

Détection d'arythmies par transformée en ondelettes et diagnostic automatisé

Ayant personnellement eu des proches affectés par des troubles cardiaques, l'idée m'est naturellement arrivée de vouloir comprendre comment l'ingénieur peut fiabiliser la détection de telles anomalies. Cette motivation m'a conduit à étudier le traitement du signal ECG pour caractériser mathématiquement la stabilité de ce cycle biologique vital.

Le rythme cardiaque est un cycle quasi-périodique. L'étude porte sur la caractérisation de la stabilité de ce cycle : détection des ruptures de périodicité (arythmies) par méthodes temps-fréquence et analyse de la boucle d'hystérésis d'effort, dépassant l'analyse spectrale classique.

Le candidat atteste avoir travaillé en monôme.

Positionnement thématique (ÉTAPE 1) :

- *MATHEMATIQUES (Analyse)*
- *INFORMATIQUE (Informatique pratique)*
- *PHYSIQUE (Physique Interdisciplinaire)*

Mots-clés (ÉTAPE 1) :

Mots-clés (en français) Mots-clés (en anglais)

<i>Transformée en ondelettes</i>	<i>Wavelet transform</i>
<i>Cycle cardiaque</i>	<i>Cardiac cycle</i>
<i>Électrocardiogramme</i>	<i>Electrocardiogram</i>
<i>Hystérésis</i>	<i>Hysteresis</i>
<i>Apprentissage automatique</i>	<i>Machine Learning</i>

Bibliographie commentée

L'analyse de la dynamique cardiaque repose sur le signal électrique de la dépolarisation myocardique. Sur un ECG standard, l'activité se traduit par des motifs élémentaires, dont le complexe QRS (contraction ventriculaire) concentre son énergie entre 10 et 40 Hz. L'algorithme historique de Pan et Tompkins (1985) utilise des filtres et dérivations pour isoler ce pic R [1]. Si cette méthode évalue bien la fréquence moyenne, elle reste aveugle à la morphologie fine et suppose une quasi-stationnarité du rythme.

Or, les pathologies cardiaques critiques, telles que les extrasystoles ventriculaires ou la fibrillation atriale, se caractérisent par des ruptures brutales de cette stationnarité et l'apparition de singularités transitoires. L'analyse spectrale classique par Transformée de Fourier, définie par , montre ici ses limites théoriques. En projetant le signal sur une base de sinusoides à support temporel infini, elle perd l'information locale des singularités sur l'ensemble du spectre. Cette limitation est la conséquence directe du principe d'incertitude d'Heisenberg-Gabor (1946), qui impose une limite inférieure au produit des résolutions temporelle et fréquentielle : . Il est donc physiquement impossible, avec Fourier, de localiser précisément un événement pathologique bref dans le flux temporel [3].

Pour résoudre ce dilemme, la recherche en traitement du signal s'est orientée vers l'analyse multi-résolution. Stéphane Mallat a formalisé l'usage de la Transformée en Ondelettes Continue (CWT), qui projette le signal sur une famille de fonctions générées par dilatations (facteur d'échelle a) et translations (facteur b) d'une unique ondelette mère de moyenne nulle [3]. Le choix d'une ondelette mère morphologiquement corrélée au complexe QRS, telle que l'ondelette *Symlet 4* ou *Daubechies*, permet de maximiser la détection des singularités [2]. Le résultat est un scalogramme, une densité d'énergie temps-échelle permettant de visualiser simultanément les basses fréquences (ondes T et P) et les hautes fréquences (complexes QRS) avec une résolution adaptative.

Cependant, la détection statique ne suffit pas à caractériser la stabilité du système. L'étude intègre donc une approche dynamique en analysant la réponse cardiaque à l'effort. En modélisant le cœur comme un système asservi, on observe lors de la récupération un phénomène d'hystérésis entre la fréquence cardiaque et l'intensité de l'effort. L'aire de cette boucle et la constante de temps de décroissance constituent des marqueurs quantitatifs de la réactivité du tonus vagal, comme établi par Cole et al. [4].

Enfin, l'objectif est l'automatisation du diagnostic. Nous implémenterons un algorithme d'apprentissage supervisé pour classifier les cycles. En combinant les coefficients d'ondelettes et les descripteurs d'hystérésis, ce classifieur, entraîné via la base de référence MIT-BIH [5] ainsi que nos acquisitions, permettra de discriminer objectivement les profils sains des pathologiques.

Problématique retenue

Il s'agit d'étudier la pertinence de l'analyse par ondelettes pour caractériser la non-stationnarité du signal ECG et sa stabilité par hystérésis. On mettra en évidence la supériorité de cette approche sur l'analyse spectrale pour localiser les arythmies, et on proposera une chaîne de diagnostic automatisé par méthodes de classification algorithmique.

Objectifs du TIPE du candidat

- Mettre en œuvre un capteur ECG et prétraiter le signal pour constituer une base de données expérimentale.
- Implémenter la Transformée en Ondelettes (CWT) pour générer des scalogrammes, en mettant en évidence l'apport de la résolution temps-fréquence face aux limites de l'analyse spectrale classique.
- Concevoir et implémenter un algorithme de classification capable de diagnostiquer les arythmies à partir de ces représentations et de l'hystérésis, avec une validation croisée sur la base MIT-BIH.

Références bibliographiques (ÉTAPE 1)

- [1] J. PAN AND W. J. TOMPKINS : IEEE Transactions on Biomedical Engineering, "A Real-Time QRS Detection Algorithm" : *Vol. 32, no. 3 (1985), pp. 230–236*
- [2] A. CABASSON : Analyse du rythme cardiaque et détection d'arythmies par méthodes temps-fréquence : *Thèse de doctorat, Université de Rennes 1, France, 2008*
- [3] S. MALLAT : A Wavelet Tour of Signal Processing: The Sparse Way : *3rd edition, Academic Press, 2008*
- [4] C. R. COLE ET AL. : The New England Journal of Medicine, "Heart-rate recovery immediately after exercise as a predictor of mortality" : *Vol. 341, no. 18 (1999), pp. 1351–1357*
- [5] A. L. GOLDBERGER ET AL. : Circulation, "PhysioBank, PhysioToolkit, and PhysioNet: Components of a new research resource..." : *Vol. 101, no. 23 (2000), pp. e215–e220*

Références bibliographiques (ÉTAPE 2)

- [1] MARGARIA, R., CERRETELLI, P., AGHEMO, P., & SASSI, G. : Energy cost of running : *Journal of Applied Physiology, 1963*
- [2] LIGUORI, G., FEITO, Y., FOUNTAINE, C., & ROY, B. A. : ACSM's Guidelines for Exercise Testing and Prescription : *Lippincott Williams & Wilkins, 2021*
- [3] UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE COMPIÈGNE : Théorème d'incertitude (Heisenberg - Gabor) : https://moodle.utc.fr/file.php/332/ChapIV_TF/MT12_ChapIV5.pdf

[4] MONGIN, D., ET AL. : Treadmill Maximal Exercise Tests (University of Malaga) : <https://doi.org/10.13026/7ezk-j442>

DOT

- [1] : [Juin - Septembre 2025] Recherche documentaire sur les signaux physiologiques non-stationnaires. Choix de l'ECG comme support d'étude. Entretien avec ma professeure de SVT de lycée pour consolider mes connaissances sur l'électrophysiologie du cœur.
- [2] : [Octobre - Décembre 2025] Prise en main des bases de données cliniques. Étude théorique et mise en évidence sous Python des limites de l'approche classique (STFT) face aux discontinuités du signal.
- [3] : [Janvier - Février 2026] Basculement vers l'analyse temps-échelle. Implémentation sous Python de la Transformée en Ondelettes Continue (CWT). Génération des scalogrammes et optimisation de la localisation temporelle des complexes QRS.
- [4] : [Mars - Avril 2026] Extension de l'étude à la dynamique d'effort. Modélisation du retard d'adaptation cardiaque via le tracé de boucles d'hystérésis.
- [5] : [Mai 2026] Développement du module de diagnostic automatisé. Entraînement et comparaison d'algorithmes de classification et de régression sur les données standardisées (AAMI) pour détecter les arythmies et estimer la capacité aérobie.
- [6] : [Mai et juin 2026] Conception du dispositif d'acquisition et enregistrement de signaux réels. Prétraitement par AMR pour débruitage et validation sur le modèle de Machine Learning. Finalisation de la présentation et du DOT.