

Votre cœur a désormais un clone numérique

Modélisation cardiaque multi-physique, équations différentielles et simulation patient-spécifique

Pinel Baudelaire T. DAHOUI

Data Scientist & IA | Ingénieur en Travaux Statistiques
tpineldahoui@gmail.com | github.com/Baudelaire12

17 Mars 2026

Série LinkedIn STEM au Quotidien — Jour 13/40

Plan de la présentation

- 1 Mise en contexte
- 2 Concepts clés
- 3 Développement mathématique
- 4 Cas pratique
- 5 Conclusion
- 6 Références

Le jumeau numérique en médecine : définition et enjeux

Définition

Un **jumeau numérique** (digital twin) est un modèle computationnel d'un système physique, alimenté en temps réel par des données capteurs, capable de simuler le comportement du système réel, d'anticiper ses défaillances et de tester des interventions virtuellement avant de les appliquer au patient.

- Les maladies cardiovasculaires causent **17,9 millions de décès/an** dans le monde — 32% de toute la mortalité mondiale (OMS, 2021).
- Le **Living Heart Project** (Dassault Systèmes, 2014) a produit le premier modèle cardiaque validé par la FDA pour tester des dispositifs médicaux

Question centrale

Quelles équations mathématiques permettent de simuler chaque battement cardiaque d'un patient spécifique — et comment les données médicales alimentent-elles ce jumeau en temps réel ?

Architecture multi-physique du jumeau numérique cardiaque

Le cœur modélisé comme système multi-physique couplé :

Physique	Modèle mathématique	Données d'entrée
Électrophysiologie	Hodgkin-Huxley, Aliev-Panfilov	ECG 12 dérivations
Mécanique myocardique	Holzapfel-Ogden (tissu fibreux)	IRM de déformation
Hémodynamique	Navier-Stokes, modèle Windkessel	Echo-Doppler, cathéter
Couplage fluide-structure	IFS (Interaction Fluide-Structure)	IRM 4D-flow
Métabolisme	Modèles énergie ATP/ADP	Biomarqueurs sanguins

Pipeline de construction du jumeau patient-spécifique

IRM cardiaque → **Segmentation 3D** (U-Net) → **Maillage éléments finis** → **Calibration des paramètres** (assimilation de données) → **Simulation** → **Validation ECG/Echo**

Équation du potentiel de membrane (Hodgkin & Huxley, 1952) :

$$C_m \frac{dV}{dt} = - \sum_k I_k(V, t) + I_{\text{ext}}$$

avec les courants ioniques :

$$I_{\text{Na}} = g_{\text{Na}} m^3 h (V - E_{\text{Na}}), \quad I_{\text{K}} = g_{\text{K}} n^4 (V - E_{\text{K}}), \quad I_{\text{L}} = g_{\text{L}} (V - E_{\text{L}})$$

et les variables de portes m, h, n suivant des EDO du type :

$$\frac{dx}{dt} = \alpha_x(V)(1 - x) - \beta_x(V)x, \quad x \in \{m, h, n\}$$

Propagation de l'influx — Équation monodomaine :

$$\nabla \cdot (\boldsymbol{\Sigma}_i \nabla V) = C_m \frac{\partial V}{\partial t} + I_{\text{ion}}(V, \mathbf{w}) - I_{\text{ext}}$$

$\boldsymbol{\Sigma}_i$ = tenseur de conductivité anisotrope (fibres myocardiques), $\mathbf{w}$ = variables de porte.

Loi de comportement du myocarde — Modèle de Holzapfel-Ogden (2009) :

$$\psi = \frac{a}{2b} \exp[b(I_1 - 3)] + \sum_{i=f,s} \frac{a_i}{2b_i} \left\{ \exp[b_i(I_{4i} - 1)^2] - 1 \right\}$$

(I_1 = premier invariant de Cauchy-Green, I_{4f} , I_{4s} = élongations selon fibres et feuilletts)

Modèle Windkessel à 3 éléments — Hémodynamique systémique :

$$Q_{\text{aorte}}(t) = C \frac{dP_{\text{art}}}{dt} + \frac{P_{\text{art}} - P_{\text{vein}}}{R_p}$$

Assimilation de données — Filtre de Kalman d'ensemble (EnKF) :

$$\mathbf{x}^a = \mathbf{x}^f + \mathbf{K}(\mathbf{y} - \mathbf{H}\mathbf{x}^f), \quad \mathbf{K} = \mathbf{P}^f \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{P}^f \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1}$$

Permet de recalibrer les paramètres du modèle sur les données cliniques réelles du patient.

Cas pratique : simulation thérapeutique pré-opératoire

Thérapie de resynchronisation cardiaque (TRC)

La TRC consiste à implanter un pacemaker bi-ventriculaire pour resynchroniser les contractions des ventricules gauche et droit dans l'insuffisance cardiaque. Mais **30%** des patients ne répondent pas à cette thérapie. Le jumeau numérique permet de simuler la réponse avant l'implantation.

Résultats (Serresant et al., Nature Reviews Cardiology, 2021) :

Critère	Méthode clinique seule	+ Jumeau numérique
Prédiction de réponse TRC	70% précision	84% précision
Optimisation positionnement	Empirique	Simulation 3D guidée
Réduction non-répondeurs	—	-35%

Perspective béninoise : Construire un jumeau cardiaque nécessite une IRM — rare au Bénin. Cependant, des modèles simplifiés basés sur **Echo-Doppler** (disponible au CNHU-HKM) peuvent servir d'entrée pour des jumeaux de complexité intermédiaire, utiles pour le suivi de l'insuffisance cardiaque.

Synthèse

Le jumeau numérique du cœur fusionne électrophysiologie, mécanique des solides, mécanique des fluides et assimilation de données pour créer un modèle personnalisé capable de simuler chaque battement cardiaque. Il ouvre la voie à une médecine d'essai virtuel : tester avant d'agir.

Perspectives africaines :

- Jumeaux cardiaques simplifiés basés sur Echo-Doppler pour les hôpitaux africains (CNHU, Fann, CHU Yalgado)
- Simulation du risque de fibrillation auriculaire dans les populations hypertendues africaines
- Formation des cardiologues africains à l'utilisation clinique des outils de simulation (logiciels OpenCMISS, FEniCS)

« Tester sur un modèle avant d'opérer un patient : c'est la promesse du jumeau numérique médical. »

— Adapté de Maxime Sermesant, Inria Sophia Antipolis, 2021

Références bibliographiques

-  Hodgkin, A. L., & Huxley, A. F. (1952). A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve. *Journal of Physiology*, 117(4), 500–544.
-  Holzapfel, G. A., & Ogden, R. W. (2009). Constitutive modelling of passive myocardium. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 367, 3445–3475.
-  Sermesant, M., et al. (2021). Applications of artificial intelligence in cardiovascular imaging. *Nature Reviews Cardiology*, 18, 600–609.
-  Chabiniok, R., et al. (2016). Multiphysics and multiscale modelling, data–model fusion and integration of organ physiology in the clinic. *Interface Focus*, 6(2), 20150083.
-  Evensen, G. (1994). Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics. *Journal of Geophysical Research*, 99(C5), 10143–10162.
-  World Health Organization. (2021). *Cardiovascular diseases (CVDs) — Fact Sheet*. WHO.

Merci pour votre attention

Pinel Baudelaire T. DAHOUI

Data Scientist & IA | Ingénieur en Travaux Statistiques

`tpineldahoui@gmail.com | github.com/Baudelaire12`

LinkedIn : @Pinel Baudelaire DAHOUI

Série STEM au Quotidien — 40 jours