

Analyse de la texture d'images médicales à partir de la décomposition modale empirique bidimensionnelle basée sur des motifs ordinaux et par mesures d'entropie associées à l'intelligence artificielle

1. Description du sujet de thèse

Les mesures, basées sur l'entropie, développées dans les années 1990 pour quantifier l'irrégularité des séries temporelles ont évolué pour devenir un outil puissant d'analyse des données médicales. Parmi les avancées notables de cette recherche, on peut citer le développement de la *sample entropy* (Richman et Moorman, 2000), de l'entropie de permutation (Bandt et Pompe, 2002), de l'entropie floue (Chen et al., 2007), de l'entropie de distribution (Li et al., 2015) et de l'entropie de dispersion (Rostaghi et al., 2016). Certaines de ces mesures ont également été étendues au cas bidimensionnel ou même tridimensionnel pour analyser la texture d'images ou de volumes (Humeau-Heurtier, 2019, 2022). Toutes ces mesures ont leurs avantages (par exemple, faible temps de calcul) et leurs inconvénients (par exemple, elles conduisent à des valeurs indéfinies pour des données courtes). Parmi les mesures d'entropie existantes, l'entropie de permutation présente l'avantage d'être simple et rapide à calculer. Elle est basée sur des motifs ordinaux (Amigo et al., 2023) : chaque séquence de n valeurs successives d'une donnée est mise en correspondance avec un motif de permutation qui représente l'ordre de classement des échantillons au sein de la séquence. Ensuite, l'entropie de Shannon est estimée en utilisant la fréquence relative (probabilité d'occurrence) de chaque modèle de permutation (Bandt et Pompe, 2002). Les motifs ordinaux ont un lien implicite avec de nombreuses méthodes de traitement du signal telles que la décomposition modale empirique (EMD) (Huang et al., 1998).

L'EMD - un algorithme itératif basé sur les données, largement reconnu - a été conçue pour la décomposition récursive d'une série temporelle en fonctions modales intrinsèques (IMF). Les IMF sont des formes d'ondes oscillatoires à moyenne nulle contenues dans les données qui peuvent être modulées à la fois en amplitude et en fréquence. Cependant, comme l'EMD n'a pas de fondements théoriques réels, la question de savoir comment la méthode parvient à séparer les bandes spectrales fait encore l'objet d'études. Une étude récente a revisité l'EMD du point de vue des motifs ordinaux (Jabloun, 2022) : l'EMD pour les séries temporelles a été reformulée en utilisant le concept de motifs ordinaux. En outre, l'intégration de la distribution de probabilité des motifs ordinaux dans l'algorithme EMD a été proposée pour améliorer sa robustesse. Néanmoins, à notre connaissance, l'extension, aux données multidimensionnelles, de l'EMD basée sur les motifs ordinaux n'a pas encore été réalisée. Pourtant, l'EMD bidimensionnelle (BEMD) est aujourd'hui couramment utilisée et a montré des résultats intéressants dans de nombreux domaines : économie et finance, géophysique, sciences de l'information, détection de cibles, applications biomédicales... (Chen et al., 2013 ; Qin et al., 2018 ; Xudong et al., 2020 ; Zhu et al., 2020 ; Riahi et al., 2022) pour n'en citer que quelques-uns. **La première étape du travail de recherche** consistera donc à étendre cette EMD unidimensionnelle basée sur des motifs ordinaux au cas bidimensionnel.

La deuxième étape de la thèse sera basée sur l'analyse de la texture des images. En effet, les méthodes d'entropie peuvent être considérées comme des techniques d'extraction de caractéristiques significatives, basées sur la répétabilité des échantillons (pour les séries temporelles) ou des pixels (pour les images). De même, des versions améliorées de la BEMD et de la *variational mode decomposition* bidimensionnelle ont donné de bons résultats pour l'analyse de la texture, entre autres

(Guanlei et al., 2009 ; An et al., 2015 ; Li et al., 2022). De plus, la BEMD avec des outils de classification basés sur l'apprentissage automatique ou associés à l'apprentissage profond ont conduit à des résultats intéressants dans le domaine biomédical : classification automatique de masse des images de mammographie (Nagarajan et al., 2019), détection de mélanome de la peau (Cheong et al., 2021), détection de petites cibles infrarouges (Chen et al., 2014) ou d'autres applications (Acharya et al., 2018 ; Riahi et al., 2022 ; Sonti et al., 2022 ; Hasan et al., 2023). La deuxième étape du travail de thèse portera sur l'analyse de la texture des images biomédicales avec la BEMD basée sur les motifs ordinaux et avec les mesures basées sur l'entropie bidimensionnelle que nous avons déjà développées. Des comparaisons seront effectuées en termes de résultats de classification (sujets sains vs. pathologiques). Pour l'étape de classification, nous utiliserons le *machine learning*. De plus, nos résultats seront comparés aux résultats de classification obtenus par *deep learning* à partir des mêmes ensembles de données. Pour les images biomédicales, nous utiliserons des bases de données publiques (Rai et al., 2024).

Les travaux de thèse seront effectués à Angers (France), au SETU et à l'ATU (Irlande). Le doctorant passera sa première et sa troisième année de thèse à Angers et sa deuxième année de thèse en Irlande.

2. Références

- Acharya, U. R., Koh, J. E. W., Hagiwara, Y., Tan, J. H., Gertych, A., Vijayanathan, A., ... & Yeong, C. H. (2018). Automated diagnosis of focal liver lesions using bidirectional empirical mode decomposition features. *Computers in Biology and Medicine*, *94*, 11-18.
- Amigó, J. M., & Rosso, O. A. (2023). Ordinal methods: Concepts, applications, new developments, and challenges—In memory of Karsten Keller (1961–2022). *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, *33*(8).
- An, F. P., Lin, D. C., Li, Y. A., & Zhou, X. W. (2015). Edge effects of BEMD improved by expansion of support-vector-regression extrapolation and mirror-image signals. *Optik*, *126*(21), 2985-2993.
- Bandt, C., & Pompe, B. (2002). Permutation entropy: a natural complexity measure for time series. *Physical Review Letters*, *88*(17), 174102.
- Chen, W., Wang, Z., Xie, H., & Yu, W. (2007). Characterization of surface EMG signal based on fuzzy entropy. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, *15*(2), 266-272.
- Chen, W. K., Lee, J. C., Han, W. Y., Shih, C. K., & Chang, K. C. (2013). Iris recognition based on bidimensional empirical mode decomposition and fractal dimension. *Information Sciences*, *221*, 439-451.
- Chen, Z., Luo, S., Xie, T., Liu, J., Wang, G., & Lei, G. (2014). A novel infrared small target detection method based on BEMD and local inverse entropy. *Infrared Physics & Technology*, *66*, 114-124.
- Cheong, K. H., Tang, K. J. W., Zhao, X., Koh, J. E. W., Faust, O., Gururajan, R., ... & Acharya, U. R. (2021). An automated skin melanoma detection system with melanoma-index based on entropy features. *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, *41*(3), 997-1012.
- Guanlei, X., Xiaotong, W., & Xiaogang, X. (2009). Improved bi-dimensional EMD and Hilbert spectrum for the analysis of textures. *Pattern Recognition*, *42*(5), 718-734.
- Hasan, M. K., Ahamad, M. A., Yap, C. H., & Yang, G. (2023). A survey, review, and future trends of skin lesion segmentation and classification. *Computers in Biology and Medicine*, *155*, 106624.
- Huang, N. E., Shen, Z., Long, S. R., Wu, M. C., Shih, H. H., Zheng, Q., Yen, N. C., Tung, C. C., & Liu, H. H. (1998). The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: mathematical, physical and engineering sciences*, *454*(1971), 903-995.
- Humeau-Heurtier, A. (2019). Texture feature extraction methods: A survey. *IEEE Access*, *7*, 8975-9000.
- Humeau-Heurtier, A. (2022). Color texture analysis: A survey. *IEEE Access*, *10*, 107993-108003.

- Jabloun, M. (2022, August). Empirical mode decomposition revisited using ordinal pattern concepts. In *2022 30th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)* (pp. 2186-2190). IEEE.
- Li, P., Liu, C., Li, K., Zheng, D., Liu, C., & Hou, Y. (2015). Assessing the complexity of short-term heartbeat interval series by distribution entropy. *Medical & Biological Engineering & Computing*, *53*, 77-87.
- Li, Z., Xu, Y., Li, T., Shi, Y., Jiang, X., Cao, Y., ... & Huang, J. (2022). Bi-dimensional variational mode decomposition for surface texture analysis. *Procedia CIRP*, *114*, 36-41.
- Nagarajan, V., Britto, E. C., & Veeraputhiran, S. M. (2019). Feature extraction based on empirical mode decomposition for automatic mass classification of mammogram images. *Medicine in Novel Technology and Devices*, *1*, 100004.
- Qin, Y., Qiao, L., Wang, Q., Ren, X., & Zhu, C. (2018). Bidimensional empirical mode decomposition method for image processing in sensing system. *Computers & Electrical Engineering*, *68*, 215-224.
- Rai, H. M., Yoo, J., Moqurrah, S. A., & Dashkevych, S. (2024). Advancements in traditional machine learning techniques for detection and diagnosis of fatal cancer types: Comprehensive review of biomedical imaging datasets. *Measurement*, 114059.
- Riahi, A., Elharrouss, O., & Al-Maadeed, S. (2022). BEMD-3DCNN-based method for COVID-19 detection. *Computers in Biology and Medicine*, *142*, 105188.
- Richman, J. S., & Moorman, J. R. (2000). Physiological time-series analysis using approximate entropy and sample entropy. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, *278*(6), H2039-H2049.
- Rostaghi, M., & Azami, H. (2016). Dispersion entropy: A measure for time-series analysis. *IEEE Signal Processing Letters*, *23*(5), 610-614.
- Sonti, K., & Dhuli, R. (2022). Shape and texture based identification of glaucoma from retinal fundus images. *Biomedical Signal Processing and Control*, *73*, 103473.
- Xudong, J., Junxing, C., Jiangtao, H., Xuanchen, X., & Jie, L. (2020). Pre-stack gather optimization technology based on an improved bidimensional empirical mode decomposition method. *Journal of Applied Geophysics*, *177*, 104026.
- Zhu, B., Huang, L., Yuan, L., Ye, S., & Wang, P. (2020). Exploring the risk spillover effects between carbon market and electricity market: A bidimensional empirical mode decomposition based conditional value at risk approach. *International Review of Economics & Finance*, *67*, 163-175.