

Proposition de stage de Master 2 – 2025

LPG – Université d'Angers

Titre

Utilisation de l'intelligence artificielle pour développer des méthodes d'identification automatique des foraminifères benthiques vivants dans l'objectif d'intégrer ce modèle au suivi des écosystèmes benthiques

Sujet

Contexte

Les communautés benthiques sont connues pour refléter l'effet des perturbations sur le compartiment benthique. L'évaluation de la qualité de ces écosystèmes benthiques par des indices biotiques se focalise, depuis de nombreuses années, sur la macrofaune à travers la mise en place de différents indices tels que l'AMBI (Pearson and Rosenberg, 1978 ; Borja et al., 2000). De nombreuses études ont cependant montré l'intérêt d'utiliser les foraminifères benthiques (méiofaune, < 1 mm) dans le suivi de la qualité des milieux marins (e.g. Alve, 1995 ; Mojtahid et al., 2008 ; Dubois et al., 2021). Récemment de nouveaux indices biotiques de substrats meubles ont été développés (notamment au sein du laboratoire LPG à l'université d'Angers) (e.g. *Foram-AMBI*: Alve et al., 2016 ; Jorissen et al., 2018 ; Bouchet et al., 2021 ; *TSI-Med*: Barras et al., 2014 ; Parent et al., 2021a). Ces indices basés sur l'étude **des foraminifères benthiques** FB vivants (colorées au Rose Bengal) sont complémentaires à ceux basés sur la macrofaune, utilisés de façon plus routinière dans les suivis environnementaux. Dû à leur cycle de vie plus court et mobilité plus réduite, ils répondent rapidement aux changements de nature du substrat, aux variations des concentrations d'oxygène et de matière organique du sédiment, ainsi qu'aux processus de remises en suspension (e.g. Alve et al., 2016 ; Jorissen et al., 2018 ; O'Brien et al., 2021). Lorsque, comme c'est le cas dans le cadre de la DCE et de la DCSMM, les évaluations de l'état écologique doivent être comparées à des états de référence, les indices basés sur les foraminifères benthiques sont alors très robustes puisque grâce à la préservation de leur coquille dans le sédiment, on peut remonter le temps en étudiant des carottes sédimentaires et déterminer les communautés vivant à des périodes préindustrielles (Alve et al., 2009, Delaine et al., 2014 ; Francescangeli et al., 2016, Durand et al., 2016, ; Bouchet et al., 2018 ; Dolven et al., 2021). Les indices basés sur le FB sont donc très compétitifs par rapport aux traditionnels indices basés sur la macrofaune. Mais, comme pour la macrofaune, des verrous freinent l'utilisation des foraminifères en routine : 1) la nécessité d'expert en taxonomie des FB, et 2) l'aspect très chronophage de l'observation et de la détermination de tous les individus à la loupe binoculaire (temps d'analyse de 1 à 3 jours par échantillon).

Pour lever ces verrous, le LPG en collaboration avec le CEREGE, laboratoire ayant une expertise reconnue internationalement dans l'utilisation de réseaux de neurones (CNN) permettant l'identification de différents micro-organismes à coquilles (e.g. Marchant et al., 2020 ; Tétard et al., 2020), met en place une stratégie de recherche pour développer des modèles adaptés à la reconnaissance **des biocénoses** de foraminifères benthiques. Aujourd'hui, l'automatisation de l'identification des thanatocénose de foraminifères planctoniques et benthiques est opérationnelle

grâce notamment aux travaux du CEREGE et plus récemment du LPG (Marchand et al., 2020). Les technologies basées sur l'IA dans la reconnaissance d'images sont suffisamment avancées pour aboutir à l'identification des espèces et de leur couleur permettant de distinguer les spécimens vivants au moment du prélèvement (coloré en rose par le colorant vital le Rose Bengal) des spécimens morts. Une étude intégrant les biocénoses de FB de la Baie de Bourgneuf (programme MudSurv de suivi mensuel initié depuis 2016) montre la parfaite adéquation de cette technologie à nos problématiques. En effet, les étapes d'acquisition d'images automatique, d'apprentissage et de tests du CNN ont été validées (Walla et al., 2023) en comparant les données acquises par méthodes classiques et la méthode basée sur l'IA. Le CNN entraîné reconnaît les espèces avec une précision de plus de 96% et peut faire la différence entre les individus vivants et les individus morts. **Aujourd'hui les outils sont là pour aboutir à l'identification automatique des biocénoses de FB permettant de lever les verrous à l'utilisation en routine de ces bio-indicateurs.**

Objectif

A terme, l'objectif est d'avoir un outil de surveillance des écosystèmes benthiques rapide et facile qui complètera les suivis basés sur la macrofaune et d'inscrire ces indicateurs basés sur la meiofaune dans le SNO BenthOBS.

Le projet de ce stage de master 2 s'inscrit dans cette dynamique en 1) utilisant le CNN développé et validé pour les faunes de foraminifères de la Baie de Bourgneuf (6 espèces ; Walla et al., 2023) pour poursuivre l'acquisition de données de cet observatoire unique, 2) développant un nouveau CNN à partir de communautés de faunes plus diverses. Il est proposé de focaliser sur les faunes de FB inféodées aux herbiers de Zostères (15 à 20 espèces) dans le cadre du suivi saisonnier des herbiers de l'Anse du Cul du Loup (Normandie – projet ZAPER).

Méthode

Le stagiaire se basera sur 3 méthodologies principales.

Phase 1 : Pour se familiariser avec l'automatisation par IA, le stagiaire utilisera le CNN développé à partir des faunes de FB de la Baie de Bourgneuf. Il pourra ainsi analyser rapidement les échantillons (> 125 µm) de l'année 2023 (4 saisons, 3 stations, 3 réplicats).

Phase 2 : Avant d'entraîner un nouveau CNN pour identifier de nouvelles espèces de FB, le stagiaire se familiarisera à l'identification taxonomique des différentes espèces de FB des herbiers de l'Anse du Cul du Loup (échantillons disponibles à 4 saisons différentes, env. 20 échantillons / saison) en adoptant la méthode classique d'identification à la loupe binoculaire sur quelques échantillons.

Phase 3 : Une fois cette expertise acquise, il adoptera la méthodologie utilisée pour l'entraînement du CNN à l'identification automatique par Intelligence Artificielle (IA) des espèces de FB (figure 1). L'acquisition des images des particules composant l'échantillon (>125 µm) se fait grâce à une caméra connectée à une imprimante 3D. Les images (particules sédimentaires, foraminifères...) sont ensuite automatiquement segmentées dans CVAT grâce à un modèle entraîné et une librairie d'image ne comprenant que les foraminifères est constituée. Ces images sont ensuite traitées dans le logiciel ParticuleTrieur (développé par l'équipe du CEREGE). L'entraînement du CNN se fait sur une partie de la base de données d'image où l'opérateur, expert en taxonomie, attribue les noms d'espèces aux différents photos. Une phase de test permet ensuite de valider la précision du modèle. Si elle est

satisfaisante, celui-ci est prête à être utilisée en routine pour analyser les échantillons, si la précision est insatisfaisante, l'expert doit améliorer l'apprentissage en se basant sur un nombre plus important de photos par espèce.

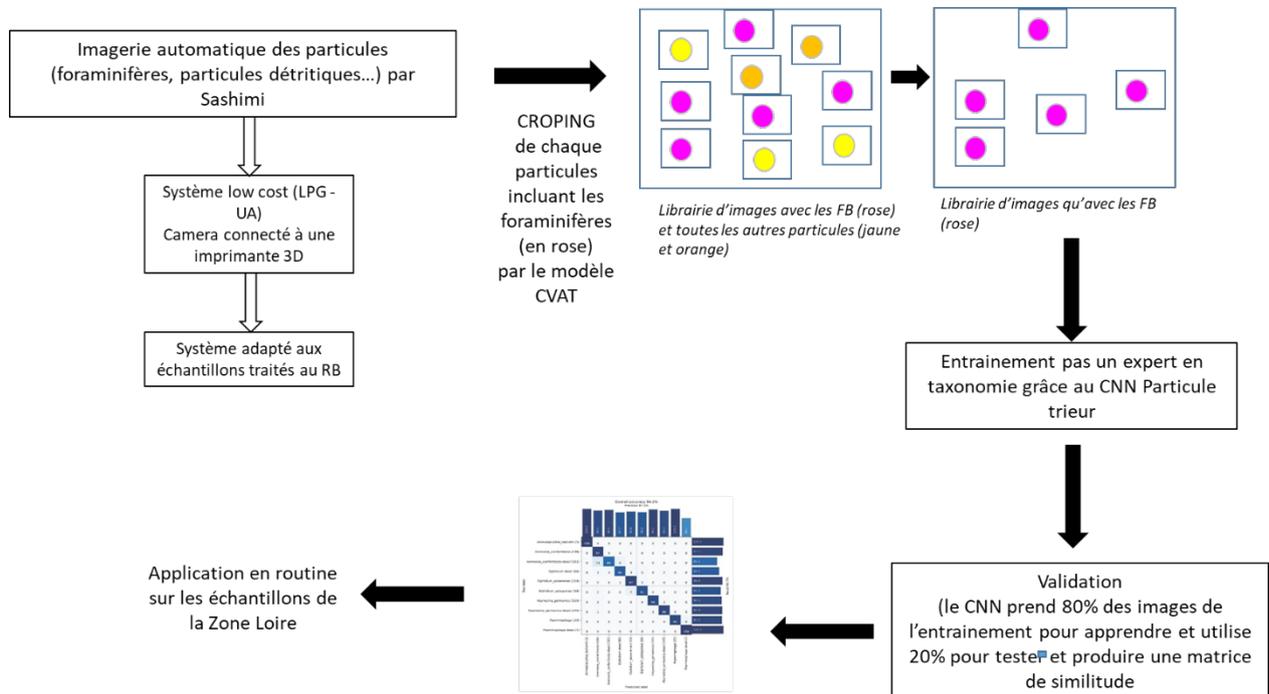


Figure 1 Schéma présentant les différentes phases de la méthode basée sur l'IA pour la reconnaissance automatique des foraminifères benthiques.

Résultats attendus :

Ce stage permettra d'une part d'enrichir la base de données du suivi d'observation des faunes de FB dans la Baie de Bourgneuf. En confrontant les données de 2023 aux données déjà acquises par identification classique de 2016 à 2022, le stagiaire pourra interpréter les variations des faunes en fonction des paramètres environnementaux acquis (géochimie sédimentaire disponible).

Le développement d'un CNN comprenant une plus grande diversité de foraminifères permettrait de continuer et de renforcer le développement de modèle d'identification automatique. L'étude des faunes des herbiers à Zostère de l'Anse du Cul du Loup permettra de mieux caractériser les faunes de ces habitats spécifiques. A l'heure d'aujourd'hui très peu de données sont disponibles sur ces environnements (Cesbron t al., 2016, Daviray et al., en cours).

Bibliographie :

- Alve, E., 1995. Benthic foraminiferal responses to estuarine pollution; a review. *The Journal of Foraminiferal Research* 25, 190–203. <https://doi.org/10.2113/gsjfr.25.3.190>
- Alve, E., Korsun, S., Schönfeld, J., Dijkstra, N., Golikova, E., Hess, S., Husum, K., Panieri, G., 2016. ForAM-AMBI: A sensitivity index based on benthic foraminiferal faunas from North-East Atlantic and Arctic fjords, continental shelves and slopes. *Marine Micropaleontology* 122, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2015.11.001>
- Barras, C., Jorissen, F.J., Labruno, C., Andral, B., Boissery, P., 2014. Live benthic foraminiferal faunas from the French Mediterranean Coast: Towards a new biotic index of environmental quality. *Ecological Indicators* 36, 719–743. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.09.028>
- Borja, A., Franco, J., Pérez, V., 2000. A Marine Biotic Index to Establish the Ecological Quality of Soft-Bottom Benthos Within European Estuarine and Coastal Environments. *Marine Pollution Bulletin* 40, 1100–1114. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(00\)00061-8](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(00)00061-8)

- Bouchet, V., F. Frontalini, F. Francescangeli, P-G. Sauriau, E. Geslin, M-V. Martins, A. Almogi-Labin, S. Avnaim-Katav, L. Di Bella, A. Cearreta, R. Coccioni, A. Costelloe, M. Dimiza, L. Ferraro, K. Haynert, M. Martínez-Colón, R. Melis, M. Schweizer, M. Triantaphyllou, A. Tsujimoto, B. Wilson, et E. Arminot du Châtelet. 2021. « Indicative value of benthic foraminifera for biomonitoring: Assignment to ecological groups of sensitivity to total organic carbon of species from European intertidal areas and transitional waters ». *Marine Pollution Bulletin*. Vol. 164, p. 112071.
- Cesbron, F., Geslin, E., Jorissen, F.J., Delgard, M.-L., Charrieau, L., Deflandre, B., Jézéquel, D., Anschutz, P., Metzger, E., 2016. Vertical distribution and respiration rates of benthic foraminifera: Contribution to aerobic remineralization in intertidal mudflats covered by *Zostera noltei* meadows. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 179, 23–38.
- Delaine M., Arminot du Châtelet E., Bout-Roumazeilles V., Goubert E., Le Cadre V., Recourt P., Trentesaux A., Arthuis R., 2014. Multiproxy approach for Holocene paleoenvironmental reconstructions from microorganisms (testate amoebae and foraminifera) and sediment analyses: The infilling of the Loire Valley in Nantes (France). *The Holocene*, 25, 407-420. Dimiza et al., 2016.
- Dolven, J.K., Alve, E., Rygg, B., Magnusson, J., 2013. Defining past ecological status and in situ reference conditions using benthic foraminifera: A case study from the Oslofjord, Norway. *Ecological Indicators* 29, 219–233. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.12.031>
- Dubois, A., Barras, C., Pavard, J. C., Donnay, A., Béatrix, M., & Bouchet, V. M. (2021). Distribution Patterns of Benthic Foraminifera in Fish Farming Areas (Corsica, France): Implications for the Implementation of Biotic Indices in Biomonitoring Studies. *Water*, 13(20), 2821. <https://doi.org/10.3390/w13202821>
- Durand M., Mojtahid M., Maillet G.M., Proust J.-N., Lehay D., Ehrhold A., Barré A., Howa, H., 2016, Mid- to late-Holocene environmental evolution of the Loire estuary as observed from sedimentary and microfaunal characteristics. *Journal of Sea Research*, 118, 17–34. doi:10.1016/j.seares.2016.08.003
- Francescangeli F., Arminot du Chatelet E., Billon G., Tentesaux A., Bouchet V., 2016, Palaeo-Ecological Quality Status based on foraminifera of Boulogne-sur-Mer harbour (Pas-de-Calais, Northeastern France) over the last 200 years. *Marine Environmental Research* (117). DOI: 10.1016/j.marenvres.2016.04.002
- Jorissen, F., Nardelli, M.P., Almogi-Labin, A., Barras, C., Bergamin, L., Bicchi, E., El Kateb, A., Ferraro, L., McGann, M., Morigi, C., Romano, E., Sabbatini, A., Schweizer, M., Spezzaferri, S., 2018. Developing Foram-AMBI for biomonitoring in the Mediterranean: Species assignments to ecological categories. *Marine Micropaleontology* 140, 33–45. <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2017.12.006>
- Marchant, R., Tetard, M., Pratiwi, A., Adebayo, M., & de Garidel-Thoron, T. (2020). Automated analysis of foraminifera fossil records by image classification using a convolutional neural network. *Journal of Micropalaeontology*, 39(2), 183-202. <https://doi.org/10.5194/jm-39-183-2020>
- Mojtahid, M., Jorissen, F., Pearson, T.H., 2008. Comparison of benthic foraminiferal and macrofaunal responses to organic pollution in the Firth of Clyde (Scotland). *Marine Pollution Bulletin* 56, 42–76. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2007.08.018>
- O'Brien, P.A.J., Polovodova Asteman, I., Bouchet, V.M.P., 2021. Benthic Foraminiferal Indices and Environmental Quality Assessment of Transitional Waters: A Review of Current Challenges and Future Research Perspectives. *Water* 13, 1898. <https://doi.org/10.3390/w13141898>
- Parent, B., Barras, C., Bicchi, E., Charrieau, L.M., Choquel, C., Bénéteau, É., Maillet, G.M., Jorissen, F.J., 2021a. Comparison of Four Foraminiferal Biotic Indices Assessing the Environmental Quality of Coastal Mediterranean Soft Bottoms. *Water* 13, 3193. <https://doi.org/10.3390/w13223193>
- Parent, B., Hyams-Kaphzan, O., Barras, C., Lubinevsky, H., Jorissen, F., 2021b. Testing foraminiferal environmental quality indices along a well-defined organic matter gradient in the Eastern Mediterranean. *Ecological Indicators* 125, 107498. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107498>
- Pearson, T.H., Rosenberg, R., 1978. Macrobenthic succession in relation to organic enrichment and pollution of the marine environment. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.* 16, 229–311.
- Schönfeld, J., Alve, E., Geslin, E., Jorissen, F., Korsun, S., & Spezzaferri, S. (2012). The FOBIMO (FOraminiferal Blo-MONitoring) initiative—Towards a standardised protocol for soft-bottom benthic foraminiferal monitoring studies. *Marine Micropaleontology*, 94-95, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2012.06.001>
- Tetard, M., Marchant, R., Cortese, G., Gally, Y., de Garidel-Thoron, T., & Beaufort, L. (2020). A new automated radiolarian image acquisition, stacking, processing, segmentation and identification workflow. *Climate of the Past*, 16(6), 2415-2429. <https://doi.org/10.5194/cp-16-2415-2020>
- Walla T. Christine Barras Emmanuelle Geslin, Louis Lanoy, Jean-Charles Mazur, Camille Godbillot, Ross Marchant, Thibault de Garidel-Thoron, 2023, Automatic classification of benthic foraminifera for biomonitoring studies. Conference GeoBerlin, Oral presentation.

Compétence nécessaire ou à développer

Recherche bibliographique

Piquage et taxonomie de foraminifères benthiques ainsi que préparation des échantillons

Analyses statistiques de données

Encadrants

Emmanuelle Geslin, Professeure des Universités
UMR 6112 LPG, Université d'Angers
emmanuelle.geslin@univ-angers.fr; 02 41 73 54 07

Christine Barras, Ingénieure de recherche
UMR 6112 LPG, Université d'Angers
christine.barras@univ-angers.fr; 02 41 73 50 02

Nom, adresse structure d'accueil

UMR CNRS 6112 LPG (site d'Angers)
Université d'Angers
2 boulevard Lavoisier
49 045 Angers Cedex

Possibilité d'un séjour au CNAM à Cherbourg

Durée du stage et gratification

Environ 590 €/mois – financement en cours d'acquisition
Durée de 6 mois de février à Juillet 2025. Les dates peuvent être modulées en fonction des dates de stage de l'étudiant.