.

Le constat n'est pas neuf. Dans *Do Buzzwords Dream of Clearer Substance?*, je relevais déjà la polysémie constitutive du terme : *digital* peut recouvrir des signaux IoT, des graphes de connaissance, des modèles mécanistes ou des systèmes d'intelligence artificielle ; *twin* peut désigner une visualisation statique, un modèle alimenté par des données, ou une boucle de rétroaction. La revue systématique de Negri, Fumagalli et Macchi publiée en 2017 montrait déjà qu'aucune définition univoque ne s'était stabilisée dans la littérature, et que les termes dominants du corpus, notamment *physical* et *product*, signalaient un biais structurel vers la représentation d'un objet tangible. Ce biais, observable très tôt dans la littérature industrielle, précède de plusieurs années le débat aujourd'hui visible en santé.

La thèse de cette note est triple.

1. D'abord, la polysémie du terme *jumeau numérique* n'est pas une ambiguïté à résoudre par restriction arbitraire ; c'est une structure à préserver par discipline terminologique.
2. Ensuite, la contraction actuelle du concept procède d'un transfert implicite d'un régime épistémique, celui de l'industrie abondamment instrumentée, vers un régime empirique, celui de la santé, qui ne partage ni les propriétés de données, ni les critères de validité, ni les conditions de modélisation de son domaine source.
3. Enfin, la contraction sémantique se double d'une *contraction temporelle*. Ce que la communication publique nomme aujourd'hui *médecine prédictive* recouvre, dans une part significative des cas mis en avant, du péri-interventionnel optimisé ou de l'aide à l'indication spécialisée. Ces objets sont utiles. Ils ne sont pas équivalents à la médecine prédictive et préventive au sens populationnel du terme.

Confondre ces régimes n'est pas une simple imprécision. C'est un transfert silencieux d'agenda.

La dilution conceptuelle n'est pas dans l'élargissement. Elle est dans la restriction.

## 1. Généalogie d'une contraction

Le concept de *digital twin* n'est pas né en médecine. Il est traditionnellement attribué aux travaux de Michael Grieves sur le Product Lifecycle Management au début des années 2000. Dans cette première matrice industrielle, le jumeau numérique désigne une représentation informationnelle d'un objet physique couplée à son référent réel, mobilisée pour simuler son comportement, suivre son évolution et optimiser son cycle de vie.

Une définition formelle devenue canonique dans le champ aérospatial est publiée en 2012 par Glaessgen et Stargel dans le contexte de la NASA : *an integrated multi-physics, multi-scale, probabilistic simulation of a vehicle or system*. Le concept est alors clairement ancré dans un monde où le référent est physique, fortement instrumenté, opéré dans un environnement gouverné par des lois modélisables.

La formalisation la plus utile pour l'analyse architecturale reste toutefois celle proposée par Kritzinger et ses collègues en 2018. Elle distingue trois régimes :

1. Le *digital model* est une représentation numérique sans connexion automatisée au référent réel.
2. Le *digital shadow* est une représentation alimentée automatiquement par les données du référent, mais sans rétroaction automatisée vers lui.
3. Le *digital twin* au sens strict implique un couplage bidirectionnel : le référent alimente la représentation, et la représentation peut influencer le référent.

Cette distinction n'est pas un raffinement académique. Elle conditionne l'infrastructure, la validation, la gouvernance et le degré d'autonomie du système. Elle implique aussi qu'un

nombre important de systèmes qualifiés de *digital twins* sont, en réalité, des *models* ou des *shadows*. Kritzinger le constatait déjà dans la littérature manufacturière. Le problème n'a pas disparu en santé ; il y est simplement devenu plus sensible.

L'entrée du concept en médecine s'est faite par analogie industrielle. Le Living Heart Project de Dassault Systèmes, initié en 2014 avec la FDA, a installé un prototype extrêmement visible : un organe modélisé mécaniquement, électriquement et physiquement, dont la fidélité au référent biologique (un cœur « générique » d'une personne mâle en bonne santé ?) peut être confrontée à l'imagerie et aux mesures cliniques. Le succès scientifique, médiatique et industriel de cette forme a progressivement produit un effet de synecdoque : la partie la plus spectaculaire du concept, l'organe simulé, a fini par désigner le tout.

C'est cette synecdoque qui structure aujourd'hui une part significative du débat public.

## 2. Une asymétrie épistémique

La contraction du concept en santé ne tient pas seulement à un glissement lexical. Elle procède d'un transfert implicite de régime épistémique.

Dans les secteurs industriels où le *digital twin* s'est structuré (aéronautique, automobile, énergie, manufacturier discret), le référent est physique, géométrique, fortement instrumenté, et gouverné par des lois explicitement modélisables. Le paradigme *Industry 4.0* repose sur une captation massive et continue de données issues de capteurs distribués, de systèmes SCADA et d'IoT industriel. Le volume, la régularité et la qualité de ces données permettent l'entraînement et la validation de modèles fortement contraints. Un jumeau de turbine, d'avion ou de chaîne de production dispose couramment de télémétries haute fréquence, sur plusieurs cycles d'usage, dans des environnements où les variables pertinentes sont elles-mêmes instrumentées.

La santé présente une configuration radicalement différente.

Les données y sont fragmentées entre systèmes hétérogènes, produites dans des contextes cliniques multiples, souvent incomplètes, et caractérisées par des volumes limités rapportés à la dimension des variables pertinentes. C'est le régime classique du *High Dimension, Low Sample Size (HDLSS)*. Les mesures sont recueillies à des moments discrets, avec des biais d'observation difficiles à contrôler. Les déterminants pertinents incluent des dimensions comportementales, sociales, environnementales et longitudinales qui ne sont ni facilement mesurables, ni stationnaires, ni homogènes à travers les populations.

À cette asymétrie de données s'ajoute une asymétrie computationnelle qu'il vaut la peine de chiffrer, parce qu'elle structure silencieusement le périmètre industriel des jumeaux d'organes haute-fidélité. La revue de référence publiée en décembre 2024 dans *EP Europace* (Bhagirath, Strocchi, Bishop, Boyle, Plank, *From bits to bedside: entering the age*

*of digital twins in cardiac electrophysiology*) documente ce point sans détour : avec une discrétisation de l'ordre de 400  $\mu\text{m}$ , déjà utilisée dans plusieurs applications cliniques récentes en stratification de TV, ablation de TV ou ablation de FA, les coûts de calcul par patient sont rapportés à l'échelle de plusieurs jours, même sur ressources HPC avancées ; doubler la résolution spatiale peut multiplier le coût d'un facteur proche de dix, conformément aux propriétés des solveurs de réaction-diffusion sur maillages tétraédriques fins. Ce chiffre vaut pour les modèles bidomaine de référence ; les approches à ordre réduit ou à substitut différentiable abaissent ce coût, avec une perte de fidélité dont l'évaluation reste un chantier ouvert.

Ce que cette donnée ne prouve pas : que le paradigme mécaniste serait disqualifié par son coût. Il ne l'est pas. Ce qu'elle prouve : que la généralisation du paradigme à des cohortes massives (quelques dizaines de milliers de patients par an pour une indication donnée, plusieurs centaines de milliers à l'échelle d'une politique de prévention secondaire) n'est pas un problème d'ingénierie incrémentale, mais un problème d'architecture. Un paradigme dont le coût de calcul se mesure en jours-CPU par patient ne peut pas, sans réduction d'ordre substantielle, être directement transposé à l'échelle populationnelle.

Dans ce régime, l'exercice de modélisation est structurellement plus incertain, plus dépendant des hypothèses, et plus sensible aux conditions de validation que dans un univers industriel fortement instrumenté. Ce n'est pas une faiblesse méthodologique. C'est une contrainte épistémique.

Transposer directement vers la santé un paradigme élaboré pour des systèmes physiques abondamment instrumentés produit donc un effet de cadrage. Ce cadrage privilégie les objets les plus compatibles avec les données disponibles et les modèles maîtrisés : un organe précisément imagé, dans un contexte péri-interventionnel, sur un patient déjà adressé à une filière spécialisée. Il tend mécaniquement à rendre moins visibles les objets pourtant centraux pour la transformation du système de santé : trajectoires longitudinales, cohortes territoriales, parcours de soins, prévention primaire et secondaire.

Cette différence de régime explique pourquoi le paradigme mécaniste fonctionne dans le périmètre de MEDITWIN, où l'imagerie médicale offre une instrumentation riche sur l'organe, et pourquoi il ne peut être étendu sans réarticulation aux familles de jumeaux qui ne disposent pas de cette chance instrumentale.

### 3. Restituer la taxonomie

Un jumeau numérique ne se définit pas par sa forme visuelle. Il se définit par un quadruplet de dimensions indépendantes.

1. La première dimension est la **nature du référent**. Le référent peut être un objet, un organe, un système physiologique, un patient longitudinal, une cohorte, un territoire ou un parcours de soins. Ces référents ne sont pas substituables. Un cœur, une

valve, une personne polypathologique, un bassin de population et une filière oncologique ne posent pas les mêmes questions.

2. La deuxième dimension est le **régime de couplage**. Un système peut être non connecté, alimenté unidirectionnellement, ou inscrit dans une boucle de rétroaction. En santé, cette rétroaction est rarement une commande directe sur le référent biologique. Elle est le plus souvent médiée par une décision humaine, une recommandation clinique, une alerte, un dispositif médical programmable ou une adaptation organisationnelle. Cette médiation n'est pas un détail. Elle conditionne la qualification réglementaire, la responsabilité, la traçabilité et le niveau de garantie humaine exigible.
3. La troisième dimension est l'**échelle temporelle**. Un jumeau peut être conçu pour une intervention ponctuelle, pour une trajectoire individuelle sur plusieurs mois ou années, ou pour une dynamique populationnelle sur des horizons longs. Ces temporalités ne mobilisent ni les mêmes architectures de données, ni les mêmes attentes de performance, ni les mêmes régimes de promesse.
4. La quatrième dimension est le **régime de validation**. Un jumeau d'organe mécaniste se valide par fidélité physique et physiologique. Un jumeau de trajectoire patient se valide par utilité prédictive, contrefactuelle et clinique. Un jumeau territorial se valide par sa capacité à améliorer une décision collective. Un jumeau de parcours se valide par sa fidélité aux données de vie réelle et par sa capacité à expliquer les ruptures de continuité.

Ces régimes ne sont pas hiérarchisables en termes abstraits de rigueur. Ils correspondent à des finalités distinctes.

La confusion actuelle tient à la réduction de ce quadruplet à une seule dimension : la représentation tridimensionnelle d'un organe. Ce rétrécissement n'apporte pas de précision. Il efface les autres dimensions constitutives du concept.

#### 4. Le régime temporel : péri-interventionnel, indication spécialisée, prédictif fort

L'échelle temporelle mérite d'être traitée séparément, parce qu'elle redistribue silencieusement les promesses publiques.

Trois régimes sont souvent confondus sous le mot unique de *prédiction*.

1. Le premier est le **prédictif au sens fort**. Il suppose un horizon temporel ouvert, un événement non encore déclaré, une fenêtre d'intervention réelle, et la possibilité de modifier la trajectoire par une décision actuelle. Dans le vocabulaire des politiques publiques de santé, c'est ce régime qui fonde la médecine prédictive et préventive : identifier avant la déclaration, intervenir avant l'irréversible.
2. Le deuxième est le régime d'**indication spécialisée**. Le patient est déjà identifié, souvent déjà malade, parfois déjà adressé à une filière experte, mais la décision

d'intervention reste ouverte. Faut-il implanter un défibrillateur ? Faut-il proposer une ablation ? Quel patient bénéficiera réellement d'un geste lourd ? Ce régime n'est pas purement péri-interventionnel, car le geste n'est pas toujours décidé. Il n'est pas non plus prédictif populationnel, car le patient est déjà dans une trajectoire spécialisée. C'est une zone hybride, stratégiquement importante.

3. Le troisième est le **péri-interventionnel**. L'intervention est décidée, ou fortement cadrée, et la question principale devient technique : comment exécuter le geste avec la meilleure précision, le meilleur dimensionnement, le moindre risque, la meilleure anticipation anatomique ou électrophysiologique ? La temporalité est alors compressée : jours, heures, parfois minutes. La fenêtre d'intervention n'est pas populationnelle ; elle est opératoire ou procédurale.

À ces trois régimes s'ajoute le **diagnostic aigu**. Devant une douleur thoracique aux urgences, la question n'est ni prédictive ni péri-interventionnelle au sens strict : elle consiste à classer un événement en cours, sur un horizon de minutes. Là encore, employer le même mot pour désigner tous ces usages produit une confusion commode.

Lorsque la communication publique d'un consortium de jumeaux numériques annonce *permettre la médecine prédictive*, plusieurs objets peuvent donc être placés sous le même terme.

- Le volet cardiométabolique, lorsqu'il travaille sur l'hypercholestérolémie familiale, le risque métabolique, la prévention ou les trajectoires longitudinales, relève bien du prédictif au sens fort. Mais ces objets appartiennent alors plus naturellement à la famille des jumeaux de trajectoire, même s'ils mobilisent des sous-modèles d'organes.
- Le volet péri-interventionnel (chirurgie congénitale, planification de TAVR, ablation, simulation procédurale) relève d'un autre régime. Il prédit au sens où un solveur prédit une déformation, un flux, un risque mécanique ou électrophysiologique conditionnel à un geste. C'est de la prédiction computationnelle. Ce n'est pas nécessairement de la médecine prédictive au sens préventif du terme.

*Prédire le résultat probable d'un geste imminent n'est pas la même opération que prédire une maladie qui ne s'est pas encore déclarée.*

La conséquence stratégique est nette. Le péri-interventionnel optimise un coût sociétal déjà engagé. Le prédictif fort vise à éviter qu'un coût sociétal ne soit engagé. Le régime d'indication spécialisée occupe une position intermédiaire : il peut éviter des gestes inutiles ou mieux sélectionner les patients, mais il intervient déjà dans une filière clinique avancée.

Une politique publique qui place ces trois régimes sous une même bannière sans les distinguer peut financer essentiellement l'optimisation tertiaire en croyant financer la prévention populationnelle.

## 5. Quatre familles non concurrentielles

Une fois la taxonomie restituée et le régime temporel désambiguïsé, quatre familles de jumeaux numériques en santé apparaissent distinctement.

### 5.1 Le jumeau d'organe

Le jumeau d'organe a pour référent un organe ou un système physiologique. Son couplage est, en usage clinique, le plus souvent unidirectionnel ou médié : la simulation informe la décision, mais n'agit pas directement sur le référent biologique. Son échelle dominante est péri-interventionnelle ou spécialisée. Son régime de validation est la fidélité mécaniste, évaluée par confrontation à l'imagerie, aux mesures physiques et aux résultats cliniques. Sa finalité est l'aide à la décision spécialisée, l'optimisation du geste, le dimensionnement thérapeutique, la formation et, dans certains cas, la stratification du risque.

Le cas cardiaque illustre cette famille. Le *Living Heart Human Model* de Dassault Systèmes est documenté (Baillargeon et al., *European Journal of Mechanics A/Solids*, 2014) comme un modèle éléments finis quatre chambres d'un cœur humain sain de référence, capable d'intégrer des dimensions mécaniques, électriques et fluidiques, et calibré pour reproduire des comportements physiologiques cardiaques dans des conditions de référence. Il constitue un modèle multi-physique générique, personnalisable selon plusieurs régimes.

Le premier régime procède par **adaptation géométrique** d'un modèle de référence : morphing, mise à l'échelle, paramétrage, ajustement manuel. Le second procède par **reconstruction patient-spécifique** depuis l'imagerie : segmentation de scanner ou d'IRM cardiaque, IRM avec rehaussement tardif au gadolinium pour cartographier la fibrose, maillage, puis ajustement des paramètres électrophysiologiques pour reproduire un comportement observé. La littérature distingue désormais plus clairement ces deux strates : *anatomical twinning* et *functional twinning*. La seconde est plus exigeante, plus coûteuse et plus dépendante de la qualité des données patient.

L'alimentation en données n'obéit pas au calendrier d'un capteur industriel. Le mode dominant est pré-procédural : une imagerie statique sert à reconstruire un jumeau utilisé pour préparer ou guider une décision. Le per-procédural existe dans certains cas sous forme de recalage, de visualisation augmentée ou de sous-modèles substitutifs, mais le solveur multi-physique haute-fidélité ne fonctionne pas nécessairement dans la boucle temps réel. Le post-procédural longitudinal appartient déjà à un autre régime, plus proche du jumeau de trajectoire.

La rétroaction vers le référent doit être formulée avec rigueur. Le myocarde n'est pas un actionneur adressable. Le cœur ne reçoit pas une commande de son jumeau. Trois cas limites existent : les dispositifs implantés programmables, les systèmes d'assistance circulatoire et certains gestes guidés comme l'ablation. Mais même dans ces cas, le jumeau agit le plus souvent sur une décision humaine ou sur un dispositif intermédiaire. *Il agit sur la main qui agit sur le cœur.*

***Au sens strict de Kritzinger, une partie importante des objets cliniques actuellement qualifiés de jumeaux d'organes relèvent donc plutôt du digital shadow ou du modèle patient-spécifique médié que du digital twin pleinement bidirectionnel.*** Cette précision terminologique n'est pas une coquetterie. Elle évite de promettre une boucle de contrôle là où l'on livre une aide à la décision.

Sur son périmètre propre, le jumeau d'organe traite des questions cliniquement majeures : ablation de tachycardie ventriculaire cicatricielle, ablation de fibrillation atriale persistante, planification de TAVR (Transcatheter Aortic Valve Replacement ) ou de TMVR (Transcatheter Mitral Valve Replacement), chirurgie cardiaque congénitale complexe, test virtuel de réponses thérapeutiques, stratification du risque rythmique post-infarctus. Ces questions ont un point commun : la décision est fortement structurée par une géométrie patient et par une physiologie modélisable.

Le terrain le plus avancé en validation prospective est aujourd'hui celui de la TV (Tachycardie Ventriculaire) cicatricielle post-infarctus. Hwang et collègues, dans *Circulation: Arrhythmia and Electrophysiology* (2024), ont créé des jumeaux numériques de 18 patients à partir d'IRM cardiaque préprocédurale avec rehaussement de contraste, simulé par stimulation rapide les circuits de TV, dérivé les cibles d'ablation virtuelles, puis confronté ces cibles à l'ablation invasive. Les jumeaux ont identifié les sites critiques de TV avec une sensibilité de 81,3 %, une spécificité de 83,8 % et une valeur prédictive négative de 98,8 %. Ces chiffres n'établissent pas que le jumeau remplace la cartographie invasive. Ils établissent que, sur cohorte limitée mais prospective, un modèle reconstruit à partir d'imagerie standard peut désigner *non-invasivement* des cibles dont l'accord avec les sites critiques mappés en salle est élevé. Le périmètre de validité est explicite : 18 patients, ischémique cicatriciel, IRM-LGE de qualité interventionnelle. Le résultat est mobilisable dans ce périmètre.

***Ce qui ne signifie pas que toutes les grandes questions cardiovasculaires relèvent du jumeau d'organe.*** La prédiction d'un NSTEMI, par exemple, met en jeu rupture ou érosion de plaque, inflammation, thrombose, état vasculaire, facteurs biologiques et trajectoire de risque. Ce n'est pas d'abord une question de géométrie myocardique. Les objets pertinents existent ailleurs : modèles coronaires dédiés type FFR-CT, scores de risque, modèles longitudinaux, données EHR, trajectoires biologiques et comportementales. *L'organe simulé n'épuise pas la clinique.*

MEDITWIN constitue en France l'expression la plus visible et la plus structurée de cette famille. Il n'est pas nécessaire de réduire son importance. Il faut seulement éviter qu'elle absorbe la définition de toutes les autres.

## 5.2 Le jumeau de trajectoire patient

Le jumeau de trajectoire a pour référent un patient dans sa dimension longitudinale. Il agrège événements cliniques, biomarqueurs, traitements, comportements, expositions,

données de suivi, contexte social et environnemental lorsque ces données sont disponibles. Son échelle est celle des mois ou des années. Son régime de validation est la capacité à produire une information exploitable pour anticiper, prévenir, ajuster ou comparer des trajectoires.

C'est le régime des modèles probabilistes longitudinaux, des architectures contrefactuelles, des bras synthétiques comparateurs, des modèles cliniquement informés, et plus largement des systèmes qui traitent le patient non comme une géométrie instantanée, mais comme une trajectoire évolutive.

Ce régime est celui de la médecine prédictive au sens fort. Il ne demande pas seulement : *que se passera-t-il si l'on fait ce geste ?* Il demande : *quelle trajectoire ce patient risque-t-il de suivre, et quelle décision actuelle peut modifier cette trajectoire ?*

La différence avec le jumeau d'organe n'est pas une différence de noblesse scientifique. C'est une différence de référent, de temporalité, de données et de validation. Un jumeau de trajectoire peut être moins spectaculaire visuellement qu'un organe 3D. Il peut aussi être plus directement transformant pour la prévention, le suivi chronique et la médecine territoriale. Comme souvent, ce qui est le moins télégénique est parfois le plus structurant. Observation banale, mais qu'une époque qui confond volontiers une preuve avec une belle image gagne à se rappeler.

### 5.3 Le jumeau territorial

Le jumeau territorial a pour référent un bassin de population. Il mobilise des déterminants épidémiologiques, environnementaux, démographiques, organisationnels et médico-sociaux. Son couplage est typiquement unidirectionnel ou décisionnel : il alimente des arbitrages d'allocation, de prévention, de planification ou de coordination. Son horizon est celui des mois, des années, parfois des décennies.

Son régime de validation n'est pas la fidélité anatomique. C'est la fidélité décisionnelle : le système permet-il de mieux allouer les ressources, de détecter des signaux faibles, de prioriser une intervention publique, de réduire une rupture d'accès, d'anticiper une tension hospitalière ou de cibler une campagne de prévention ?

Le jumeau territorial est moins proche du simulateur d'organe que du système d'aide à la décision populationnelle. Le nommer *jumeau numérique* n'est pas une extension abusive. C'est un retour à l'idée initiale : représenter un référent réel complexe, le coupler à des données, simuler des évolutions possibles, et améliorer une décision.

### 5.4 Le jumeau de parcours

Le jumeau de parcours a pour référent une pathologie, un épisode de soin ou une séquence médico-organisationnelle traversée par une population hétérogène de patients. Son objectif n'est pas de simuler un organe, mais de comprendre comment les patients

circulent, décrochent, reviennent, changent de ligne thérapeutique, subissent des délais, des ruptures ou des pertes en ligne.

Son régime de validation repose sur la fidélité aux données de vie réelle et sur le pouvoir explicatif des variations observées. Il permet d'identifier les frictions, les retards, les pertes de chance, les dépendances organisationnelles et les écarts territoriaux.

Il est particulièrement pertinent dans les pathologies chroniques, l'oncologie, les maladies rares, la santé mentale, la gériatrie, les parcours post-aigus et les prises en charge complexes. Là encore, le référent n'est pas une structure anatomique. C'est une trajectoire collective organisée.

Ces quatre familles ne sont pas concurrentielles. Elles ne couvrent pas les mêmes besoins, ne se valident pas par les mêmes critères, et n'ont pas vocation à vivre dans les mêmes architectures industrielles.

Une stratégie nationale cohérente les articule. Une stratégie confuse laisse l'une absorber silencieusement les trois autres.

## 6. Ce que la contraction rend invisible

La réduction implicite du *jumeau numérique* au seul jumeau d'organe produit une conséquence directe : elle rend moins visibles les objets qui portent potentiellement la transformation la plus large du système de santé.

Prenons un premier scénario.

Une patiente âgée, polypathologique, vivant en EHPAD ou dans une zone à faible densité médicale, présente insuffisance cardiaque à fraction d'éjection préservée, diabète, hypertension, fibrillation atriale et bronchopathie chronique. Aucune intervention n'est prévue. La question clinique n'est pas de planifier un geste, mais d'anticiper une décompensation. Ce qui change, semaine après semaine, n'est pas la géométrie du myocarde. Ce sont la volémie, la fréquence respiratoire, la qualité du sommeil, l'observance, l'infection intercurrente, la fonction rénale, le poids, l'environnement de soins.

Dans ce contexte, un jumeau d'organe haute-fidélité a une utilité limitée (notamment si son domaine de validité n'a pas été défini). Le bon objet est un jumeau de trajectoire compact : modèle compartimental cardio-rénal couplé à des données de télémétrie domestique, apprentissage sur cohortes comparables, alerte précoce, adaptation thérapeutique avant hospitalisation.

L'ordre de grandeur des performances accessibles est aujourd'hui documenté. Pavon et collègues, dans une étude prospective non randomisée portant sur 150 patients IC en post-décharge sur un an, ont entraîné un modèle LSTM exploitant signes vitaux télémonitorés et profil patient pour prédire dynamiquement le risque de réadmission à 30 jours. Le modèle détecte les réadmissions émergentes avec une sensibilité supérieure à 71 %, une

spécificité supérieure à 75 %, et une AUROC de l'ordre de 80 %, performance maintenue au-dessus de 78 % d'AUROC même en réduisant la fréquence de télémonitoring à un jour sur deux. Ces chiffres ne prouvent pas qu'un modèle de trajectoire surpasse universellement un suivi clinique structuré ; ils prouvent qu'à un niveau de performance défendable, sur cohorte clinique réelle, un objet de la famille trajectoire existe, est validé, et est déployable sur infrastructure légère. Ce que cette littérature ne résout pas : l'effet net sur les hospitalisations en pratique courante, qui dépend autant de l'organisation des soins que du modèle prédictif lui-même. Les méta-analyses récentes sur le télémonitoring IC restent contrastées sur ce point. Le jumeau de trajectoire est un instrument ; ce qu'il devient cliniquement dépend de la chaîne dans laquelle il s'insère.

L'asymétrie d'échelle avec le jumeau d'organe est instructive. Là où un solveur électrophysiologique haute-fidélité mobilise plusieurs jours-CPU par patient, un modèle compact de trajectoire IC s'exécute en temps quasi-réel sur infrastructure légère, pour des cohortes potentiellement de plusieurs centaines de milliers de patients. La géométrie d'un cœur ne change pas en sept jours. Le pronostic vital, parfois, oui.

#### Deuxième scénario.

Un patient post-infarctus présente une fraction d'éjection réduite et se trouve dans la zone grise d'une indication de défibrillateur implantable. Ici, le jumeau d'organe peut être extrêmement pertinent. La géométrie de la cicatrice, le substrat électrophysiologique et l'inductibilité *in silico* peuvent enrichir la décision au-delà de la fraction d'éjection seule. C'est précisément ce que documente la cohorte Hwang citée plus haut : sur 18 patients, sensibilité 81 %, spécificité 84 %, valeur prédictive négative 98 %. Cette dernière métrique mérite d'être soulignée : une VPN de cet ordre, si elle se confirme sur cohortes plus larges, ouvre la voie à une *désindication informée* pour les patients dont le jumeau ne génère pas d'inductibilité de TV cliniquement plausible.

L'enjeu n'est pas seulement scientifique. Il est industriel : peut-on passer d'un modèle haute-fidélité coûteux et spécialisé à une version suffisamment robuste, suffisamment rapide et suffisamment intégrable pour être utilisée au-delà de quelques centres experts ? En France, plusieurs milliers de patients par an relèvent d'une discussion d'indication de défibrillateur implantable, dont une part significative en prévention primaire ; le périmètre des centres capables aujourd'hui de produire un jumeau électrophysiologique haute-fidélité ne couvre qu'une fraction de cette population. Réduire l'écart entre ce que le paradigme peut prouver scientifiquement et ce qu'il peut industrialiser est précisément le travail des modèles à ordre réduit, des surrogates différentiables et des architectures hybrides.

Ce scénario illustre le régime d'indication spécialisée. Le patient est déjà dans une filière. Le geste n'est pas encore automatiquement décidé. Le jumeau peut éviter une intervention inutile ou mieux sélectionner les patients qui en bénéficieront. Ce n'est ni du péri-

interventionnel pur, ni de la prévention populationnelle. C'est précisément pour cela qu'il faut une taxonomie plus fine.

Ces deux scénarios ne s'opposent pas à MEDITWIN. Ils tracent une autre carte.

Le premier montre une question pour laquelle aucun jumeau d'organe, quelle que soit sa fidélité, ne constitue l'objet principal, parce que la question n'est pas géométrique.

Le second montre une question pour laquelle le jumeau d'organe est conceptuellement pertinent, mais où l'enjeu devient la réduction d'ordre, l'industrialisation, l'intégration et le passage à l'échelle.

Cette asymétrie n'est pas intrinsèque à la valeur clinique des approches, mais à leur maturité industrielle relative et à leurs contraintes de calcul et de données. Elle peut évoluer.

Dans les deux cas, l'architecture compte autant que le modèle.

La médecine préventive populationnelle, elle, opère plus en amont.

Sa question n'est pas : *comment optimiser ce geste ?*

Sa question est : *qui faut-il identifier comme à risque pour que ce geste, cette hospitalisation ou cette perte de chance n'advienne pas ?*

Cette question ne se résout pas par la seule modélisation mécaniste d'un organe. Elle se résout par la modélisation de trajectoires et de populations, autrement dit par des familles de jumeaux qui n'ont ni les mêmes données, ni les mêmes architectures, ni les mêmes régimes de preuve.

*L'excellence en santé pour toutes et tous, partout sur le territoire, n'est pas compatible avec une définition du jumeau numérique qui supposerait implicitement un IHU, une imagerie de pointe et une plateforme industrielle lourde. Ces conditions de possibilité sont celles du jumeau d'organe haute-fidélité. Elles ne sont pas celles du jumeau territorial, ni de nombreux jumeaux de trajectoire, ni des jumeaux de parcours.*

Il ne s'agit pas d'opposer les familles. Il s'agit de reconnaître que la stratégie nationale en santé numérique a besoin des quatre, et que cette reconnaissance suppose un vocabulaire qui ne fasse pas passer l'une pour l'autre.

## 7. Articulation doctrinale

Cette thèse terminologique n'est pas une hypothèse isolée. Elle s'inscrit dans une position plus générale : en santé régulée, l'IA n'est pas d'abord un problème d'algorithme. C'est un problème d'architecture, de référent, de validation et de décision.

Le même raisonnement vaut pour les benchmarks, pour les agents, pour les systèmes de recommandation clinique, pour les architectures événementielles et pour les jumeaux

numériques. Un artefact technique ne peut être évalué correctement que si son régime d'usage est correctement nommé.

Un jumeau d'organe péri-interventionnel ne devient pas un instrument de médecine prédictive populationnelle par simple montée en maturité. Il peut passer du prototype spécialisé à l'usage clinique spécialisé ; ce passage reste intra-régime. Pour devenir un outil de prévention populationnelle, il faudrait changer de référent, d'échelle, de données, de validation et d'économie de déploiement. *Ce n'est plus une promotion du même artefact. C'est la constitution d'un autre artefact.*

C'est ici que la distinction devient opératoire. Elle empêche qu'un succès dans un régime soit utilisé comme preuve implicite dans un autre.

Un simulateur péri-interventionnel peut être excellent sans constituer une stratégie de prévention. Un modèle de trajectoire peut être utile sans produire une anatomie 3D spectaculaire. Un jumeau territorial peut être décisif sans ressembler à un dispositif médical. Un jumeau de parcours peut transformer une organisation sans jamais simuler un organe.

Le point commun n'est pas la forme. Le point commun est le couplage discipliné entre un référent réel, une représentation numérique, une finalité décisionnelle et un régime de validation.

## 8. Objections

**Première objection : élargir le terme le dilue.**

C'est l'inverse. On ne dilue pas, on restitue. La taxonomie proposée ici est plus proche des formulations historiques de Grieves, de la définition aérospatiale de Glaessgen et Stargel, des constats de Negri et de la catégorisation de Kritzinger que ne l'est la contraction récente du concept au seul organe simulé. La dilution n'est pas dans la restitution du champ. Elle est dans la capture d'un concept par son instance la plus visible.

**Deuxième objection : cette distinction ne change rien aux pratiques.**

Elle change au contraire les critères de financement, les grilles d'évaluation, les régimes de validation et les trajectoires industrielles. Un jumeau de trajectoire évalué avec les critères d'un jumeau d'organe échoue structurellement, non parce qu'il est médiocre, mais parce qu'il est jugé dans un cadre qui n'est pas le sien. L'inverse est également vrai.

**Troisième objection : cette note est une critique déguisée de MEDITWIN.**

Non. Elle ne porte ni sur la qualité scientifique du consortium ni sur la pertinence de ses cas d'usage. Elle porte sur la contraction conceptuelle qui peut s'installer autour de lui. Reconnaître l'excellence d'un projet dans son périmètre de validité n'interdit pas de rappeler que ce périmètre n'épuise pas la catégorie conceptuelle dans laquelle il s'inscrit. Les deux opérations sont nécessaires conjointement.

Le jumeau d'organe MEDITWIN est ce qu'il dit être, à un très haut niveau. Ce qu'il n'est pas, c'est l'objet unique sous lequel toute la promesse publique des jumeaux numériques en santé peut tenir.

**Quatrième objection : la distinction entre prédictif fort, indication spécialisée et péri-interventionnel est excessive.**

Elle est au contraire minimale. Un solveur prédit une déformation. Un modèle de risque cardiovasculaire prédit un événement à dix ans. Un modèle d'indication prédit le bénéfice attendu d'un geste chez un patient déjà identifié. Les trois utilisent le même verbe. Ils ne relèvent pas du même régime de décision.

Le premier s'inscrit dans une logique procédurale. Le deuxième dans une logique préventive. Le troisième dans une logique spécialisée d'arbitrage. Ils ne se financent pas de la même manière, ne se valident pas avec les mêmes critères, ne s'industrialisent pas dans les mêmes architectures et ne produisent pas la même valeur publique.

Confondre ces régimes conduit à juger un objet avec les promesses d'un autre. Cela produit des arbitrages structurellement faux qui conservent toutefois une apparence de rationalité procédurale, c'est-à-dire la forme la plus difficile à corriger d'un défaut de cadrage, parce qu'elle se présente comme son contraire.

## 9. Limites

Cette note ne résout pas la question de la validation clinique propre à chaque famille. Elle ne traite pas non plus en détail de la gouvernance des données, qui devient centrale dès que l'on sort du cadre tertiaire fortement délimité. Elle ne préjuge pas enfin de la maturité industrielle relative des différentes familles. Le jumeau d'organe est aujourd'hui plus avancé que le jumeau territorial, tant en validation clinique qu'en intégration industrielle.

Elle n'épuise pas davantage les questions d'architecture interne : échelle pertinente de modélisation, modèles hybrides, composition multi-agents, maintien en condition opérationnelle, qualification réglementaire, validation médico-économique, auditabilité, supervision humaine, réversibilité. Ces questions relèvent d'un cadre complémentaire.

L'évolution rapide des modèles à ordre réduit (eikonal hybride, réseaux informés par la physique, surrogates différentiables, modèles compacts couplés à des données longitudinales) pourrait réduire dans les années qui viennent une partie de l'asymétrie computationnelle entre jumeaux d'organe haute-fidélité et jumeaux plus légers. Cette convergence n'annulera pas la distinction taxonomique. Elle en déplacera certaines conséquences industrielles.

Le scénario le plus plausible n'est pas la substitution d'une famille par une autre. C'est une cohabitation : jumeau d'organe haute-fidélité dans le tertiaire expert, jumeau d'organe compact dans certaines indications spécialisées, jumeau de trajectoire dans le suivi

chronique et la prévention, jumeau territorial dans le pilotage populationnel, jumeau de parcours dans l'optimisation organisationnelle.

## Conclusion

Le jumeau numérique n'est pas un organe simulé. C'est une classe de représentations couplées à un référent réel, définie par quatre dimensions indépendantes : *référent, couplage, échelle temporelle, régime de validation*.

En santé, cette classe se décline au moins en quatre familles : jumeau d'organe, jumeau de trajectoire patient, jumeau territorial, jumeau de parcours. À cette taxonomie s'ajoute une distinction temporelle décisive entre péri-interventionnel, indication spécialisée et prédictif au sens fort.

Cette clarification ne relève pas d'une correction terminologique de pure forme. Elle conditionne la lisibilité des complémentarités entre projets, la pertinence des critères de financement, la rigueur des grilles d'évaluation et la possibilité même que la médecine préventive populationnelle trouve sa place dans la stratégie de santé numérique au-delà du cercle des excellences tertiaires.

Avant de demander *comment fabriquer un jumeau numérique*, il faut déterminer *de quel type de réalité il s'agit, pour quelle décision, à quelle échelle temporelle, avec quel régime de validation et sous quelle forme de médiation humaine*. Les choix d'architecture, de données, de calcul, de déploiement et de régulation en découlent.

Faute de cette distinction, les arbitrages peuvent demeurer rationnels dans leur forme tout en étant structurellement mal posés.

Le débat n'oppose pas des approches. Il porte sur la capacité à ne pas confondre une instance visible du concept avec le concept lui-même, et sur la manière d'articuler excellence technologique et transformation effective du système de santé.

*Le jumeau d'organe haute-fidélité tient ses promesses dans son périmètre. La promesse publique de médecine prédictive et préventive populationnelle est d'un autre ordre. Une stratégie nationale qui les distingue rigoureusement les sert toutes les deux. Une stratégie qui les confond les compromet ensemble.*

## Références principales

Baillargeon, B., Rebelo, N., Fox, D. D., Taylor, R. L., & Kuhl, E. (2014). The Living Heart Project: A robust and integrative simulator for human heart function. *European Journal of Mechanics A/Solids*, 48, 38-47.

Bhagirath, P., Strocchi, M., Bishop, M. J., Boyle, P. M., & Plank, G. (2024). From bits to bedside: entering the age of digital twins in cardiac electrophysiology. *EP Europace*, 26(12), euae295.

Glaessgen, E., & Stargel, D. (2012). The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles. *53rd AIAA Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*.

Grieves, M. (2002-2003). *Product Lifecycle Management*, conférences à l'Université du Michigan.

Hwang, M., Han, S., Park, M.-S., Yu, H. T., Kim, T.-H., et al. (2024). Heart Digital Twins Predict Features of Invasive Reentrant Circuits and Ablation Lesions in Scar-Dependent Ventricular Tachycardia. *Circulation: Arrhythmia and Electrophysiology*.

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.

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.

Sakata, K., Bradley, R. P., Prakosa, A., Yamamoto, C. A. P., Ali, S. Y., et al. (2024). Assessing the arrhythmogenic propensity of fibrotic substrate using digital twins to inform a mechanisms-based atrial fibrillation ablation strategy. *Nature Cardiovascular Research*.

Trayanova, N. A., & Prakosa, A. (2024). Up Digital and Personal: How Heart Digital Twins Can Transform Heart Patient Care. *Heart Rhythm O2*.

## Voir également dans ce corpus

Vetillard, J. (2025). *Do Buzzwords Dream of Clearer Substance? The Journey of Digital Twins*. LinkedIn.

Vetillard, J. (2026). *L'IA en santé n'est pas uniquement un problème d'algorithme. C'est avant tout un problème d'architecture*. Twingital Institute.