

**École Nationale Supérieure d'Informatique et d'Analyse des Systèmes
Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers de Rabat**

Centre d'Études Doctorales en Sciences des Technologies de l'Information et de l'Ingénieur

AVIS DE SOUTENANCE DE THÈSE DE DOCTORAT

Abdelmalek MAKHIR

Soutiendra publiquement sa thèse de Doctorat en Science de l'ingénieur

Spécialité : Génie électrique – Biomédical.

Le Jeudi 08 janvier 2026 à 10h00 au Grand Amphi à l'ENSAM de Rabat

Intitulé de la thèse

Intelligence artificielle explicable pour l'analyse électrocardiographique :

**Système hybride CNN-BiLSTM pour le diagnostic multi-pathologique et l'aide à la
décision clinique.**

Président :

Pr. Benayad NSIRI, PES, ENSAM, Université Mohammed V de Rabat

Directeur de thèse :

Pr. My Hachem EL YOUSFI ALAOUI, MCH, ENSAM, Université Mohammed V de Rabat

Rapporteurs :

Pr. Nabila RABBAH, PES, ENSAM, Université Hassan II, Casablanca

Pr. Taoufiq BELHOUSSEINE DRISSI, PES, FSAC, Université Hassan II, Casablanca

Pr. Ouadoudi ZYTOUNE, PES, ENSA, Université Ibn Tofail, Kénitra

Examineurs :

Atman JBARI, PES, à l'ENSAM, Université Mohammed V de Rabat

Achraf BENBA, MCH, à l'ENSAM, Université Mohammed V de Rabat

Invité :

Pr. Larbi BELARBI (Expert, Ex-professeur à l'ENSAM – UM5 Rabat).

Résumé :

Les maladies cardiovasculaires constituent la principale cause de mortalité dans le monde, avec près de 20 millions de décès en 2022. L'électrocardiogramme (ECG) reste l'outil de référence pour le diagnostic, mais son interprétation manuelle demeure complexe et sujette à des variations entre observateurs. Cette thèse propose un cadre méthodologique basé sur l'intelligence artificielle pour l'analyse automatisée des signaux ECG à 12 dérivations. L'approche couvre la classification multi-pathologique, la prédiction des complications et l'intégration dans un système d'aide à la décision clinique.

Nous avons développé des architectures hybrides CNN-BiLSTM combinant l'extraction spatiale des caractéristiques par réseaux convolutifs et la modélisation temporelle par LSTM bidirectionnels. Le prétraitement est assuré par une transformée en ondelettes discrète (Daubechies D6), permettant de conserver la bande diagnostique 0,5–45 Hz tout en réduisant les artefacts. Six bases de données internationales (INCART, CSNDB, PTB-XL, PTBDB, CPSC2018, G12EC) ont été utilisées pour garantir la robustesse et la généralisation inter-populations.

Les résultats montrent des performances élevées : 99,23% d'exactitude (sensibilité 98,53%) pour l'ischémie cardiaque, 99,84% pour les arythmies complexes et 99,73% pour l'infarctus du myocarde. L'analyse des changements ST–T atteint 100% pour les ondes T (SVM) et 99,81% pour les segments ST (XGBoost). Le système de prédiction des complications post-infarctus atteint un AUC supérieur à 0,94 pour la mortalité, à travers quatre phases temporelles (admission, 12h, 24h, 72h).

L'explicabilité est assurée par Integrated Gradients pour l'analyse ECG et SHAP pour les prédictions de complications, permettant d'identifier les facteurs les plus contributifs. Un système de quantification automatisée a traité 1,9 million de battements de la base ST–T européenne, détectant plus de 360 000 cas critiques. Enfin, un système intégré d'aide à la décision réunit huit modèles spécialisés au sein d'une interface ergonomique, réduisant le temps d'analyse ECG de plusieurs minutes à moins de cinq secondes.

Un système d'aide à la décision clinique intégré unifie huit modèles d'IA spécialisés dans une interface ergonomique respectant les principes de conception centrée utilisateur médical. L'interface implémente un codage couleur universel (vert/jaune/orange/rouge) et une navigation hiérarchique du général vers le spécifique, réduisant le temps d'analyse ECG de plusieurs minutes à moins de 5 secondes.

Ces travaux établissent de nouvelles références en analyse ECG automatisée et démontrent la possibilité d'allier performance algorithmique et utilisabilité clinique. Ils ouvrent la voie à une cardiologie augmentée, où l'intelligence artificielle soutient l'expertise médicale pour améliorer la qualité et la sécurité des soins.

Mots-clés : Intelligence artificielle ; Électrocardiographie ; CNN-BiLSTM ; Classification des pathologies cardiaques ; Prédiction post-infarctus ; Explicabilité.

Abstract:

Cardiovascular diseases are the leading cause of death worldwide, with nearly 20 million deaths in 2022. The electrocardiogram (ECG) remains the reference tool for diagnosis, but its manual interpretation is complex and subject to inter-observer variability. This thesis proposes a methodological framework based on artificial intelligence for the automated analysis of 12-lead ECG signals. The approach covers multi-pathological classification, complication prediction, and integration into a clinical decision support system.

We developed hybrid CNN-BiLSTM architectures combining spatial feature extraction through convolutional networks and temporal modeling through bidirectional LSTMs. Preprocessing is performed with a discrete wavelet transform (Daubechies D6), preserving the diagnostic band of 0.5–45 Hz while reducing artifacts. Six international databases (INCART, CSNDB, PTB-XL, PTBDB, CPSC2018, G12EC) were used to ensure robustness and inter-population generalization.

The results show high performance: 99.23% accuracy (98.53% sensitivity) for cardiac ischemia, 99.84% for complex arrhythmias, and 99.73% for myocardial infarction. The analysis of ST–T changes achieved 100% for T-waves (SVM) and 99.81% for ST segments (XGBoost). The post-infarction complication prediction system reached an AUC above 0.94 for mortality across four-time phases (admission, 12h, 24h, 72h).

Explainability is ensured by Integrated Gradients for ECG analysis and SHAP for complication predictions, enabling the identification of the most contributive factors. An automated quantification system processed 1.9 million beats from the European ST–T database, detecting over 360,000 critical cases. Finally, an integrated decision support system brings together eight specialized models within an ergonomic interface, reducing ECG analysis time from several minutes to less than five seconds.

An integrated clinical decision support system unifies eight specialized AI models in an ergonomic interface designed according to medical user-centered principles. The interface implements universal color coding (green/yellow/orange/red) and hierarchical navigation from general to specific, reducing ECG analysis time from several minutes to less than 5 seconds.

These works establish new benchmarks in automated ECG analysis and demonstrate the possibility of combining algorithmic performance with clinical usability. They pave the way for augmented cardiology, where artificial intelligence supports medical expertise to improve the quality and safety of care.

Keywords: Artificial intelligence ; Electrocardiography ; CNN-BiLSTM ; Cardiac pathology classification ; Post-infarction prediction ; Explainability.