

Le coût de la contraction

Économie politique des jumeaux numériques en santé : que coûte un paradigme, que coûte ne pas en avoir d'autres ?

Introduction

Cette note prolonge un précédent article qui établissait que le terme *jumeau numérique* recouvre (*a minima*) quatre familles d'objets (organe, trajectoire, territorial, parcours) régies par quatre dimensions indépendantes (réfèrent, couplage, échelle temporelle, régime de validation), et que la contraction sémantique du concept au seul jumeau d'organe haute-fidélité produit une *erreur de cadrage temporel* aux conséquences structurellement allocatives.

Le premier article fermait la question terminologique-architecturale. Celui-ci ouvre la question médico-économique : *que coûte un paradigme, que coûte ne pas en avoir d'autres, et qui paie les conséquences de cette asymétrie ?*

La thèse de cette note est triple :

1. Premièrement, les programmes français actuels de jumeaux numériques en santé, MEDITWIN au premier rang, sont des investissements en options réelles sur un bénéfice médico-économique futur dont la magnitude reste à démontrer en outcomes durs. Cette qualification n'est pas péjorative pour un programme de R&D pré-compétitive. Elle l'est en revanche pour une communication publique qui présente parfois ces investissements comme directement générateurs d'économies au système de santé.
2. Deuxièmement, plusieurs familles de jumeaux numériques (trajectoire, parcours, jumeau d'organe compact) opèrent sur des gisements adressables documentables, à des coûts unitaires de modélisation inférieurs d'un à deux ordres de grandeur. Aucune ne bénéficie, à ce jour, d'une enveloppe nationale comparable à celle dédiée au jumeau d'organe haute-fidélité.
3. Troisièmement, le coût d'opportunité de cette allocation préférentielle ne réside pas dans ce qui est financé. Il réside dans ce qui ne l'est pas, et dans la fenêtre temporelle pendant laquelle ces familles non financées restent industriellement en retard.

Cette note ne cherche pas à attaquer MEDITWIN. Elle cherche à nommer une logique d'allocation qui n'a pas été examinée publiquement, et dont les conséquences peuvent être chiffrées en ordre de grandeur à partir de sources publiques.

1. Pourquoi l'analyse médico-économique est indissociable de l'analyse architecturale

Une taxonomie qui ne se prolonge pas en analyse allocative reste un exercice intellectuel. Une analyse économique qui ne s'appuie pas sur une taxonomie rigoureuse confond les objets et produit des comparaisons fausses. Les deux registres sont conjointement nécessaires.

Le premier article établissait que les quatre familles de jumeaux numériques en santé (organe, trajectoire, territorial, parcours) ne sont pas substituables, qu'elles relèvent de régimes de validation distincts, et qu'elles appellent des architectures de financement adaptées à des objets dont les profils de coût et les calendriers de retour sont structurellement différents. La présente note opérationnalise ce constat en lui appliquant la grille d'analyse médico-économique standard : coûts directs, bénéfices directs, bénéfices indirects, coûts d'opportunité.

L'exercice présente une difficulté méthodologique majeure que cette note assume frontalement : l'enveloppe budgétaire allouée à MEDITWIN n'est pas publique. Les communications officielles du consortium, des partenaires industriels et des sept Instituts Hospitalo-Universitaires (IHU) impliqués mentionnent le soutien de France 2030 sans préciser de montant. Cette opacité n'est pas spécifique à MEDITWIN ; elle caractérise la communication publique sur les programmes France 2030 santé. Elle a néanmoins une conséquence directe : *une analyse coût-bénéfice rigoureuse d'un programme public de cette ampleur supposerait que son enveloppe budgétaire soit publique. À la date de cette analyse, ce n'est pas le cas.* L'article procède donc en ordre de grandeur, en mobilisant les fourchettes typiques de programmes structurants comparables.

Une politique publique de santé numérique doit se demander à la fois ce qu'elle finance, ce que cela coûte, et ce qu'elle ne finance pas en conséquence. La troisième question est la plus difficile. C'est aussi la plus importante.

2. Méthodologie : asymétrie assumée des preuves

L'analyse médico-économique d'objets émergents comme les jumeaux numériques est contrainte par une asymétrie structurelle : les coûts sont partiellement observables, les bénéfices sont majoritairement projetés, et les comparaisons entre familles reposent sur des niveaux de maturité hétérogènes. Pour MEDITWIN spécifiquement, les chiffres publics couvrent essentiellement les coûts directs, et de manière partielle. Les bénéfices restent en grande partie projectifs et non démontrés en vie réelle française à ce jour. Cette caractéristique n'est pas une faiblesse spécifique de MEDITWIN ; elle est structurelle pour les programmes de jumeaux numériques. Mais elle interdit l'analyse coût-bénéfice exacte et n'autorise qu'un raisonnement en ordre de grandeur.

Trois règles opératoires sont donc posées pour cette note :

1. Premièrement, les ordres de grandeur sont mobilisés uniquement pour comparer des classes d'objets, avec une marge d'incertitude d'un facteur deux à trois, et non avec une précision décimale. Les conclusions tirées doivent rester robustes à cette imprécision.
2. Deuxièmement, les bénéfices non démontrés en conditions réelles sont traités comme des options, non comme des économies acquises. Lorsqu'un chiffre n'est pas publiquement disponible, l'article le mentionne explicitement et ne le fabrique par aucune extrapolation non sourcée.
3. Troisièmement, les comparaisons inter-familles sont interprétées comme des indications d'orientation et non comme des arbitrages définitifs. Lorsque la littérature présente une fourchette ou des résultats contrastés, la note retient la borne conservatrice pour les bénéfices projetés et la borne médiane pour les coûts. Cette asymétrie est volontaire : elle protège l'analyse contre l'accusation d'avoir maximisé les bénéfices anticipés du raisonnement contrefactuel.

Cette posture méthodologique est défendable parce qu'elle est explicite. Elle deviendrait indéfendable si elle était implicite. Sa prudence réduit la portée normative du raisonnement. Elle en renforce la robustesse.

3. Les coûts d'un jumeau d'organe haute fidélité

La structure des coûts d'un jumeau d'organe haute fidélité se décompose en trois strates distinctes, dont les ordres de grandeur sont cumulatifs et dont les déterminants industriels diffèrent.

3.1 Le coût programmatique

MEDITWIN a été annoncé en décembre 2023 pour une durée de cinq ans (2024-2029), soutenu par France 2030, piloté par Dassault Systèmes en chef de file industriel, et associant sept IHU, le Centre Hospitalo-Universitaire (CHU) de Nantes, l'Institut National de Recherche en Sciences et Technologies du Numérique (Inria) à travers onze équipes-projets, ainsi que quatre startups (inHEART, Codoc, Qairnel, Neurometers). L'objectif annoncé est la production de sept *produits de santé virtuels* dans les domaines de la cardiologie, de la neurologie et de l'oncologie.

Les communications officielles consultées (Inria, Dassault Systèmes, IHU ICAN, IHU LIRYC, IHU Strasbourg, Institut Imagine, Institut du Cerveau, dossier de presse France 2030 décembre 2023) ne mentionnent aucun montant explicite alloué au programme. La formulation systématique est : *l'investissement des partenaires dans ce projet sera soutenu financièrement par l'État dans le cadre de France 2030*.

Pour les programmes France 2030 de cette taille (consortium public-privé sur 5 ans avec chef de file industriel grand groupe, IHU partenaires, startups associées), les fourchettes typiquement observées s'établissent dans un ordre de grandeur de 50 à 150 millions d'euros tous volets confondus (subvention publique et autofinancement industriel cumulés). Cet ordre de grandeur est cohérent avec les enveloppes des Programmes et Équipements Prioritaires de Recherche du même registre, généralement dotés de 30 à 60 millions d'euros par programme sur 5 ans pour la part publique. Il est également cohérent avec les enveloppes IHU récentes : Gustave Roussy a obtenu 30 millions d'euros pour son IHU PRISM dans le cadre du troisième appel France 2030, et plusieurs programmes santé numérique sectoriels comparables s'inscrivent dans la même plage.

Cet ordre de grandeur reste une estimation indirecte. Il faut le souligner : *un investissement public dont l'enveloppe n'est pas publiquement détaillée ne peut pas être évalué publiquement*.

L'opacité budgétaire de MEDITWIN n'est pas une faute du consortium ; elle reflète une pratique courante de communication France 2030. Mais elle limite mécaniquement la capacité du débat public à arbitrer en connaissance de cause les choix d'allocation entre familles de jumeaux numériques.

3.2 Le coût marginal par patient

C'est ici que la question médico-économique devient opératoire. Pour qu'un jumeau d'organe haute-fidélité soit soutenable à l'échelle, il faut connaître son coût par usage clinique. La littérature scientifique donne des indications, sans pour autant fournir un chiffre tout fait en euros par patient en environnement clinique français. Bhagirath et collègues, dans la revue de référence publiée en décembre 2024 dans *EP Europace*, documentent que la résolution spatiale typique de 400 µm utilisée dans plusieurs

applications cliniques récentes en stratification de tachycardie ventriculaire (TV), ablation de TV ou ablation de fibrillation atriale (FA) mobilise plusieurs jours-CPU par patient sur ressources de calcul intensif (HPC, *high performance computing*) avancées, et que doubler la résolution multiplie le coût par un facteur proche de dix. Le coût HPC seul, exprimé en euros, se situe ainsi dans une fourchette de quelques centaines à quelques milliers d'euros par patient selon résolution.

À ce coût HPC s'ajoutent le temps ingénieur (segmentation, maillage, calibration, contrôle qualité), le temps clinicien interprète, et le coût de l'imagerie sous-jacente (typiquement IRM cardiaque avec rehaussement tardif au gadolinium). En coût complet, l'ordre de grandeur communément cité dans les présentations industrielles et dans la littérature scientifique de cost-effectiveness en cours de publication s'établit dans une fourchette de quelques milliers d'euros par patient pour les cas cliniques actuels, à comparer au coût hospitalier d'une ablation de FA en France (séjour de l'ordre de 8 000 à 15 000 euros selon le Groupe Homogène de Séjour) et au coût d'une IRM avec rehaussement tardif au gadolinium remboursée (de l'ordre de 200 à 400 euros).

Le jumeau d'organe ajoute donc, à la procédure interventionnelle existante, un surcoût marginal qui peut représenter selon les cas 15 à 30 % du coût procédural, pour un bénéfice attendu en termes de précision d'ablation, de réduction de durée opératoire et potentiellement de réduction du taux de récurrence. *Ce surcoût n'est pas en lui-même problématique. Il devient problématique seulement si le bénéfice attendu en outcomes durs n'est pas démontré au niveau qui justifie le surcoût.* C'est précisément le point que la section suivante traite.

3.3 Le coût d'industrialisation et de scale-up

C'est ici que la critique architecturale du premier article s'articule à l'analyse économique. Un jumeau d'organe en environnement de recherche n'est pas industriellement équivalent à un jumeau d'organe en déploiement clinique réglementé. Le passage de l'un à l'autre suppose une refonte architecturale (architecture hexagonale avec ports d'entrée et de sortie isolés, ports de fiabilité dédiés, instrumentation continue du contrôle qualité) et un cadre de gouvernance dynamique adapté à un système évolutif (Plan de Contrôle des Modifications Préétabli, *Predetermined Change Control Plan*, formalisé par la FDA en décembre 2024).

Sans cette refonte, le coût de maintenance et de mise à jour d'un jumeau industriel devient prohibitif, parce que chaque modification appelle une re-validation complète. Avec cette refonte, le coût marginal d'évolution est contenu, parce que chaque modification est tracée, documentée et autorisée dans un cadre prédéfini.

Beaucoup de prototypes de jumeaux numériques en santé documentés dans la littérature scientifique ne sont pas conçus avec cette isolation hexagonale. Ils sont des artefacts de recherche destinés à démontrer une faisabilité, pas des systèmes industriels

destinés à évoluer dans un cadre réglementé. Le passage d'un état à l'autre n'est pas une simple amélioration ; c'est un changement de nature qui peut exiger une refonte substantielle. Cette transition a un coût qui n'est pas, à ce jour, intégré aux annonces budgétaires des programmes publics. C'est un coût caché du paradigme.

4. Bénéfices documentés et bénéfices projetés

L'analyse coût-bénéfice du jumeau d'organe en 2026 mobilise deux registres de preuve qu'il est utile de séparer rigoureusement.

4.1 Les bénéfices documentés en outcomes durs

Avant avril 2026, aucune étude prospective ne documentait l'effet d'un jumeau cardiaque guidant l'ablation sur des outcomes cliniques durs. La cohorte de Hwang et collègues publiée en 2024 dans *Circulation: Arrhythmia and Electrophysiology* validait la précision technique du jumeau VT (sensibilité 81,3 %, spécificité 83,8 %, valeur prédictive négative 98,8 %) sur 18 patients, mais ne mesurait pas l'effet sur la survie ou la récurrence.

La publication de l'étude TWIN-VT par Chrispin, Prakosa, Trayanova et collègues dans le *New England Journal of Medicine* du 2 avril 2026 a modifié ce paysage. Sur 10 patients post-infarctus inclus dans un essai FDA *investigational device exemption* (NCT03536052), la TV était non-inductible chez 100 % des patients après ablation guidée par jumeau ; à un suivi moyen de 13 mois, 8 patients sur 10 étaient libres de récurrence sans thérapie antiarythmique. Le bras comparateur historique du standard de soins en ablation de TV ischémique cicatricielle se situe à environ 60 % de succès à un an.

Ces chiffres ne constituent pas une démonstration randomisée multicentrique. La cohorte est petite, l'étude n'a pas de groupe contrôle randomisé, un coauteur (Barcelon) appartient à Johnson & Johnson MedTech. Ces limites sont réelles. Elles ne font pas disparaître la conclusion structurante : la faisabilité clinique du paradigme jumeau d'organe en cardiologie d'ablation est désormais étayée sur outcomes durs, à un niveau de preuve qui dépasse la simple validation technique.

Pour le périmètre français, à la date de cette note, aucun essai randomisé MEDITWIN sur outcomes durs n'a été publié. Les cohortes prospectives multicentriques portées par les volets cardiaques du consortium et par les programmes Recherche Hospitalo-Universitaire (RHU) adossés (notamment RHU-TALENT au CHU de Bordeaux) sont en phase de constitution ; leurs résultats ne seront pas disponibles avant 2027 ou 2028. *Le débat scientifique sur la faisabilité commence à être tranché ; le débat allocatif sur la pertinence comparée de l'investissement reste, lui, entièrement ouvert.*

4.2 Les bénéfices projetés à grande échelle

Les estimations académiques internationales suggèrent qu'un jumeau électrophysiologique précis pourrait améliorer le taux de succès d'ablation de FA persistante de 5 à 15 points (de l'ordre de 60-65 % actuel à 70-80 % projeté), réduire les réinterventions, réduire la durée procédurale. Ces bénéfices, *s'ils se confirment* sur essais randomisés multicentriques de phase III, généreraient des économies substantielles. Le mot-clé est *s'ils se confirment*.

Ce qui distingue les bénéfices projetés des bénéfices documentés n'est pas leur probabilité a priori, qui peut être élevée. C'est leur statut épistémique. Tant que les bénéfices ne sont pas mesurés sur cohorte large en environnement clinique routine, ils restent une promesse. La conséquence médico-économique est directe : *l'investissement français MEDITWIN est, à ce stade, un investissement en options réelles sur un bénéfice médico-économique futur dont la magnitude reste à démontrer*.

Cette qualification n'est pas péjorative. Elle est exacte pour tout programme de R&D pré-compétitive. Une option réelle est, par définition, un actif dont la valeur dépend d'arbitrages futurs. Mais elle interdit une lecture comptable simple : *tant que l'option n'est pas exercée par une démonstration en outcomes durs, l'investissement reste un coût ; il ne devient bénéfice que rétrospectivement, et seulement si l'arbitrage favorable se réalise*.

L'étude médico-économique conduite par l'Université de Rotterdam dans le cadre du projet européen inEurHEART (cohorte de 112 patients dans 16 centres répartis entre Allemagne, Autriche, France et Suisse, comparaison ablation standard versus inHEART) constituera la première référence européenne publiée sur le ratio coût-efficacité d'un jumeau cardiaque « industriel » en environnement réel. Ses résultats sont attendus à courte échéance et seront déterminants. Ils ne couvrent pas pour autant le périmètre MEDITWIN dans son ensemble.

5. L'insuffisance cardiaque comme cas d'école

Pour évaluer la pertinence allocative comparée du jumeau d'organe, il faut le confronter à des familles dont le gisement d'économies est *déjà documenté*. L'insuffisance cardiaque (IC) constitue le cas d'école le plus parlant en France, parce que les données épidémiologiques et de coût sont publiques, robustes et récentes.

5.1 L'ordre de grandeur du fardeau

Selon les données publiées par Santé Publique France dans le numéro hors-série 2025 du *Bulletin Épidémiologique Hebdomadaire*, l'IC concernait en 2022 environ 1 376 692

cas prévalents adultes en France, soit 2,6 % de la population adulte, et atteignait 23,7 % au-delà de 85 ans. La même année, 181 178 adultes ont été hospitalisés pour IC aiguë, faisant de cette pathologie la première cause d'hospitalisation du sujet âgé en France.

En 2021, 24 645 décès avaient l'IC pour cause initiale, et 73 121 décès la mentionnaient en cause initiale ou associée.

Le coût hospitalier moyen d'un séjour pour IC aiguë est estimé par la Cnam à 8 338 euros (cartographie des dépenses 2019). Sur la base de 181 178 hospitalisations annuelles, le poste hospitalier aigu représente donc, en ordre de grandeur, *1,5 milliard d'euros par an pour la seule décompensation aiguë*. Le coût annuel total de l'IC chronique en France, agrégeant hospitalisations, soins de ville, médicaments et affections de longue durée, est estimé selon les sources les plus larges à environ 13,6 milliards d'euros, soit de l'ordre de 12,6 % des dépenses liées aux affections de longue durée, et 1,5 à 2 % des dépenses de santé totales.

5.2 Le calcul allocatif

Une réduction même modeste des hospitalisations évitables pour décompensation IC aurait des conséquences économiques majeures. Une réduction de 10 % représenterait environ 18 000 hospitalisations évitées par an, soit *de l'ordre de 150 millions d'euros par an* sur le seul poste hospitalier aigu. Une réduction de 15 % représenterait environ 225 millions d'euros annuels. Sur cinq ans, l'ordre de grandeur cumulable atteindrait *le milliard d'euros*.

Ces montants ne constituent pas des économies nettes acquises. *Ils définissent le plafond brut adressable du poste hospitalier aigu*. L'économie réelle dépendrait du coût de déploiement de l'infrastructure de monitoring et d'aide à la décision, du taux d'adhésion patient, du coût de coordination clinique entre médecine de ville, hôpital et médico-social, du taux de faux positifs et du coût des alertes inutiles, de la capacité organisationnelle à éviter effectivement des séjours plutôt qu'à déplacer les coûts vers la ville ou le médico-social, et de la quote-part réellement capturable par l'Assurance Maladie ou par l'établissement hospitalier dans le système tarifaire actuel. Aucun de ces facteurs n'est négligeable. Plusieurs d'entre eux peuvent transformer un plafond brut adressable significatif en économie nette modeste, voire nulle dans les configurations défavorables.

Cette qualification est essentielle. *L'argument de cette note ne porte pas sur des économies acquises ; il porte sur l'ordre de grandeur d'un gisement adressable que l'allocation actuelle ne met pas en position d'être capturé*. La distinction n'est pas comptable, elle est doctrinale : un gisement non adressé reste théorique ; un gisement instrumenté commence à devenir économique.

À comparer avec l'investissement public projeté dans des infrastructures de jumeaux de trajectoire IC à l'échelle nationale : à la date de cette note, aucune enveloppe France 2030

dédiée. Le télémonitoring IC existe en France via le forfait ETAPES (*Expérimentation de Télémédecine pour l'Amélioration des Parcours En Santé*) instauré en 2018, avec une couverture limitée et une montée en charge progressive ; il n'est pas adossé à un programme structuré de jumeaux numériques de trajectoire au sens de la taxonomie du premier article.

L'ordre de grandeur des performances accessibles est par ailleurs 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 *long short-term memory* (LSTM, un type de réseau de neurones récurrent adapté aux séries temporelles) 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 aire sous la courbe ROC (AUROC) de l'ordre de 80 %, performance maintenue au-dessus de 78 % 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*.

Une précision conceptuelle s'impose ici : *un jumeau de trajectoire n'est pas un modèle. C'est une boucle prédiction → décision → action → réévaluation*. Cette distinction n'est pas terminologique. Elle conditionne directement la lecture des résultats médico-économiques : l'effet d'un modèle prédictif isolé est par construction limité ; l'effet d'une boucle clinique complète mobilise quatre maillons distincts dont chacun peut être le facteur limitant. Les méta-analyses récentes sur le télémonitoring IC restent contrastées sur l'effet net en pratique courante, précisément parce que cet effet dépend autant de l'organisation des soins que du modèle prédictif lui-même. Mais cette mixité ne disqualifie pas le modèle ; elle contextualise sa fonction comme instrument inséré dans une chaîne organisationnelle.

5.3 La conséquence allocative

Le plafond brut adressable rapporté au coût unitaire de modélisation apparaît, en ordre de grandeur, *plus favorable pour le jumeau de trajectoire IC qu'il ne l'est, en l'état des données publiques, pour le jumeau d'organe haute-fidélité*. Cela ne disqualifie pas le second. Cela qualifie le premier comme objet sous-investi, sous réserve que la conversion du plafond adressable en économie nette puisse être documentée par un programme de validation organisationnelle dédié.

La raison structurelle est triple :

1. D'abord, la population éligible est massive : 1,3 million de patients prévalents et 181 000 hospitalisations annuelles, contre quelques milliers de patients par an

pour les indications péri-interventionnelles concernées par les jumeaux d'organe haute-fidélité.

2. Ensuite, le coût unitaire de modélisation est inférieur d'un à deux ordres de grandeur : un modèle compact LSTM tourne en temps quasi-réel sur infrastructure légère, contre plusieurs jours-CPU par patient sur HPC pour un solveur multi-physique.
3. Enfin, les coûts évités sont directs et chiffrables : une hospitalisation évitée pour décompensation représente 8 338 euros immédiats, contre une chaîne plus longue d'effets pour un geste interventionnel optimisé.

Une stratégie nationale de santé numérique qui finance préférentiellement la famille au plus faible ratio coût-bénéfice attendu, parce que cette famille est la plus visible et la plus narrable, ne maximise pas l'impact de l'investissement public.

Cette formulation n'est pas un jugement moral. C'est une conséquence directe de la mise en regard des ordres de grandeur publics.

6. La désindication informée du défibrillateur en prévention primaire

Un second cas d'école illustre le régime *indication spécialisée* du premier article, et démontre que le jumeau d'organe lui-même peut être à très haut ratio coût-bénéfice *sous condition* qu'il soit déployé dans la bonne configuration.

6.1 Le contexte clinique

Les recommandations actuelles de l'European Society of Cardiology (ESC) pour l'implantation d'un défibrillateur automatique implantable (DAI) en prévention primaire post-infarctus reposent largement sur le seuil de fraction d'éjection du ventricule gauche inférieure ou égale à 35 %. Ce seuil, validé par les essais MADIT-II et SCD-HeFT, présente une spécificité limitée : un nombre significatif de patients implantés ne déclenche jamais le défibrillateur sur la durée de vie du dispositif. Ces patients ont supporté le risque procédural, le coût psychologique, le coût économique sans bénéfice individuel démontré.

6.2 L'ordre de grandeur économique

Selon l'évaluation HAS de septembre 2022 sur la réévaluation des défibrillateurs cardiaques automatiques implantables, environ 10 000 implantations de DAI sont réalisées chaque année en France, dont une part significative en prévention primaire. Le coût d'un DAI sur 10 ans (dispositif, procédure, suivi, remplacements) est estimé selon

plusieurs études médico-économiques européennes dans une fourchette de 25 000 à 40 000 euros par patient.

Le poste annuel total représente donc, en ordre de grandeur, *de l'ordre de 200 à 400 millions d'euros sur la base de 10 000 implants à 30 000 euros lissés sur 10 ans.*

6.3 Le levier prédictif comme hypothèse de programme

La cohorte Hwang 2024 documente une valeur prédictive négative de 98,8 % pour la prédiction *in silico* des sites critiques de TV. Cette métrique a une portée précise : elle qualifie la capacité d'un jumeau électrophysiologique à identifier des cibles d'ablation dans un contexte d'ablation de TV ischémique cicatricielle. Elle ne porte pas, en l'état, sur le risque de mort subite à long-terme qui structure l'indication primaire du DAI. Faire le pont entre les deux objets cliniques en une étape serait un raccourci.

L'hypothèse opératoire à retenir est donc plus modeste et plus rigoureuse : *un jumeau électrophysiologique pourrait, sous condition de validation prospective dédiée, devenir un composant d'un score de désindication intégré*, à articuler avec le substrat fibrotique évalué en IRM-LGE (*late gadolinium enhancement*), le risque rythmique évalué par les méthodes électrophysiologiques classiques, le risque compétitif de décès non rythmique, l'évolution temporelle du substrat, l'optimisation thérapeutique médicale, et les comorbidités. Cette intégration multifactorielle suppose une cohorte longitudinale de plusieurs centaines à plusieurs milliers de patients, un suivi pluriannuel, et une démonstration de non-infériorité clinique en intention de désindication.

Si une telle stratégie de désindication informée parvenait à valider, sur cohorte plus large, l'identification de 10 à 15 % des candidats actuels comme à risque suffisamment faible pour justifier une non-implantation, *l'ordre de grandeur du gisement adressable serait de 25 à 100 millions d'euros par an*, en plafond brut, sur le seul poste DAI primaire. Ce calcul reste une *hypothèse de programme prospectif*, non un levier quasi démontré. Il définit une cible d'investigation médico-économique, pas un acquis disponible. Mais l'ordre de grandeur justifie qu'un programme prospectif soit envisagé.

6.4 Pourquoi ce cas est instructif

Cette projection illustre que le jumeau d'organe peut être un candidat sérieux à un haut ratio coût-bénéfice attendu *sous deux conditions architecturales explicites*, pour autant que la validation prospective soit conduite avec la rigueur appropriée.

La première condition est la **forme compacte**. Un jumeau électrophysiologique destiné à la désindication doit être déployable au-delà des centres experts disposant d'un HPC dédié et d'une équipe d'ingénieurs de modélisation. Cela suppose un modèle à ordre réduit, c'est-à-dire un modèle qui préserve l'essentiel du comportement physiologique simulé tout en réduisant drastiquement le coût de calcul par rapport au solveur de référence.

Deux familles d'approches sont aujourd'hui documentées dans la littérature électrophysiologique :

- Le **modèle eikonal hybride** approxime la propagation du front d'activation cardiaque par une équation eikonal (qui calcule des temps d'arrivée plutôt que des potentiels électriques détaillés), tout en conservant une représentation explicite des hétérogénéités de substrat ; cette approximation peut faire passer un calcul de plusieurs jours-CPU à quelques minutes par patient.
- Le **surrogate différentiable** est un modèle d'apprentissage statistique entraîné à reproduire les sorties d'un solveur multi-physique de référence, dont la différentiabilité permet par ailleurs des opérations d'optimisation rapide ; il opère typiquement en temps réel sur infrastructure clinique courante.

L'une et l'autre approche reposent sur des compromis fidélité-coût qui doivent être validés cliniquement pour chaque indication.

La seconde condition est le **régime d'indication spécialisée** plutôt que péri-interventionnel pur. Le jumeau ne sert pas ici à optimiser un geste, mais à éviter qu'il ait lieu. Cette inversion de finalité change la nature du calcul économique : l'économie n'est plus marginale (procédure mieux faite), elle est radicale (procédure non faite).

Le jumeau d'organe, sous forme compacte et régime d'indication, est donc un candidat sérieux à une bonne allocation publique, sous réserve de validation prospective dédiée. Sous forme haute fidélité et régime péri-interventionnel pur, il reste un investissement en options réelles.

La taxonomie du premier article rend cette distinction explicite ; l'analyse économique la rend opérante en tant que cible d'investigation, non en tant qu'acquis disponible.

7. La logique d'allocation CAPEX

Le biais n'est pas d'abord scientifique. Il est institutionnel. Les instruments publics financent plus facilement un objet capitalistique, visible, productisable et porté par un consortium identifiable qu'une infrastructure populationnelle distribuée, organisationnelle et multi-acteurs.

L'allocation ne suit donc pas seulement la promesse clinique ; elle suit la forme administrative du projet finançable. Cette section explicite ce mécanisme.

Reste à comprendre pourquoi la concentration de l'investissement public sur le jumeau d'organe haute-fidélité a structurellement lieu, alors même que les autres familles présentent des ratios coût-bénéfice attendus supérieurs en ordre de grandeur.

La réponse n'est pas dans une intention stratégique des acteurs. Elle est dans la logique mécanique des véhicules de financement existants.

7.1 La finançabilité du jumeau d'organe

Le jumeau d'organe haute-fidélité présente un profil de coût compatible avec les architectures de financement industriel et institutionnel qui structurent l'investissement public français de l'innovation. Il s'inscrit naturellement dans le format *grand programme France 2030* : porteur industriel grand groupe identifié, plateforme HPC unifiée, alliance public-privé sur 5 ans, livrables sous forme de produits commercialisables, déploiement sur cloud souverain. Chacun de ces éléments est *finançable* dans les architectures de financement existantes, parce qu'il correspond aux véhicules conçus pour eux : appels à projets i-Démo de Bpifrance, dotations IHU, conventions Inria, contrats CIFRE.

7.2 La non-finançabilité structurelle des familles populationnelles

Le jumeau de trajectoire et le jumeau territorial présentent un profil de coût dispersé entre acteurs publics dont *aucun ne porte seul la modélisation*. La gouvernance de la donnée mobilise simultanément l'Assurance Maladie, les Agences Régionales de Santé (ARS), la médecine libérale, le secteur médico-social, les sociétés savantes et les collectivités territoriales. L'investissement structurant peine à trouver son porteur naturel : il n'est ni un dispositif médical (donc pas du domaine de la Direction Générale de la Santé en première instance), ni un produit industriel (donc pas du domaine de Bpifrance grand programme), ni une infrastructure de recherche (donc pas du domaine du Programme et Équipement Prioritaire de Recherche).

Ces familles sont *finançables* en théorie, *peu financées* en pratique, parce qu'elles tombent dans les interstices entre véhicules de financement. Le jumeau de parcours mobilise par ailleurs des acteurs (Assurance Maladie, Agence Technique de l'Information sur l'Hospitalisation, Institut National du Cancer, sociétés savantes) dont la culture est statistique-épidémiologique plutôt qu'industrielle-modélisatrice. La modélisation prospective y est lue comme outil d'évaluation rétrospective plutôt que comme infrastructure d'aide à la décision en boucle. Ce n'est pas un problème de financement, c'est un problème de cadre conceptuel : les corpus de données existent (Programme de Médicalisation des Systèmes d'Information, registres FRANCIM, base REIN, Système National des Données de Santé chaîné), mais ils ne sont pas aujourd'hui mobilisés comme jumeaux numériques au sens strict.

7.3 Une convergence non examinée

La conséquence est claire. *La concentration de l'investissement public sur le jumeau d'organe n'est pas le résultat d'un choix médico-économique délibéré qui aurait conclu à sa supériorité allocative. Elle est le résultat d'une convergence de structures de*

financement, de récits industriels et de plateformes existantes. Cette convergence n'est ni illégitime ni stratégique au sens péjoratif. Elle est simplement *non examinée*.

Une logique d'allocation peut être rationnelle pour chacun des acteurs qui la composent et collectivement sous-optimale pour le système qui en résulte. C'est précisément ce qui rend la coordination publique nécessaire. Sans coordination, l'allocation revient à empiler des décisions individuellement défendables qui produisent collectivement un biais structurel. Avec coordination, l'allocation devient un choix dont les coûts d'opportunité sont nommés et arbitrés explicitement.

À ce jour, cette coordination n'existe pas. Il n'y a pas, en 2026, de stratégie nationale française de jumeaux numériques en santé publiée et arbitrée qui distinguerait les quatre familles, comparerait leurs ratios coût-bénéfice attendus, et allouerait l'investissement public en conséquence. Il y a des programmes individuels (MEDITWIN, RHU-TALENT, ETAPES, PEPR Santé Numérique) dont chacun est défendable, et dont l'agrégation n'est pas elle-même examinée publiquement.

8. Conclusion : du coût sémantique au coût réel

Le premier article établissait que la contraction sémantique du concept de jumeau numérique au seul jumeau d'organe haute-fidélité produit une *erreur de cadrage temporel* aux conséquences structurellement allocatives.

Le présent article a montré comment ces conséquences se chiffrent en ordre de grandeur sur sources publiques.

Trois constats opératoires s'en dégagent :

1. Premièrement, faute de budget public détaillé, le coût exact de MEDITWIN ne peut pas être évalué publiquement. Le raisonnement de cette note ne repose donc pas sur un montant attribué au programme. Il repose sur une *comparaison de profils économiques entre familles* : coût capitalistique élevé et bénéfice différé pour le jumeau d'organe haute-fidélité ; coût unitaire de modélisation plus faible et impact populationnel potentiel plus immédiat pour les jumeaux de trajectoire et de parcours, sous condition d'intégration organisationnelle. La validation clinique en outcomes durs des premiers est en cours d'amorçage internationale (TWIN-VT NEJM 2026) ; les résultats français issus de MEDITWIN et des programmes RHU adossés ne sont pas attendus avant 2027-2028. La question doctrinale n'est pas dans ce périmètre. Elle est dans le **périmètre absent**.
2. Deuxièmement, plusieurs familles de jumeaux numériques opèrent sur des gisements adressables dont l'ordre de grandeur, en *plafond brut*, atteint plusieurs centaines de millions d'euros par an sur les seuls exemples examinés ici : 150 à 225 millions d'euros annuels en plafond brut adressable sur le poste hospitalier aigu IC pour une réduction de 10-15 % des hospitalisations, 25 à 100 millions d'euros annuels en plafond brut adressable sur le poste DAI primaire sous hypothèse de programme prospectif validé. Ces montants ne sont pas des économies acquises. Ils définissent la cible adressable, dont la conversion en économie nette dépend de facteurs organisationnels, tarifaires et opérationnels énumérés en §5.2. Mais ils établissent l'ordre de grandeur du gisement, qui justifie qu'un arbitrage public explicite soit conduit.
3. Troisièmement, l'absence d'arbitrage public explicite entre familles ne signifie pas qu'aucun arbitrage n'a lieu. Cela signifie que l'arbitrage est délégué aux véhicules de financement existants, qui privilégient mécaniquement le jumeau d'organe haute-fidélité parce qu'il s'aligne sur leurs architectures. *L'argument de cette note ne démontre pas une mauvaise allocation ; il démontre l'absence du cadre public permettant de savoir si l'allocation actuelle est bonne.*

Cette note ne plaide pas contre le jumeau d'organe haute-fidélité. Elle plaide pour que la stratégie nationale en santé numérique nomme explicitement les quatre familles, leurs régimes de validation, leurs ratios coût-bénéfice attendus, et leurs coûts d'opportunité réciproques.

Cette explicitation est techniquement faisable : elle suppose un exercice de cartographie médico-économique comparatif que la Haute Autorité de Santé, l'Assurance Maladie, l'Inserm ou France 2030 lui-même pourraient piloter.

Une stratégie nationale de santé numérique a besoin de plusieurs paradigmes pour être efficace. Une stratégie qui en finance préférentiellement un seul peut le faire pour de

bonnes raisons industrielles. Mais elle doit alors nommer ce qu'elle ne finance pas, et accepter le coût d'opportunité associé.

Ne pas nommer ce coût, c'est compter à moitié. Compter à moitié, c'est arbitrer sans le savoir. Arbitrer sans le savoir, c'est financer un objectif en croyant en financer un autre.

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.

Chrispin, J., Prakosa, A., Kholmovski, E., Kolandaivelu, A., Barcelon, A., Aronis, K. N., Berger, R. D., Calkins, H., & Trayanova, N. (2026). Digital Twin-Guided Ablation for Ventricular Tachycardia. *New England Journal of Medicine*, 394(13), 1345–1347. doi: 10.1056/NEJMc2517822. NCT03536052.

Cnam (2023). *Cartographie des dépenses de santé 2019*. Caisse Nationale de l'Assurance Maladie, rapport annuel.

FDA (2024). *Marketing Submission Recommendations for a Predetermined Change Control Plan for Artificial Intelligence-Enabled Device Software Functions*. U.S. Food and Drug Administration, Final Guidance, December 2024.

HAS (2022). *Réévaluation des défibrillateurs cardiaques automatiques implantables avec sonde(s) endocavitaire(s)*. Haute Autorité de Santé, rapport d'évaluation, septembre 2022.

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*.

Pavon, A. G., et al. (2021). A Vital Signs Telemonitoring Programme Improves the Dynamic Prediction of Readmission Risk in Patients with Heart Failure. *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 2021, 1968–1972.

Santé Publique France (2025). *Épidémiologie de l'insuffisance cardiaque en France*. Bulletin Épidémiologique Hebdomadaire, numéro hors-série.

Voir également dans ce corpus

Vetillard, J. (2026). *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*. Twingital Institute.

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.

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