

PROJET DE DOCTORAT 2026–2029

Programme doctoral IUIS – Institut Universitaire d’Ingénierie en Santé

Modèles de fondation multimodaux pour l’ECG : intelligence artificielle interprétable pour la stratification du risque arythmique et la sécurité médicamenteuse

Contrat : Doctorat financé (36 mois)

École Doctorale : EDITE – Informatique, Télécommunications et Électronique (ED 130)

Unité d’accueil : UMMISCO (UMI 209 IRD–Sorbonne Université) – Faculté des Sciences et Ingénierie

Partenaire hospitalo-universitaire : Hôpital Pitié-Salpêtrière – AP-HP – Faculté de Santé

Encadrement :

- Dr Edi Prifti (HDR, IRD–UMMISCO, Sorbonne Université) – *Encadrant scientifique (IA, deep learning)*
- Pr Joe-Elie Salem (PU-PH, Sorbonne Université, Cardiologie & Pharmacologie clinique, Pitié-Salpêtrière, AP-HP) – *Encadrant clinicien*

Projets structurants : ELDORA – DeepECG4U

Début prévisionnel : Automne 2026

1. Positionnement stratégique et structuration institutionnelle

Ce projet doctoral s’inscrit au cœur des priorités stratégiques de Sorbonne Université en santé numérique, intelligence artificielle responsable et recherche translationnelle. **Il répond pleinement aux critères du programme doctoral de l’IUIS, en associant un binôme scientifique/clinicien** entre la Faculté des Sciences et Ingénierie (modélisation, deep learning, science des systèmes complexes – UMMISCO) et la Faculté de Santé (cardiologie, électrophysiologie, pharmacologie clinique – CIC-1901 Pitié-Salpêtrière, AP-HP). Le projet contribue à positionner Sorbonne Université comme acteur majeur du développement de modèles de fondation appliqués aux signaux physiologiques cliniques massifs, dans une perspective de souveraineté scientifique et technologique en IA biomédicale.

2. Contexte scientifique et problématique

L’électrocardiogramme (ECG) constitue un outil diagnostique universel et un biomarqueur dynamique du risque arythmique, particulièrement critique dans l’insuffisance cardiaque, les troubles du rythme complexes, les syndromes du QT long, la cardiotoxicité médicamenteuse et la polymédication. Malgré l’abondance des données ECG collectées en routine hospitalière, leur exploitation par l’IA reste largement limitée à des modèles supervisés spécifiques à une tâche donnée, ne permettant ni une généralisation robuste inter-cohortes, ni une compréhension mécanistique approfondie [1,2].

Les modèles de fondation (FM) offrent un changement de paradigme : apprentissage auto-supervisé à grande échelle, construction de représentations latentes universelles, transférabilité entre tâches et environnements cliniques. Plusieurs FM pour l’ECG ont récemment émergé (ECG-FM [3], ECGFounder [4], CREMA [5]), mais leur adaptation aux signaux physiologiques multimodaux — intégrant signal brut (1D), rapports textuels, représentations visuelles (PDF), données cliniques et médicamenteuses — demeure un défi scientifique majeur, tant sur le plan algorithmique qu’interprétatif.

3. Hypothèse scientifique et originalité

L’hypothèse centrale est que l’apprentissage multimodal auto-supervisé à grande échelle permet de construire un espace latent ECG structuré reflétant des propriétés électrophysiologiques et pharmacologiques fondamentales, au-delà des annotations diagnostiques superficielles. L’originalité du projet repose sur : (i) la transposition des architectures multimodales de type fondation aux signaux physiologiques massifs ; (ii) l’alignement explicite signal–texte–image–clinique ; (iii) l’intégration des données médicamenteuses dans l’espace latent ; (iv) une approche systématique d’interprétabilité géométrique et clinique. Cette stratégie dépasse les modèles supervisés classiques en visant la construction d’un socle représentationnel universel pour l’ECG.

4. Objectifs scientifiques

Obj. 1 : Développer des architectures multimodales de type fondation intégrant signaux ECG multileads, texte clinique et représentations visuelles. **Obj. 2 :** Étudier la géométrie de l’espace latent et identifier les dimensions associées aux sous-types arythmiques, aux paramètres QT/QTc et aux profils pharmacologiques. **Obj. 3 :** Évaluer la robustesse inter-cohortes, la transférabilité et la valeur prédictive des représentations apprises.

5. Programme de travail

Axe 1 – Apprentissage auto-supervisé multimodal. Développement d’architectures basées sur transformers multimodaux et apprentissage contrastif. Pré-entraînement sur bases ECG massives multi-centriques (~20M d’ECGs, projet ELDORA). Étude des mécanismes d’alignement inter-domaines. **Axe 2 – Analyse des représentations et interprétabilité.** Exploration

géométrique (PCA, UMAP, analyses topologiques). Identification de sous-espaces associés à des phénotypes cliniques et pharmacologiques. Développement d'approches d'explicabilité locales et globales adaptées aux architectures multimodales.

Axe 3 – Validation clinique et robustesse. Évaluation sur tâches de classification et de prédiction du risque arythmique. Analyses statistiques conjointes (modèles mixtes, calibration, concordance). Validation inter-cohortes et étude de généralisation.

6. Complémentarité du co-encadrement et faisabilité

Les encadrants disposent d'une collaboration scientifique établie à l'interface de l'intelligence artificielle, de la cardiologie et de la pharmacologie clinique, matérialisée par plusieurs publications conjointes de haut niveau : un article fondateur dans *European Heart Journal* [1] démontrant l'apport du deep learning pour la prédiction du risque de torsades de pointes et le diagnostic du syndrome du QT long, ainsi que des travaux récents sur la reconstruction de signaux ECG (ECGrecover [6]) et la digitalisation automatisée d'ECG papier (ECGtizer [7]). Cette complémentarité assure l'innovation méthodologique en IA (UMMISCO), l'expertise clinique en électrophysiologie et l'expertise en sécurité médicamenteuse et QT. Elle garantit la faisabilité scientifique et la pertinence translationnelle du projet.

En outre, les encadrants, dans le cadre du projet ELDORA, ont construit une des plus grandes bases internationales avec environ 20 millions d'ECGs et des annotations cliniques, qui servira de socle à ce projet doctoral. Le/la doctorant-e bénéficiera d'un accès à ces bases ECG massives multi-centriques, d'infrastructures HPC (GPU A100/H100), d'un environnement hospitalo-universitaire intégré. Une ouverture internationale sera encouragée via collaborations et mobilité.

7. Éthique, IA responsable et formation doctorale

Le projet respectera strictement les cadres réglementaires applicables aux données de santé (RGPD, gouvernance hospitalière). Une attention particulière sera portée à l'explicabilité des modèles, à la robustesse inter-population, à la réduction des biais, à la reproductibilité scientifique. Le/la doctorant-e suivra les formations du Collège Doctoral de Sorbonne Université (éthique, open science, communication scientifique, valorisation) et développera un profil à forte employabilité académique et industrielle (IA clinique, MedTech, dispositifs médicaux).

Références

- [1] Prifti E, Fall A, Davogustto G, *et al.* Deep learning analysis of electrocardiogram for risk prediction of drug-induced arrhythmias and diagnosis of long QT syndrome. *European Heart Journal*, 42(38):3948–3961, 2021. *
- [2] Attia ZI, Noseworthy PA, Lopez-Jimenez F, *et al.* An artificial intelligence-enabled ECG algorithm for the identification of patients with atrial fibrillation during sinus rhythm. *Lancet*, 394(10201):861–867, 2019.
- [3] McKeen K, Masood S, Toma A, Rubin B, Wang B. ECG-FM: an open electrocardiogram foundation model. *JAMIA Open*, 8(5):ooaf122, 2025.
- [4] Li J, Aguirre AD, Moura V, *et al.* An electrocardiogram foundation model built on over 10 million recordings. *NEJM AI*, 2(7), 2025.
- [5] Song J, Jang JH, Hong D, Kwon JM, Jo YY. CREMA: a contrastive regularized masked autoencoder for robust ECG diagnostics across clinical domains. *arXiv:2407.07110*, 2024.
- [6] Lence A, Granese F, Fall A, Hanczar B, Salem JE, Zucker JD, Prifti E. ECGrecover: a deep learning approach for electrocardiogram signal completion. *arXiv:2406.16901*, 2024. *
- [7] Lence A, Fall A, Cohen SD, Granese F, Zucker JD, Salem JE, Prifti E. ECGtizer: an open-source, fully automated pipeline for digitization and signal recovery from paper electrocardiograms. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2025. *
- [8] Lee N *et al.* A comprehensive review of biosignal foundation models. *TechRxiv*, 2025.

* Publications conjointes des encadrants