

Fiche projet Accord Cadre ZABR – Agence de l'eau

2022- 4-1 -Heatwaves-Lehna-Riverly- Stochasticité thermique et risque pour l'ichtyofaune en Saône

INTITULE DU PROJET : HEATWAVES, impact de la stochasticité thermique sur la biodiversité en Saône : évaluations et prédictions des risques à partir des performances écophysiologicals sur l'ichtyofaune native et invasive

Responsable scientifique du projet:

- **Nom :** Dechaume-Moncharmont
- **Prénom :** François-Xavier
- **Organisme du contact :** UMR LEHNA, CNRS-université Lyon 1
- **Fonction :** Professeur
- **Courriel :** fx.dechaume@univ-lyon1.fr

EQUIPES DE RECHERCHES ZABR CONCERNEES et CONTACT SCIENTIFIQUE DE L'EQUIPE

- **UMR LEHNA** (université Lyon 1-CNRS), équipe E2C, Ecophysologie comportement et conservation,
 - François-Xavier Dechaume-Moncharmont, PU univ Lyon 1
 - Loïc Teulier, MCF univ Lyon 1
 - Yann Voituron, PU univ Lyon 1
 - Ludovic Guillard, AI CNRS
- **UR RIVERLY** (INRAe), équipes EcoFlows et HyBV,
 - Florentina Moatar, DR INRAe
 - Martial Ferréol, IE INRAe

THEMATIQUE NATURE ET OPERATION *(ne rien compléter)*

- Thématique : Etude recherche et réseau de suivi
- Nature du projet : Etude générale et recherche
- Type d'opération : Recherche et innovation
- **Intitulé de l'opération :**

LOCALISATION DU PROJET: *(se remplit automatiquement - Ne rien remplir)*

- **Commune principale et numéro INSEE :** à compléter
- **Sous bassin versant**
- **Nom du cours d'eau**
- Contrat (si intégré dans un contrat de rivière, un SAGE ou un autre contrat avec l'agence de l'eau)

RESUME DU PROJET GLOBAL

Résumé : La fréquence d'évènements thermique imprévus, comme de vague de chaleur ou de refroidissement de grande ampleur (goutte froide), augmente avec le dérèglement environnemental. Ils peuvent aussi être observés en aval d'aménagements (par exemple lors d'éclusée de centrales hydroélectriques). Ces épisodes extrêmes sur des temps brefs s'enchaînent souvent rapidement et rendent les conditions de vie moins prévisibles pour les organismes. En milieu aquatique, ces variations aiguës de température dépendent fortement du milieu mais peuvent avoir des conséquences importantes sur la biodiversité et la résilience des écosystèmes. Certaines espèces centrales dans la stabilité des chaînes trophiques sont particulièrement exposées, notamment les ectothermes prédateurs de haut niveau trophique comme les poissons. Les effets physiologiques d'une augmentation de température sont étudiés depuis des dizaines d'années en laboratoire, mais ces travaux se contentent de maintenir des individus dans des conditions de température haute, mais stable. Ces protocoles standards décrivent donc mal ce qui se produit naturellement. Nous proposons d'évaluer l'impact de la stochasticité thermique sur la physiologie d'un large spectre d'espèces de poissons présentes en Saône, y compris des espèces en danger ou des espèces invasives. Ce travail repose sur une collaboration étroite entre les écophysiologicals de LEHNA pour les mesures des coûts métaboliques et les hydrodynamiciens de RIVERLY pour la modélisation des cartes

de températures actuelles et prédites sous différents scénarios de réchauffement. Les livrables du projet incluent des « fiches poisson » avec leur susceptibilité à la stochasticité thermique, et une nouvelle entrée pour les « fiches rivières » avec une estimation de l'impact de leur régime thermique prévue sur l'ichtyofaune.

ENCART 2022- 4-1 HEATWAVES-EQUIPE 1 (Responsable François-Xavier Dechaume-Moncharmont, LEHNA)

- Tâche de l'équipe dans le projet : coordination du projet, capture, stabulation des poissons, expérimentations en milieu contrôlés (laboratoire), coordination de la rédaction et production des livrables et de la restitution des résultats scientifiques.

ENCART 2022- 4-1 HEATWAVES-EQUIPE 2 (Responsable Florentina Moatar, RIVERLY)

- Tâche de l'équipe dans le projet : appui à la modélisation, installation et collecte des données de terrain par mesure directe, analyse des résultats, participation à la rédaction et la production des livrables.

CONTEXTE SCIENTIFIQUE

Contexte général. Les animaux ectothermes, et notamment les espèces de grandes tailles comme les poissons, sont particulièrement sensibles aux brusques variations de températures (McKenzie et al., 2021; Morash et al., 2021). Comparativement au milieu marin, plus stable, les variations de températures en rivières et en lac sont plus rapides et de plus grande amplitudes (Cyr & Cyr, 2003). Or, le **bouleversement environnemental d'origine anthropiques** accentue encore l'ampleur et les conséquences de ces variations. Non seulement le réchauffement global à une altération de la biodiversité, caractérisée par une augmentation de la richesse d'espèces tolérantes au chaud et par une diminution des espèces tolérantes au froid, mais les études portant sur les conséquences d'une lente dérive des températures à l'échelle de décennies et à l'échelle des espèces sous-estiment fortement les conséquences du dérèglement climatique sur les individus. Une élévation progressive de la température aurait moins de conséquences physiologiques sur les espèces animales que des variations thermiques aiguës (Thompson et al., 2013). Les variations thermiques de longue durée affectent les espèces animales en les forçant par exemple à migrer pour se retrouver dans des milieux plus favorables, mais pourraient aussi conduire à des réponses évolutives permettant aux animaux de vivre dans une eau où la température varie. En revanche, des variations aiguës de la température ont des effets délétères immédiats sur détectables à l'échelle individuelle. En environnement aquatique, les températures varient non seulement en fonction d'hétérogénéités spatiales observables à des mailles fines en fonction de la profondeur, du débit, du régime de précipitation, du rayonnement incident, d'effets d'ombrage, et de résurgence de nappe (Beaufort et al., 2020; Lalot et al., 2015; Moatar & Gailhard, 2006). Mais d'autres fluctuations, largement sous estimées, peuvent avoir des conséquences importantes. Des événements imprévus, comme des réchauffement ou des refroidissements de grande ampleur sont de plus en plus fréquents au fur et à mesure du dérèglement climatique (Li et al., 2017) ou de l'augmentation de la pression anthropique (par exemple, en lien avec les éclusées de centrales hydroélectriques). Dans la Saône plus précisément les prévisions sont très préoccupantes : on s'attend à des changements forts et très hétérogènes des régimes thermiques avec une altération des habitats, une réduction des zones refuges et des déplacements de populations de poisson (Morel et al., 2022). Ces **événements extrêmes d'augmentation ou de diminution aigue de la température** sur des temps brefs peuvent s'enchaîner rapidement et fragiliser les écosystèmes (Breshears et al., 2021; Knouft & Ficklin, 2017; Mameri et al., 2020; Woolway et al., 2022).

Or les protocoles standards pour étudier les effets physiologiques du réchauffement climatique chez une espèce reposent classiquement sur la comparaison de groupes expérimentaux placés dans des conditions stables où la température est maintenue haute ou basse, mais sans variation pendant plusieurs jours ou semaines (Burggren, 2019). Ces **protocoles standards sont donc largement inadaptés** pour évaluer les conséquences des phénomènes aigus aléatoires. Le présent projet vise à quantifier l'effet de variations rapides de la température sur le comportement et le métabolisme (cellulaire et à l'échelle de l'organisme). Pour cela nous avons mis au point un dispositif innovant permettant l'ajustement de la température rapide, automatique et indépendant pour chaque aquarium d'élevage. Nous proposons de travailler avec un large spectre d'espèces de poissons actuellement présents dans la Saône et ses affluents, incluant non seulement des espèces natives abondantes mais aussi des espèces d'intérêt en conservation comme des espèces menacées ou des espèces invasives (voir détails dans la partie méthodologiques). Nous souhaitons exposer des poissons échantillonnés en Saône à des régimes thermiques fortement variables de façon à évaluer et comparer leur plasticité à court terme. L'objectif est d'identifier les espèces les plus fragiles à des variations aiguës de température, ou au contraire les espèces les plus tolérantes.

Ce projet repose donc sur une **collaboration étroite** entre des chercheurs capables de décrire et prédire les trajectoires physico-chimiques (température, oxygène) des rivières (UR Riverly, équipes Ecoflows et HyBV) et des chercheurs travaillant sur la plasticité métabolique et comportementale des poissons (UMR LEHNA, équipe E2C « Ecophysiologie, Comportement, Conservation »). Pour mener à bien cette collaboration, nous devons **lever plusieurs verrous**. Tout d'abord, la caractérisation de l'habitat thermique des cours d'eau dans le bassin de la Saône, en intégrant des stations en amont en aval des cours d'eau, est un prérequis indispensable pour étalonner les conditions expérimentales auxquelles seront exposés les poissons. Nous devons disposer de données de terrain fiables (imagerie thermique, sondes et capteurs thermiques en rivière) et de modélisation des hétérogénéités locales des températures à des échelles fines (gradient spatial et temporel, existence de refuges thermiques, dynamique des vagues de chaleur ou de gouttes froides). D'autre part, l'évaluation de la réponse physiologique et comportementale des poissons à un stress thermique nécessite des conditions expérimentales très contrôlées, suppose des missions d'échantillonnage de terrain (en collaboration avec l'OFB et les fédérations de pêche), et des frais de stabulation en animalerie scientifique.

Contexte ZABR :

- **Thématique ZABR :** Changement Climatique et Ressources (CCR)
- **Site Atelier ou Observatoire ZABR :** Saône
- **Besoin de connaissance Agence de l'eau :**
 - Incidences et adaptations au changement climatique : identifier les impacts du réchauffement climatique

FINALITE ET ATTENDUS OPERATIONNELS

Objectifs scientifiques. Notre projet vise à caractériser la réponse physiologique à la stochasticité thermique d'espèces de poissons sauvages, issus d'échantillonnage de terrain dans le bassin versant de la Saône. Les compétences de Florentina Moatar et Martial Ferréol (UR RIVERLY, INRAE) en termes de cartographie et modélisation des régimes thermiques dans les rivières sont déterminants pour la réussite du programme. En effet, nous avons besoin de connaître les températures auxquelles ont été et seront exposés les poissons *in natura* à un grain fin, non seulement à l'échelle spatiale mais aussi temporelle. Au travers de cette collaboration, les chercheurs de RIVERLY affineront la précision des données de thermie en complétant les bases de données sur lesquelles ils travaillent actuellement par des campagnes de mesures ciblées et de l'instrumentation de terrain. Ces données permettront non seulement de mieux connaître l'ampleur actuel du stress thermique subi par les poissons, mais aussi d'en prédire les évolutions probables à court et moyen terme suivant les différents scénarii de réchauffement publiés par le GIEC.

En nous appuyant sur les valeurs prédites par ces modèles de la thermie dans le bassin de la Saône, nous étudierons la réponse des poissons à des variations aiguës de températures. Notre objectif est de réaliser un phénotypage métabolique des poissons. L'équipe du LEHNA possède une expertise reconnue dans l'évaluation du métabolisme *in vivo* chez les poissons en chambre métabolique et en tunnel de nage. Nous sommes actuellement en train de valider un protocole innovant pour le contrôle automatique de la température dans les aquariums expérimentaux (voir détail dans la partie méthodologique). Nous avons maintenant besoin de développer une recherche ambitieuse portant sur le phénotypage d'un grand nombre d'espèces échantillonnées sur le terrain. Cela inclut des missions de terrain, de la stabulation de poisson à l'animalerie Acsed de l'université de Lyon et à l'équipement de plusieurs postes de mesures (achat de sonde oxymétriques et électrovane). Nous serons donc à même de comparer la plasticité métabolique d'espèces à l'écologie souvent contrastée face des variations aiguës de température ce qui est peu ou très mal documenté à l'heure actuelle (Drake et al., 2017; Morash et al., 2021; Saunders et al., 2002).

Au travers de ce projet nous répondrons donc à plusieurs questions : La stochasticité thermique affecte-t-elle l'ensemble des espèces indifféremment ? Les espèces invasives sont-elles plus résilientes ? L'augmentation prédite de la stochasticité thermique constitue-t-elle un risque supplémentaire pour les poissons d'eau douce ? Une des finalités de ce projet est donc l'approfondissement des connaissances, ayant recours à une méthodologie innovante adossée à une collaboration étroite entre chercheurs de disciplines différentes.

Attendus opérationnels. (1) Nous cherchons tout d'abord à caractériser et prédire les régimes thermiques auquel sont ou seront exposés les populations de poissons dans la Saône (amont et aval), ses affluents et en contrastant les stations de mesures (en écosystèmes lotiques ou lentiques). Une des retombées de ce travail sera d'affiner les **outils de diagnostic** à destination des gestionnaires. (2) Notre objectif est aussi d'évaluer la **sensibilité de l'ichtyofaune** à des variations thermiques aiguës en ciblant des espèces natives et non natives (espèces invasives) du bassin versant de la Saône. Ce projet permettra la production de fiche « espèce » avec leur susceptibilité à la stochasticité thermique, et non plus seulement une indication de leur optimum thermique. Deux espèces peuvent avoir les mêmes besoins en termes de température moyenne et fortement différer quant à leur réponse à des stress thermiques aiguës et répétés. Cet indicateur pourrait servir à guider les plans d'aménagements des rivières en fonctions de leur impact sur la thermie en rivières et des espèces d'intérêt patrimonial ou piscicole en lien avec les fédérations de pêche. La susceptibilité la stochasticité thermique d'espèces menacées – comme l'Apron du Rhône, encore présent dans la Loue – est aussi une information importante dans la mise en place d'un plan de gestion intégrée. Enfin, il est crucial de mieux connaître le rôle de la résistance thermique de poisson invasif, comme le Gobie à tache noire, dont l'invasion en cours menace gravement la biodiversité en Saône (Pitoiset, 2021).

Limites du projet. Dans la phase de discussion avec les correspondants Agence de l'Eau pour la préparation de cette réponse à l'AAP, plusieurs questions pertinentes et légitimes ont été soulevées. Nous avons intégré les demandes concernant les stations de mesure, le choix des espèces (notamment les espèces patrimoniales) ou des sites (amont/aval, écosystèmes lotiques et lentiques) et les interlocuteurs (OFB, fédérations de pêche). Mais plusieurs autres suggestions ne peuvent pas être intégrées pour des raisons de temps et de coût. Il est par exemple important de noter que le présent projet ne prétend pas décrire les **interactions trophiques** entre espèces. Nous nous concentrons sur la réponse écophysiologique des poissons à un stress thermique. Si nous voulons étudier cette réponse sur un grand nombre d'espèces en provenance de stations contrastées, avec suffisamment de robustesse statistique, nous devons nous restreindre à des mesures rapides en conditions contrôlées. Nous ne prévoyons donc pas, à ce stade, de mesures de réponses fonctionnelles ou d'impact trophique sur les communautés. De la même manière, il est possible que la susceptibilité aux fluctuations thermiques soit amplifiée par des **effets synergiques avec des polluants** (chimiques, microplastiques, etc.) ou par une exposition à des **parasites**. Mais, là encore, nous préférons nous concentrer sur une question plus modeste mais toujours largement importante. Nous ne savons pas comment la physiologie des poissons leur permet de s'adapter à des chocs thermiques imprévisibles. Il nous paraît raisonnable de commencer par établir clairement l'étendue des risques physiologiques face à un seul stresser, la stochasticité thermique, avant de chercher à combiner les

facteurs dans une approche multi-stress. Mais nous envisageons, à plus long termes et dans un cadre qui dépasse le présent projet, d'adopter une approche plus holistique des risques pour la biodiversité en Saône.

DESCRIPTIF DETAILLE

Méthodologie

1. Modélisation des régimes thermiques en Saône. La modélisation des régimes hydrologiques et thermiques dans le bassin de la Saône est réalisée dans un projet financé par l'AERMC (Accord Cadre INRAe, 2022-2024) à travers la thèse de Léo Rouchy (Riverly). Cette modélisation s'appuiera largement sur les températures déjà mesurées par des sondes de températures existantes via les Fédérations de Pêche. Nous souhaitons acquérir des données supplémentaires, notamment en relation avec les campagnes d'échantillonnage des poissons dont les phénotypage physiologique sera réalisé au LEHNA. Nous prévoyons de compléter ce jeu de données avec plus de 200 stations répartis de manière assez homogène dans le bassin de la Saône. Dans cette partie du projet, nous souhaitons aussi compléter ces mesures avec de l'imagerie infrarouge thermique pour avoir les gradients spatiaux. Nous avons ainsi besoin d'investir dans de la métrologie et de l'instrumentation (sondes à température et oxygène, imagerie infra-rouge thermique embarquée) afin de mettre en évidence des zones de refuge thermique, des tâches d'eau froide en surface, la température au fond (câble de fibre optique mesurant la température sur plusieurs centaines de mètres) pour mettre en évidence les apports de nappe. Ces données serviront également à la validation des modèles hydrologique (J-2000) et thermique (T-NET) qui sont en cours de construction pour le bassin de la Saône (thèse Léo Rouchy). Ces travaux seront donc complémentaires aux modèles d'habitats hydrauliques en cours de développement dans l'UMR Riverly (Morel et al., 2022). Pour le développement de l'imagerie infrarouge nous aurons recours au service d'un bureau d'étude spécialisé dans l'acquisition des images thermiques (B. Marteau). Nous allons bénéficier aussi des images déjà acquises en 2019 sur 9 affluents de la Saône en Bresse (projet IRT, guide méthodologique, H. Piegay). Dans ce projet nous allons compléter l'acquisition par un survol sur la Saône Amont ou un autre cours d'intérêt pour le projet (ex. Oignon). Le couplage entre profils spatiaux de température obtenus par imagerie infrarouge durant certaines périodes de canicules, des sondes de température à différents endroits et la modélisation permettra de caractériser la variabilité des indicateurs thermiques à l'échelle fine : certains tronçons de rivière, augmentations ou diminutions brusques de température, nombre de jours/heures de dépassement avec signification pour les espèces de poissons investigués.

2. Evaluation de la sensibilité des poissons à la stochasticité thermique. Pour cette partie du projet, nous souhaitons échantillonner plusieurs espèces de poissons présents dans le bassin de la Saône à différents niveaux (tête de bassin versant ou zone aval, écosystème lotiques et lenticues). Nous nous appuyerons sur l'expertise de l'OFB Bourgogne Franche Comté, notamment Julien Bouchard et Sylvain Besson avec qui nous collaborons depuis plusieurs années, ainsi que les écologues de l'université de Bourgogne Franche Comté, dont Loïc Bollache qui travaille sur l'impact trophique des poissons en Saône sur les populations d'amphipodes. Nous prévoyons aussi de travailler étroitement avec les membres du GT "piscicole" animé par les fédérations de pêche.

Nous souhaitons étudier un spectre large d'**espèces natives** importante de par leur abondance, leur rôle écologique, leur intérêt patrimonial ou piscicole, comme par exemple *Esox lucius* (Brochet), *Perca fluviatilis* (Perche), *Squalius cephalus* (Chevesne), *Abramis brama* (Brème), *Sander lucioperca* (Sandre), *Barbus barbus* (Barbeau), *Gymnocephalus cernua* (Grémille), *Barbus barbus* (Barbeau), *Cottus gobio* (Chabot commun), *Salaria fluviatilis* (Blennie fluviatile). Le choix définitif des espèces n'est pas encore arrêté. Il dépendra fortement de la présence des espèces dans les portions de cours d'eau cartographié avec précision par l'équipe de Florentina Moatar. Ce point est donc encore en discussion à ce stade. Nous souhaitons aussi cibler au moins une **espèce menacée**, *Zingel asper* (Apron du Rhône), dont la conservation fait l'objet d'un PNA auquel est rattaché un chercheur du projet, Loïc Teulier. Toujours avec une préoccupation de conservation, nous incluons dans ce projet des **espèces invasives** telles que *Pseudorasbora parva*, *Ameiurus melas* (poisson-chat), *Ponticola kessleri* (Gobie de Kessler), et surtout *Neogobius melanostomus* (Gobie à tache noire) qui vient d'arriver en Saône (observation à Cendrecourt en 2019-2022 par l'OFB et notre équipe) et qui a déjà profondément destabilisé les écosystèmes dans le bassin de la Meuse. Ce Gobie est originaire de la région Ponto-Caspienne et son écologie laisse penser qu'il a un métabolisme particulièrement résistant à un large spectre de paramètres physicochimiques (Christensen et al., 2021; Dickey et al., 2021). Des frais de mission ont donc été intégrés au budget projet pour les campagnes d'échantillonnage.

Une fois les individus ramenés au laboratoire, ils seront séparés en **quatre lots**, trois lots seront maintenus à une température constante haute, basse ou intermédiaire, et un lot à température stochastique variant entre la température haute et la température basse (voir détails plus loin). Ces gammes de températures seront calibrées à partir (1) des valeurs d'optimum thermique rapportées dans la littérature et la base de données *FishBase*, et (2) des gammes de températures extrêmes décrites dans leur cours d'eau d'origine. Nous ne pouvons pas contrôler l'expérience thermique subit par les poissons *in natura*, mais nous comptons nous appuyer sur les modélisations produites par l'équipe de Florentina Moatar pour contrôler cet effet *a posteriori*, sous la forme de variables explicatives dans nos analyses statistiques. En outre, tous les poissons passeront par une phase d'acclimatation d'au moins 15 jours au laboratoire avant le début des expériences pour standardiser leur expérience thermique récente.

Un des **verrous méthodologiques** du projet était d'arriver à moduler la température rapidement et précisément (changement aléatoire de $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ par 10 minute, pendant plusieurs jours), et ceci indépendamment dans chaque aquarium. S'il est facile de chauffer rapidement un aquarium au moyen de résistance, il est beaucoup plus délicat de le refroidir rapidement. Pour cela, grâce à un financement de la FR BioEnviS (université Lyon 1, 2022, porteur : FX Dechaume-Moncharmont), nous avons développé un **dispositif expérimental innovant**. Pour refroidir un aquarium, une partie de son eau est prélevée par un système de pompes contrôlées par un nano-ordinateur Raspberry PI et circule en circuit fermé au travers d'un échangeur thermique plongeant dans un bac d'eau froide de grand volume (500 L, maintenu à

température par des groupes froids Teko). Avec ce dispositif nous parvenons à ajuster précisément la température et à suivre un régime thermique stochastique déterminé à l'avance. Ce dernier est simulé au moyen d'un processus de marche aléatoire contraint. Toutes les 10 minutes la température change de $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ mais sans dépasser la valeur maximale et minimale définie les deux régimes continus extrêmes. Nous contrôlons en outre que la température moyenne subie par le poisson reste identique ($\pm 0.1^{\circ}\text{C}$) à du groupe contrôle à la température constante intermédiaire (Fig. 1).

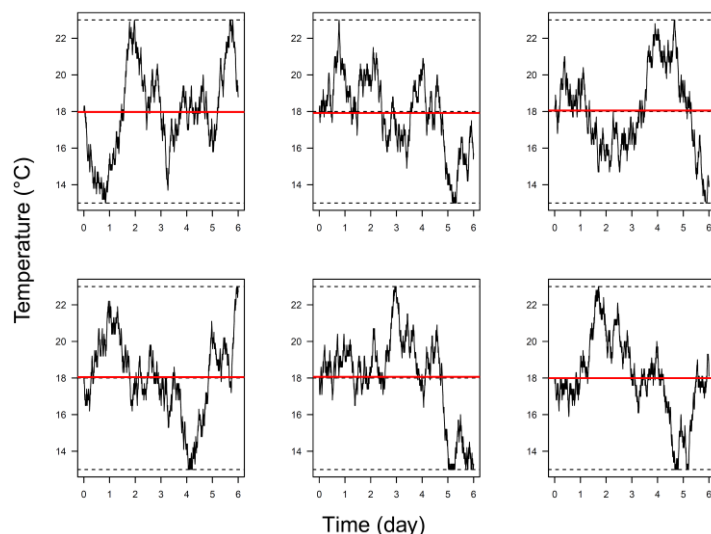


Fig. 1. Exemple de six séries temporelles de régime thermique stochastique simulées par un processus de marche aléatoire contraint. Les séries sont bornées par les valeurs hautes et basses des deux régimes continus, et ont toutes exactement la même moyenne (ligne rouge) proche de la température du régime continu intermédiaire. Les température et la durée des séries n'est ici donnée qu'à titre d'illustration. Nos expériences préliminaires en cours permettront d'affiner ces paramètres.

Cette phase d'exposition à un régime thermique devrait durer de cinq à quinze jours. Nous sommes actuellement encore en phase d'expérimentation sur cette question en utilisant des Apron du Rhône et des Gobies à tache noire pour déterminer la durée optimale de la période de test. Cette partie impose donc une stabulation longue des poissons et entraîne un loyer (frais de sous-traitance intégrés au budget) pour l'animalerie Acсед de l'université Lyon1.

Avant et après leur stabulation dans un des quatre traitements thermiques décrits plus haut, différents paramètres physiologiques comme le métabolisme de repos et en activité, le stress oxydant et les hormones de stress) des poissons seront évalués. Les données de métabolisme au repos seront acquises dans des chambres métaboliques et le métabolisme en activité sera mesuré en condition de locomotion forcée en tunnel de nage. Loic Teulier possède une expertise reconnue dans ce domaine (Teulier et al., 2013, 2018; Thoral et al., 2022). En parallèle des données métaboliques, différents paramètres cellulaires comme la production de radicaux libres et les défenses antioxydantes seront estimés. Plus précisément, l'objectif de ces mesures est d'évaluer les effets thermiques sur le bilan oxydatif et la capacité à produire de l'ATP qui affecte le cycle biologique des organismes (Monaghan et al., 2009). Les dommages des ROS (*Reactive oxygen species*) s'accumulent par exemple au fil du temps et conduisent à une maturation plus précoce et une accélération de la sénescence. Yann Voituron possède une expertise reconnue dans ce domaine (Roussel et al., 2015; Voituron et al., 2022). Cette partie du projet implique des frais d'équipement (sondes oxymétriques), de consommable (réactifs) et des gratifications deux stagiaires de M2 (6 mois par stage, un en 2023 et un en 2024).

Notre hypothèse est que la comparaison de la réponse des individus entre les lots, permettra d'identifier les espèces capable de résister à la température. Les poissons exposés à des variations stochastiques de la température de manière répétées devraient payer un coût métabolique important. Si les poissons sont non résilients à cette stochasticité, nous prédisons que leur niveau de stress physiologique dépassera celui des trois températures continues. Au contraire, une espèce résiliente devrait être capable de maintenir un niveau de stress métabolique proche de celui du lot acclimaté à une température stable intermédiaire puisqu'il a subit, en moyenne, la même température (Fig. 2)

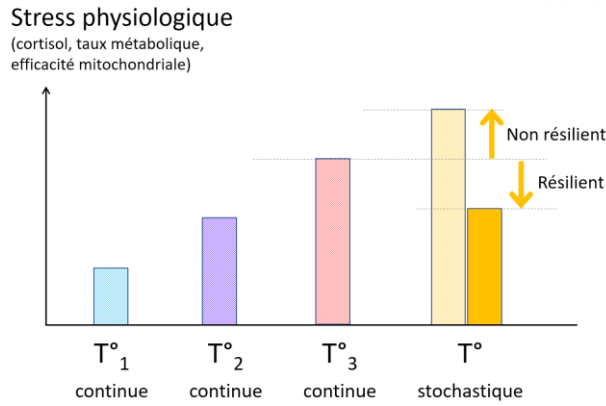


Fig. 2. Exemple d'attendus théoriques caractérisant les espèces résiliente (orange) ou non (jaune) à la stochasticité thermique.

Durée du projet: janvier 2023 - décembre 2024

Calendrier prévisionnel :

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Modélisation des températures																								
Mesure de terrain (température)																								
Installation des postes de mesures physio																								
Capture des poissons et mise en stabulation																								
Mesures métaboliques																								
Analyse des données																								
Rédaction																								

LIVRABLES :

Comme détaillé plus haut, les livrables du projet sont de deux ordres.

Fiches « Rivière ». Sur le plan des relevés de terrain et de la modélisation thermique, nous établirons les profils thermiques de portions de rivières dans le bassin de la Saône. Certaines fiches stations (<https://thermie-rivieres.inrae.fr/>) qui caractérisent les tolérances thermiques seront être complétées avec des informations spécifiques issues de ce projet. Leur but est de servir de valeurs de références quant à la stochasticité thermique actuellement subie par l'ichtyofaune. Cette information est indispensable pour calibrer les mesures de sensibilité des espèces de poissons à cette stochasticité au laboratoire. Mais elle a aussi un but de diagnostic des risques associés à des aménagements, et de prédiction des risques futurs en lien avec le réchauffement climatique attendu à moyen terme. Ces travaux seront donc complémentaires aux modèles d'habitats hydrauliques en cours de développement dans l'UMR Riverly. Ces informations seront intégrées aux fiches « Rivière », et aux banques de données accessibles aux gestionnaires. L'objectif opérationnel est d'aider au cadrage des actions (prélèvements, gestion des débits, aménagement et restructuration des habitats, continuité écologique, etc.).

Fiches « Poisson ». Le deuxième livrable concerne la production de fiches « poisson » indiquant la susceptibilité physiologique des espèces à la stochasticité thermique. Pour le moment, les gestionnaires ne disposent que d'informations relatives à l'optimum thermique des espèces. Or cette information sous-évalue grandement le stress métabolique subi par les poissons : les températures auxquelles ils sont exposés peuvent très bien rester dans la gamme de tolérance théorique de l'espèce et pourtant entraîner des dégâts physiologiques majeurs si elles changent fréquemment pendant un temps assez long. Par ailleurs, nous travaillons déjà depuis plusieurs années avec les collègues de l'OFB de Bourgogne Franche Comté (resp. Julien Bouchard) notamment autour du suivi du gobie à tache noire invasif en Saône, et avec le PNA Apron pour la protection de cette espèce emblématique menacée dans la Loue. Les informations sur la susceptibilité thermique de ces espèces sont très importantes pour ces plans de conservation et l'identification des leviers d'action. L'objectif de ces fiches « Poisson » est aussi d'aider les gestionnaires (par exemple, les fédérations de pêches) à identifier les espèces à risques ou au contraire moins exposées au stress induit par la stochasticité thermique.

L'objectif à termes est d'arriver à croiser les informations disponibles sur les fiches rivières (indicateur thermiques, niveaux de risques) avec les informations sur les espèces de poissons présentes sur les stations de mesures (en lien avec les fédérations de pêche et l'OFB) et donc de prédire l'impact des fluctuations thermiques sur la distribution des espèces.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Beaufort, A., Moatar, F., Sauquet, E., Loicq, P., & Hannah, D. M. (2020). Influence of landscape and hydrological factors on stream–air temperature relationships at regional scale. *Hydrological Processes*, *34*(3), 583–597. <https://doi.org/10.1002/hyp.13608>
- Breshears, D. D., Fontaine, J. B., Ruthrof, K. X., Field, J. P., Feng, X., Burger, J. R., Law, D. J., Kala, J., & Hardy, G. E. St. J. (2021). Underappreciated plant vulnerabilities to heat waves. *New Phytologist*, *231*(1), 32–39. <https://doi.org/10.1111/nph.17348>
- Burggren, W. W. (2019). Inadequacy of typical physiological experimental protocols for investigating consequences of stochastic weather events emerging from global warming. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, *316*(4), R318–R322. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.00307.2018>
- Christensen, E. A. F., Norin, T., Tabak, I., van Deurs, M., & Behrens, J. W. (2021). Effects of temperature on physiological performance and behavioral thermoregulation in an invasive fish, the round goby. *Journal of Experimental Biology*, *224*(1), jeb237669. <https://doi.org/10.1242/jeb.237669>
- Cyr, H., & Cyr, I. (2003). Temporal scaling of temperature variability from land to oceans. *Evolutionary Ecology Research*, *5*(8), 1183–1197.
- Dickey, J. W. E., Coughlan, N. E., Dick, J. T. A., Médoc, V., McCard, M., Leavitt, P. R., Lacroix, G., Fiorini, S., Millot, A., & Cuthbert, R. N. (2021). Breathing space: Deoxygenation of aquatic environments can drive differential ecological impacts across biological invasion stages. *Biological Invasions*, *23*(9), 2831–2847. <https://doi.org/10.1007/s10530-021-02542-3>
- Drake, M. J., Miller, N. A., & Todgham, A. E. (2017). The role of stochastic thermal environments in modulating the thermal physiology of an intertidal limpet, *Lottia digitalis*. *The Journal of Experimental Biology*, *220*(Pt 17), 3072–3083. <https://doi.org/10.1242/jeb.159020>
- Knouft, J. H., & Ficklin, D. L. (2017). The potential impacts of climate change on biodiversity in flowing freshwater systems. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, *48*(1), 111–133. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110316-022803>
- Lalot, E., Curie, F., Wawrzyniak, V., Baratelli, F., Schomburgk, S., Flipo, N., Piegay, H., & Moatar, F. (2015). Quantification of the contribution of the Beauce groundwater aquifer to the discharge of the Loire River using thermal infrared satellite imaging. *Hydrology and Earth System Sciences*, *19*(11), 4479–4492. <https://doi.org/10.5194/hess-19-4479-2015>
- Li, Z., He, L., Zhang, H., Urrutia-Cordero, P., Ekvall, M. K., Hollander, J., & Hansson, L.-A. (2017). Climate warming and heat waves affect reproductive strategies and interactions between submerged macrophytes. *Global Change Biology*, *23*(1), 108–116. <https://doi.org/10.1111/gcb.13405>
- Mameri, D., Branco, P., Ferreira, M. T., & Santos, J. M. (2020). Heatwave effects on the swimming behaviour of a Mediterranean freshwater fish, the Iberian barbel *Luciobarbus bocagei*. *Science of The Total Environment*, *730*, 139152. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139152>
- McKenzie, D. J., Zhang, Y., Eliason, E. J., Schulte, P. M., Claireaux, G., Blasco, F. R., Nati, J. J. H., & Farrell, A. P. (2021). Intraspecific variation in tolerance of warming in fishes. *Journal of Fish Biology*, *98*(6), 1536–1555. <https://doi.org/10.1111/jfb.14620>
- Moatar, F., & Gailhard, J. (2006). Water temperature behaviour in the River Loire since 1976 and 1881. *Comptes Rendus Geoscience*, *338*(5), 319–328. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2006.02.011>
- Monaghan, P., Metcalfe, N. B., & Torres, R. (2009). Oxidative stress as a mediator of life history trade-offs: Mechanisms, measurements and interpretation. *Ecology Letters*, *12*(1), 75–92. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2008.01258.x>
- Morash, A. J., Speers-Roesch, B., Andrew, S., & Currie, S. (2021). The physiological ups and downs of thermal variability in temperate freshwater ecosystems. *Journal of Fish Biology*, *98*(9), 1524–1535. <https://doi.org/10.1111/jfb.14655>
- Morel, M., Pella, H., Branger, F., Sauquet, E., Grenouillet, G., Côte, J., Braud, I., & Lamouroux, N. (2022). *Catchment-scale applications of hydraulic habitat models: Climate change effects on fish* [Soumis].
- Pitoiset, T. (2021). *L'impact du Gobie à tâche noire (Neogobius melanostomus) sur la communauté de poissons indigènes du bassin de la Meuse, de la Moselle et de la Saône* [Master thesis]. université Bourgogne Franche-Comté.
- Roussel, D., Salin, K., Dumet, A., Romestaing, C., Rey, B., & Voituron, Y. (2015). Oxidative phosphorylation efficiency, proton conductance and reactive oxygen species production of liver mitochondria correlates with body mass in frogs. *Journal of Experimental Biology*, *218*(20), 3222–3228. <https://doi.org/10.1242/jeb.126086>
- Saunders, L. M., Tompkins, D. M., & Hudson, P. J. (2002). Stochasticity accelerates nematode egg development. *Journal of Parasitology*, *88*(6), 1271–1272. <https://doi.org/10.2307/3285511>
- Teulier, L., Guillard, L., Leon, C., Romestaing, C., & Voituron, Y. (2018). Consequences of electroshock-induced narcosis in fish muscle: From mitochondria to swim performance: muscle bioenergetics of electroshocked fish. *Journal of Fish Biology*, *92*(6), 1805–1818. <https://doi.org/10.1111/jfb.13621>
- Teulier, L., Omlin, T., & Weber, J.-M. (2013). Lactate kinetics of rainbow trout during graded exercise: Do catheters affect the cost of transport? *Journal of Experimental Biology*, *216*(24), 4549–4556. <https://doi.org/10.1242/jeb.091058>
- Thompson, R. M., Beardall, J., Beringer, J., Grace, M., & Sardina, P. (2013). Means and extremes: Building variability into community-level climate change experiments. *Ecology Letters*, *16*(6), 799–806. <https://doi.org/10.1111/ele.12095>
- Thoral, E., Farhat, E., Roussel, D., Cheng, H., Guillard, L., Pamentier, M. E., Weber, J.-M., & Teulier, L. (2022). Different patterns of chronic hypoxia lead to hierarchical adaptive mechanisms in goldfish metabolism. *Journal of Experimental Biology*, *225*(1), jeb243194. <https://doi.org/10.1242/jeb.243194>
- Voituron, Y., Roussel, D., Teulier, L., Vagner, M., Ternon, Q., Romestaing, C., Dubillot, E., & Lefrançois, C. (2022). Warm acclimation increases mitochondrial efficiency in fish: A compensatory mechanism to reduce the demand for oxygen. *Physiological and Biochemical Zoology*, *95*(1), 15–21. <https://doi.org/10.1086/716904>
- Woolway, R. I., Albergel, C., Frölicher, T. L., & Perroud, M. (2022). Severe lake heatwaves attributable to human-induced global warming. *Geophysical Research Letters*, *49*(4), e2021GL097031. <https://doi.org/10.1029/2021GL097031>