



Proposition de sujet de thèse

A partir de l'automne 2025

Une espèce ingénieuse proliférante dans le Léman : déplacement, capacité reproductrice et impacts sanitaires de la moule quagga

Contexte

La moule quagga est une espèce exotique envahissante originaire du bassin ponto-caspien (secteur aval du Dniepr en Ukraine). L'invasion de nouveaux milieux a débuté dans les grands lacs Nord-Américains en 1989, et se prolonge aujourd'hui en Europe occidentale. Cet animal a été observé pour la première fois dans une rivière française en 2011, puis en 2015 dans le Léman, aujourd'hui entièrement colonisé par ce mollusque bivalve dont on perçoit encore difficilement l'impact qu'il a/aura sur la biodiversité et le fonctionnement du lac.

La moule quagga possède des aptitudes à proliférer hors normes, et celles-ci sont principalement basées sur ses caractéristiques biologiques et écophysiologiques. Elle possède en effet une capacité élevée de reproduction (100 000 à 1 million de larves pouvant être produites par femelle au cours d'un cycle de vie complet) et, via un stade planctonique, une forte aptitude à se propager rapidement au sein de nouveaux milieux. La quagga peut également s'accrocher et se développer sur une grande variété de substrats, y compris les fonds meubles des lacs (contrairement à sa plus proche cousine, la moule zébrée, qui est, de plus, moins prolifique), tolérer des températures basses, un faible niveau d'oxygénation de l'eau et survivre avec peu de ressources alimentaires. Ces caractéristiques rendent possible sa vie en zones profondes, et elle peut donc envahir la plupart des habitats des lacs profonds, et jusqu'à 250 m de profondeur, comme dans le cas du Léman.

La moule quagga a possiblement de nombreux impacts sur le fonctionnement écologique des lacs. Au-delà de la modification et/ou de la dégradation des habitats qu'elle colonise, ce sont ses capacités filtrantes qui jouent un rôle déterminant. En effet, en filtrant les eaux des lacs, l'animal peut modifier la répartition des nutriments, l'abondance du plancton et la turbidité. En augmentant la transparence des eaux, la lumière pénètre plus profondément dans la colonne d'eau et expose une plus grande partie des sédiments lacustres à des conditions propices à la photosynthèse. Dès lors, les herbiers à macrophytes, les macroalgues et le phytobenthos (en particulier les tapis benthiques de cyanobactéries toxiques) sont susceptibles d'être favorisés ainsi que la faune qui y est associée. De plus, la chaleur du rayonnement solaire qui pénètre plus profondément peut renforcer la stratification du lac, augmenter l'énergie potentielle (c'est-à-dire la stabilité de Schmidt) et prolonger la période de

stratification du lac. Cela pourrait en particulier favoriser la croissance de la cyanobactérie *Planktothrix rubescens* et les efflorescences (*blooms*) de cette espèce filamenteuse hautement toxique.

A l'échelle du Léman, **Il est critique de mieux comprendre l'écophysiologie et les impacts de la quagga pour mieux projeter les évolutions de l'écosystème et de ses usages potentiels.** Ce projet de thèse a pour ambition de combler des lacunes de connaissances via la proposition de travaux originaux et dimensionnés à l'échelle d'une thèse de doctorat, avec le soutien d'un certain nombre de scientifiques et d'étudiant-e-s en master. Au-delà de la thèse, nos résultats pourront aussi servir à alimenter des modèles de fonctionnement lacustre développés dans d'autres projets du CARTEL (ANR QUALAG).

Sujet de doctorat

L'objectif du projet QUALEM vise à mieux comprendre (i) les capacités de déplacement et de colonisation de la moule quagga, (ii) les caractéristiques de sa reproduction en fonction des conditions environnementales et (iii) son impact possible sur la structure phytoplanctonique, en particulier le développement préférentiel de cyanobactéries toxiques.

Les questions fondamentales que nous souhaitons explorer et auxquelles le candidat devra tenter de répondre sont les suivantes :

- Quels sont les capacités de colonisation et de déplacement de la moule quagga ? Quels supports sont les plus favorables à une densification des colonies ?
- Quelles sont les capacités reproductives de l'animal ? Sont-elles dépendantes de la profondeur ou plus généralement de conditions de température ? Comment se déroule le cycle-type d'une reproduction ?
- Quel est le risque « cyanobactérie » associé à la filtration du bivalve ? La filtration induit-elle des conditions favorables à la prolifération d'espèces toxiques ?

NB : Ce travail de thèse sera mené en parallèle à d'autres travaux de thèse, dont les avancées pourront lui être bénéfiques, et réciproquement. L'autre doctorat est financé dans le cadre du projet [ANR QUALAG](#), portant sur l'estimation des taux de croissance du bivalve tout au long de l'année, la réalisation d'une cartographie de la distribution du bivalve à l'échelle du lac, en termes de densité, biomasse et biovolume, et de l'évaluation de la capacité de filtration globale théorique à l'échelle de l'écosystème.

Le travail qui devra être effectué est le suivant :

Tâche 1 (mois 1 à 12) : Mesure de la capacité de déplacement et de colonisation de la moule quagga

Le travail proposé ici vise à déterminer la capacité de colonisation de la moule quagga pour une multitude de supports (naturels ou artificiels) et la vitesse de déplacement des individus. A partir de différents substrats naturels et artificiels, l'analyse d'images prises en plongée de manière fréquente et régulière permettra de répondre à ce questionnement. Nous proposons notamment d'utiliser une technique non invasive, non destructive et permettant une identification des moules afin de pouvoir suivre la croissance *in vivo* de divers individus : la photo(grammétrie). Il est prévu de valoriser sous forme d'un article ces résultats dès la fin de la première année de suivi. Seront impliqués dans ce travail le thésard (comptages, analyses des images), Stéphan Jacquet (DR), Jean-Nicolas Beisel (PR), et le bureau d'étude Subbear.

Tâche 2 (mois 6 à 18) : Estimation des capacités reproductives de la moule quagga

La stratégie de reproduction est importante pour comprendre la dynamique d'expansion de la moule quagga. Il est proposé de suivre sur une année complète la capacité reproductive de l'animal au moyen de différentes approches (suivi et comptage en microscopie des larves véligères à partir de prélèvements au filet à plancton et outils ADNe), et ce, dans différentes zones du lac et à différentes profondeurs afin d'estimer l'impact de la profondeur et de la densité en moules sur sa capacité de reproduction. Ces outils existent déjà et sont opérationnels au CARTEL avec notamment la possibilité de discriminer les deux dresseines (zébrée et quagga), avec les approches ADNe. De récents travaux basés sur l'ADNe ont montré que la quagga se reproduit tout au long de l'année dans le Léman à la différence de la moule zébrée, mais uniquement en un point central du lac, et l'objectif sera ici de caractériser cette dynamique de reproduction de façon plus précise (impact de la profondeur, de l'abondance). D'autre part, des approches de filtration différentielle seront utilisées pour tenter de discriminer le signal ADN des larves, de celui de l'ADNe relargué dans l'eau. Des individus de différentes tailles seront régulièrement prélevés pour en examiner en microscopie le degré de maturation des gonades. Seront impliqués dans ce travail le thésard (prélèvements, extraction ADN et analyse en ddPCR, microscopie des gonades), Stéphan Jacquet (DR), Jean-Nicolas Beisel (PR), Marine Vautier (IE), Cécile Chardon (TR), Leslie Iainé (TR) et l'équipe de préleveurs du CARTEL.

Tâche 3 (mois 19 à 33) : Mesure du risque associé aux cyanobactéries

Des expériences seront menées en conditions de laboratoire pour estimer l'impact de la moule quagga sur la structure phytoplanctonique. Les expériences consisteront à « nourrir » des moules avec des cultures d'algues¹. Après leur collecte dans le lac, les agrégats de moules seront transportés dans des glacières aérées remplies d'eau du lac vers une salle d'élevage thermorégulée. Les moules seront soigneusement nettoyées et stockées dans de petits aquariums en attendant le début des expériences. La filtration sera évaluée après avoir « affamé » les animaux pendant 24 heures et les avoir mis dans des bacs dans lesquels la circulation en eau est assurée par une pompe péristaltique. L'expérience sera effectuée avec différents types d'algues proposées en concentrations connues, seules ou en mélanges. Des cultures toxiques (*i.e.* capable de produire des cyanotoxines) et non toxiques seront utilisées afin de déterminer si la présence des moules a un impact sur la cyanotoxicité algale (*i.e.* sélection des souches toxiques). Pour estimer avec précision la filtration, nous prélèverons de l'eau au début de l'expérience, puis toutes les heures pendant six heures. Nous utiliserons la méthode de clairance pour calculer la filtration et la densité cellulaire des algues sera déterminée par cytométrie en flux ou par comptage en cellules de Malassez. La présence de cyanotoxines sera mesurée par HPLC et la population microbienne algale sera analysée par qPCR via des marqueurs génétiques de toxicité et par une approche d'amplicon sequencing de l'ARNr 16S. Les attendus de ces expériences sont importants car ils participeront à affiner notre vision de l'impact possible des moules quagga sur la sélection d'espèces toxiques du phytoplancton. Seront impliqués dans ce travail le thésard (approches expérimentales), Stéphan Jacquet, Nicolas Tromas (DR junior), Emilie Realis (IR).

NB : Les 3 mois restant (34 à 36) consistent en une marge de sécurité et le temps à dédier au manuscrit de thèse, à la préparation de l'oral et de l'après thèse.

La stratégie et les moyens mis en place pour obtenir ces données et effectuer ces différentes tâches sont/seront les suivantes :

- Pour la colonisation : construction de substrats artificiels ; photo ; photogrammétrie ;

¹ Le CARTEL dispose d'une importante collection algale référencée. Il s'agit de la Thonon culture collection (<https://carrel-collection.hub.inrae.fr/>)

- Pour la reproduction : Microscopie (analyse des larves et individus reproducteurs) ; approches ADNe/ARNe (ddPCR)
- Pour l'impact sur la structure phytoplanctonique : Expériences en conditions contrôlées au laboratoire ; Microscopie & Cytométrie en flux

Candidature

- CV et lettre de motivation à envoyer à stephan.jacquet@inrae.fr et jn.beisel@engess.unistra.fr
- Entretien (en distanciel ou présentiel) devant les encadrants et membres externes du 1^{er} au 11 septembre 2025
- Décision mi-septembre 2025
- Prise de fonction entre le 1^{er} octobre et le 1^{er} novembre 2025

Encadrement

- Stéphane JACQUET, INRAE CARRTEL, Thonon-les-Bains
- Jean-Nicolas BEISEL, LIVE-ENGEEES, Strasbourg

Lieu de la thèse

- Thonon-les-Bains, INRAE CARRTEL, 75 bis avenue de Corzent
- Missions prévues à Strasbourg au cours de la thèse