

TITRE DU PROJET : Couplage entre modélisations hydrologiques et thermiques spatialisées pour caractériser l'habitat thermique des cours d'eau dans le bassin de la Saône

RESPONSABLE SCIENTIFIQUE DU PROJET : Florentina Moatar et Flora Branger (RiverLy, INRAE)

EQUIPES DE RECHERCHES CONCERNÉES et CONTACT SCIENTIFIQUE DE L'EQUIPE

AUTRES PARTENAIRES

(préciser leur degré d'implication et leur accord)

- Recherche : Nicolas Lamouroux, directeur RiverLy
- Institutionnel : AERMC, Délégation Besançon, Valérie Paul

THEME DE RATTACHEMENT SCIENTIFIQUE (par rapport aux dispositifs de recherche auxquels vous émarger)

Hydrologie/Ecohydrologie

RATTACHEMENT A DES BESOINS DE CONNAISSANCES SAÔNE (ENQUETE SAÔNE)

- Quel est et sera l'impact du changement climatique sur la quantité et la qualité de l'eau, des milieux naturels, des usages ?
- Quelle est la résilience des milieux du Val de Saône aux effets du changement climatique ?

RESUME DU PROJET GLOBAL (15 lignes max)

- Résumé 15 lignes :
- Cout total du projet :
- Livrables :

L'objectif de ce projet est de mettre en œuvre et exploiter une modélisation spatialisée couplée, à base physique, de l'hydrologie et de la thermie de l'eau, afin de caractériser la variabilité spatio-temporelle de la température des cours d'eau et son évolution potentielle sous changement climatique à l'échelle du bassin versant de la Saône. Le bassin de la Saône est d'un intérêt particulier car il présente des enjeux liés à la thermie des cours d'eau très contrastés, en lien avec la forte variabilité de la lithologie (zones karstiques notamment) et des usages potentiels de l'eau. La taille du bassin est assez grande pour considérer les échanges nappe-rivière, le développement de la ripisylve, les discontinuités créées par des seuils, le cumul des retenues de faible à moyenne taille. Nous proposons ainsi un couplage des deux modèles spatialisés J2000 (hydrologique) et TNET (thermique) développés à INRAE RiverLy.

D'un point de vue scientifique, ce projet se propose de lever plusieurs verrous : 1) l'intégration des échanges nappes-rivières dans la modélisation, pour mieux avancer dans la caractérisation des régimes thermiques depuis les têtes des réseaux hydrographiques, jusqu'au zones aval; 2) la correction des biais pour des processus mal représentés ou des influences anthropiques non prises en compte, en intégrant l'approche physique spatialisée et l'approche statistique ; 3) la définition de signatures thermiques et hydrologiques couplées pour permettre de classer la vulnérabilité des bassins versants, diagnostiquer les modèles ou contribuer à la redéfinition du concept d'habitat physique.

Livrables :

- **Rapport 1** : Analyse des signatures thermiques et hydrologiques à partir des observations du bassin de la Saône : vulnérabilité des milieux face au réchauffement climatique

- **Rapport 2** : Simulations spatialisés de débits et températures sur la période 1960 -2020 et à l'horizon 2050-2070 dans le bassin de la Saône : analyse des tendances en lien avec les caractéristiques géomorphologiques et de la végétation.
- **Manuscrit de thèse**

FINALITES ET ATTENDUS OPERATIONNELS (1 p. maxi) :

D'un point de vue opérationnel, ce projet permettra :

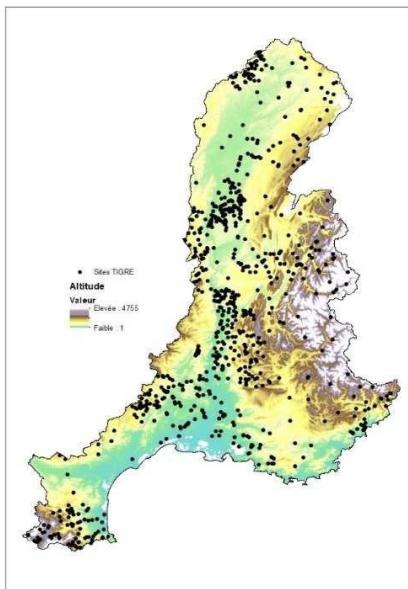
- 1) d'analyser les chroniques de températures acquises par différents acteurs du bassin (OFB, DREAL, Fédérations de Pêche, BRGM, Réseau Karst ..). Le travail réalisé à l'échelle de la France, dans le cadre du projet TIGRE (OFB, Inrae, <https://thermie-rivieres.inrae.fr>) qui a déjà permis d'acquérir un certain nombre de stations de suivis, sera continué pour permettre d'analyser la totalité des informations disponibles au niveau du bassin de la Saône. La modélisation statistique réalisée à l'échelle de la France, pour les moyennes maximales des 30 et 7 jours les plus chauds (Mtw30j et Mtw7j) sera améliorée pour le territoire du bassin de la Saône en fonction de ces nouvelles données et des caractéristiques des réseaux hydrographiques, notamment géomorphologiques, plus finement caractérisées.
- 2) d'accéder à des simulations par les modèles J-2000 (hydrologie) et T-NET (températures) après avoir été confrontés aux observations. Ils pourront donner accès à des simulations passées (potentiellement depuis 1960) de débits et températures journalières en fonction des forçages climatiques, de manière spatialisée en un certain nombre de points du bassin à définir. A titre d'exemple, le modèle thermique T-NET, mis en place sur le bassin de la Loire (100 000 km²) donne accès aux températures simulées en 55 000 tronçons de la BDcarthage ; Ainsi, l'évolution de ces grandeurs suivant les différents sous-bassins pourra être analysé par la suite en relation avec l'évolution de la qualité de l'eau ou des organismes aquatiques. Les résultats des simulations pourront être synthétisés sous forme d'indicateurs (cartographiques par exemple) à définir avec l'Agence.
- 3) de fournir des éléments d'évolution possible des débits et des températures sous scénarios climatiques. Les scénarios climatiques seront choisis en lien avec le projet national Explore2, qui vise à remettre à jour les éléments sur l'impact du changement climatique sur l'hydrologie en France. Ce projet, permettra d'analyser l'impact de ces scénarios sur l'hydrologie et la température de l'eau à une maille plus fine. Des scénarios sur des actions d'adaptation, comme l'augmentation du linéaire et de la densité de la végétation riparienne et de leur influence sur la température de l'eau pourront être analysés.

OBJECTIFS ET METHODOLOGIE (2 p. maxi) :

Le projet pourrait se dérouler en plusieurs phases :

1) Analyse des données de températures et débits disponibles sur le bassin de la Saône sous forme de signatures hydrologiques et thermiques

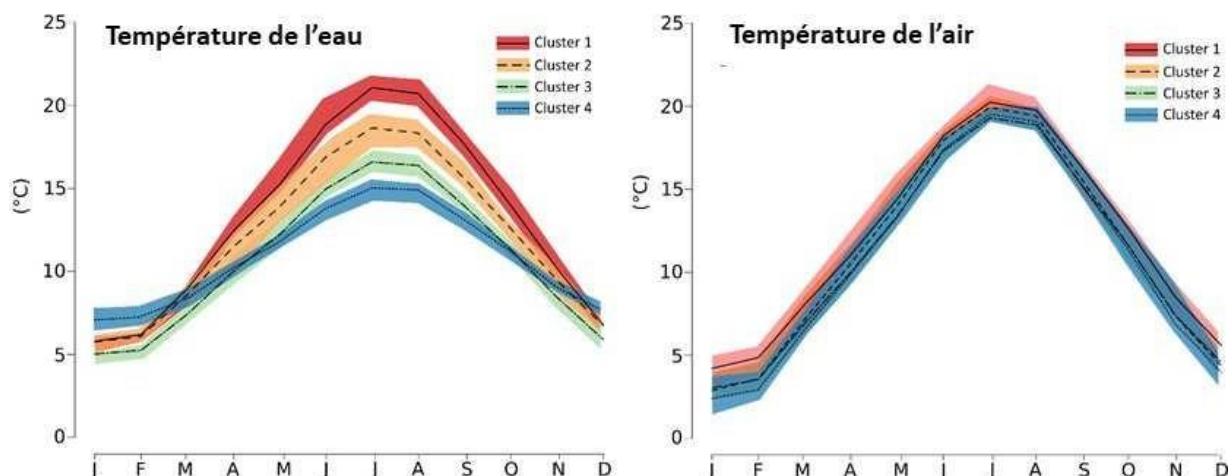
La première étape sera la constitution d'une base de données hydrologique et thermique. Nous bénéficions des acquis récents du projet TIGRE –Géostatistique des régimes thermiques en France, financé par l'OFB (Beaufort et al, 2020, <https://thermie-rivieres.inrae.fr>) qui ont permis d'acquérir 2700 stations auprès des différents acteurs de l'eau en France.



Stations de suivis bancarisées dans le projet TIGRE.

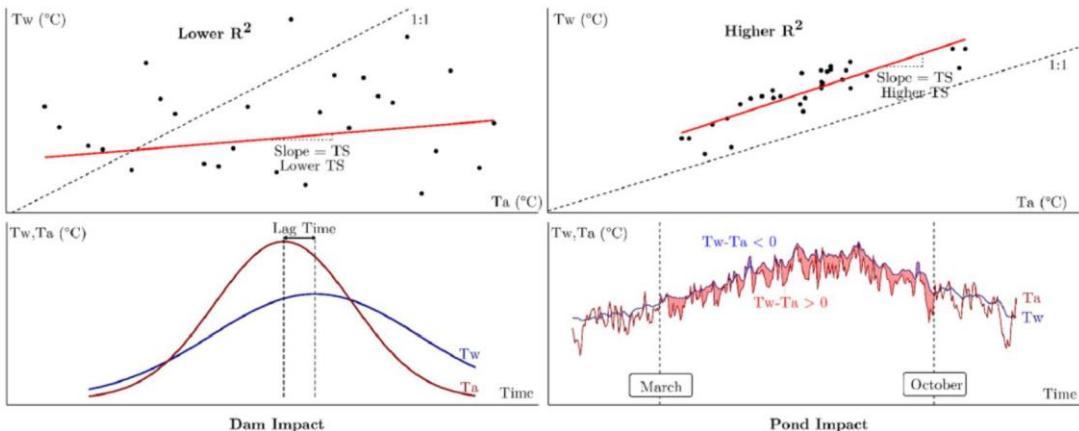
Pour le bassin de la Saône, nous disposons déjà d'une centaine de stations ayant des chroniques horaires entre 2009 et 2018. Ces données sont hétérogènes dans l'espace et sont souvent incomplètes (manques d'observations, ou d'années d'observations), ce qui complique l'analyse spatiale des données à plusieurs stations. Une première étape consiste donc à compléter la couverture temporelle et spatiale de ces stations (d'autres producteurs de données, années récentes). Ensuite à reconstituer les chroniques de température de l'eau manquantes en fonction de la température de l'air et d'autres variables hydroclimatiques.

Un premier travail à l'échelle de la France a permis de définir quatre régimes saisonniers, sur la base de 5 métriques thermiques. Ces régimes saisonniers devraient être précisés de manière plus fine pour le bassin de la Saône. Ils pourraient renseigner sur les zones les plus sensibles aux changements climatiques et ceux les plus régulées par les apports de nappe, la présence de végétation de berge.



Régimes thermiques de la température de l'eau identifiés à l'échelle de la France : Régime 1 (chaud et très variable), Régime 2 (chaud et variabilité modérée), Régime 3 (Froid et variabilité modérée), Régime 4 (Froid et peu variable)

Des travaux récents ont été réalisés de façon indépendante en hydrologie (Horner et al., WRR, soumis) et pour les régimes thermiques (Seyedhasemi et al, 2020). Par exemple, pour les régimes thermiques, nous avons identifié 5 métriques qui permettent de mettre en évidence l'impact cumulé des retenues et des barrages. Les deux premières sont basées sur les régressions entre les températures de l'eau et de l'air pendant la période estivale : la pente, noté TS, sensibilité thermique et le coefficient de détermination. Dans des rivières naturelles, le R^2 est généralement fort et est combiné à une pente forte pour un contrôle climatique, ou à une pente faible, pour l'influence des eaux souterraines. Une pente et un R^2 faibles indiquent un découplage entre températures de l'air et de l'eau, ce qui est le cas lors de l'influence des barrages, qui ont une gestion indépendante de la climatologie. Les trois autres indicateurs sont basés sur l'analyse des cycles saisonniers annuels de la température de l'eau et de l'air : LagTime (décalage temporel entre les maximums saisonniers de températures de l'eau et de l'air ; ils renseignent sur l'influence des barrages) : deux autres indicateurs basés sur le cumul des différences des degrés entre température de l'eau et de l'air, entre mars et octobre. Ces deux indicateurs renseignent sur l'influence cumulé des étangs.



Indicateurs thermiques conceptuels pour détecter l'influence des grands barrages ($>15m$, LagTime fort, R^2 faible TS faible) et des étangs ou retenues de faible taille (TS fort, somme des écarts entre Tw (eau) et Tair importante) (tiré de Seyedhasemi et al, 2021)

L'idée est de combiner ces approches pour classer les bassins versants, diagnostiquer les modèles et mieux caractériser les habitats physiques. Ce travail sera fait à partir des données de température et débits (eaux de surface, eaux souterraines). Certaines signatures pourront être utilisées pour diagnostiquer les modèles dans un deuxième temps. Il s'agit ainsi de définir des signatures thermiques et hydrologiques couplées pour permettre de classer la vulnérabilité des bassins versants, diagnostiquer les modèles ou contribuer à la redéfinition du concept d'habitat physique.

Les reconstitutions spatiales dans le cadre du projet TIGRE des moyennes des 30 et 7 jours consécutifs de température de l'eau (2009-2018) seront confrontés aux observations du bassin de la Saône. L'hétérogénéité spatiale de ces métriques seront confrontés à des indicateurs de bassin versant, eaux souterraines, et hydrologiques. Un travail sur la nouvelle base de données BD Topage sera réalisé en intégrant des indicateurs morphologiques issus d'un Lidar plus précis. Des nouvelles améliorations pourraient être proposées dans le cadre de ce projet.

Un exemple de cette reconstitution est donné ici pour le département du Doubs.

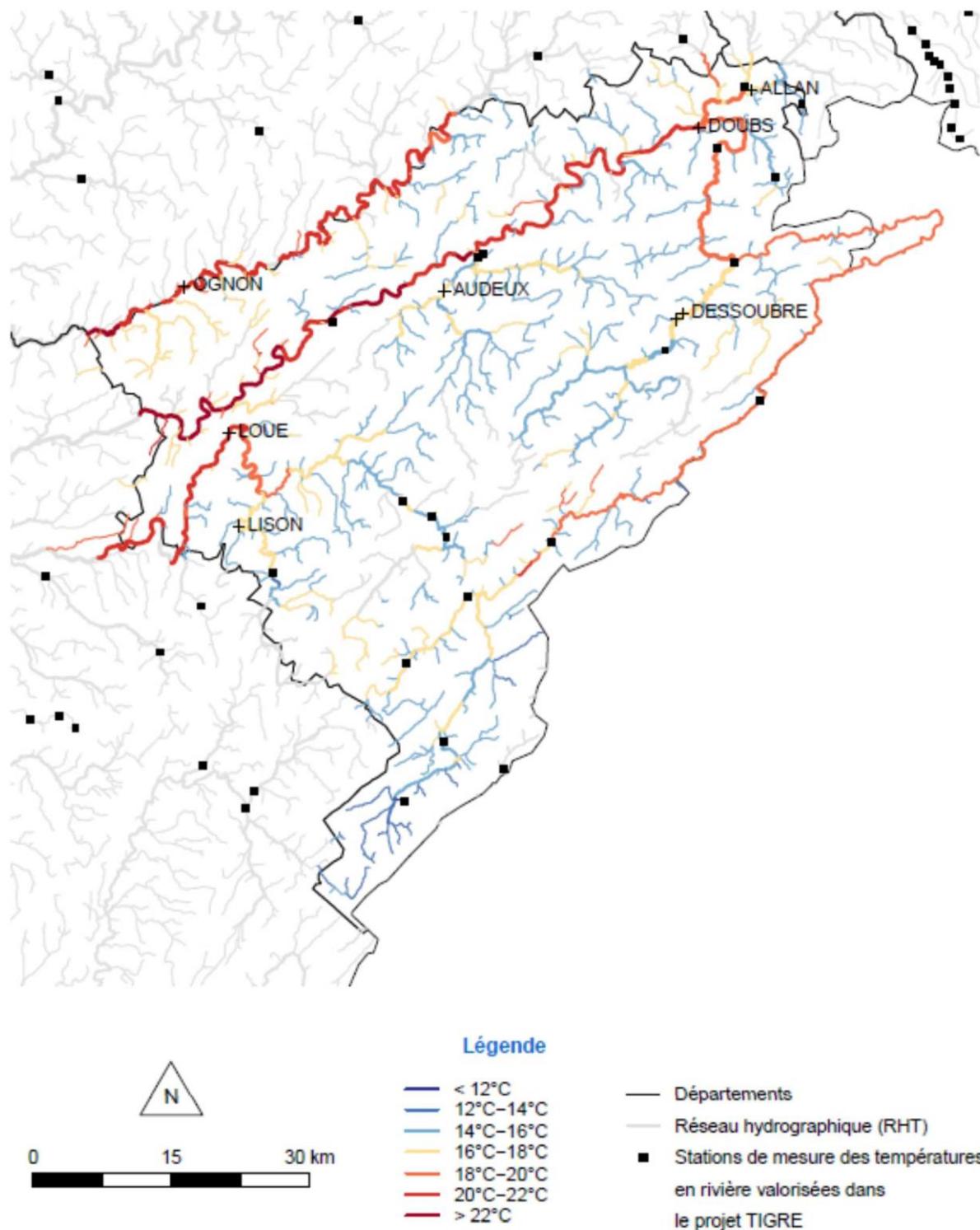
Livrables étape 1 :

- cartographie des signatures thermiques et hydrologiques à l'échelle des stations de suivi ; analyse des facteurs d'explication spécifiques : rôle du karst et autres formations géologiques, impact des étangs, rôle de la ripisylve, ..
- cartographie de certaines métriques (exemple moyenne des 30 ou 7 jours les plus chauds à l'échelle des tronçons de la BDcarthage/BDTopage après extrapolation spatiale en fonction des variables environnementales
- Evolutions des différentes métriques (dépassement de seuils...) pour des années hydrologiques et climatiques contrastées
- Cartographie des tronçons les plus à risque vis-à-vis du réchauffement
- Evolution à longue terme sur les stations on l'on dispose des chroniques journalières sur plus de 30 ans (possiblement la Saône)

Régimes thermiques en rivière – Période 2009–2018

DOUBS (25)

Températures moyennes maximales sur 30 jours (°C)



Résultats issus du projet TIGRE (contact : florentina.moatar@inrae.fr), en partenariat avec :



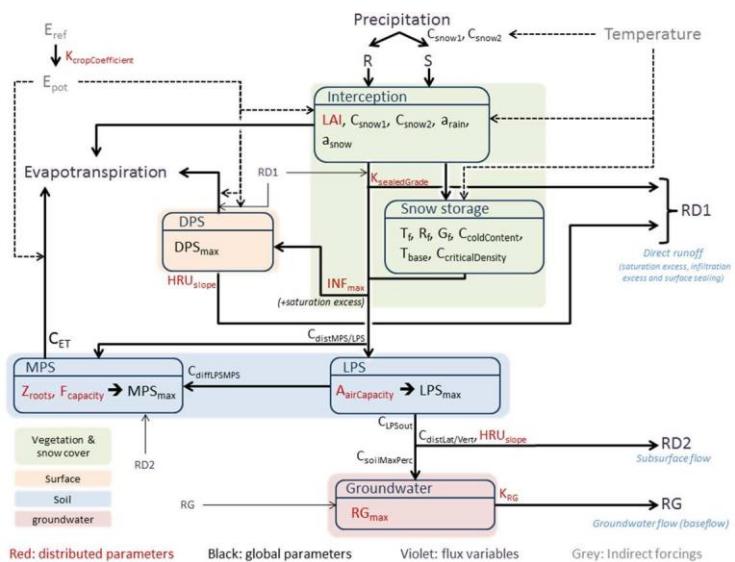
Fiches par département et par stations disponibles sur <https://thermie-rivières.inrae.fr>

2) Mise en place des modèles J-2000 et T-NET sur le bassin de la Saône.

Cette étape sera conduite pour adapter les résolutions spatiales des deux modèles et l'intégration des données d'entrées dans les deux modèles : forçages climatiques, hydraulique, végétation riparienne, occupation du sol. Ce projet permettra de coupler deux modèles spatialisés, développés à INRAE, le modèle hydrologique J2000, avec le modèle T-NET, initialement développé à l'Université de Tours (Beaufort et al, 2016, Loicq et al, 2018 Seyedhasemi, en cours) et qui sont présentés brièvement ci-après.

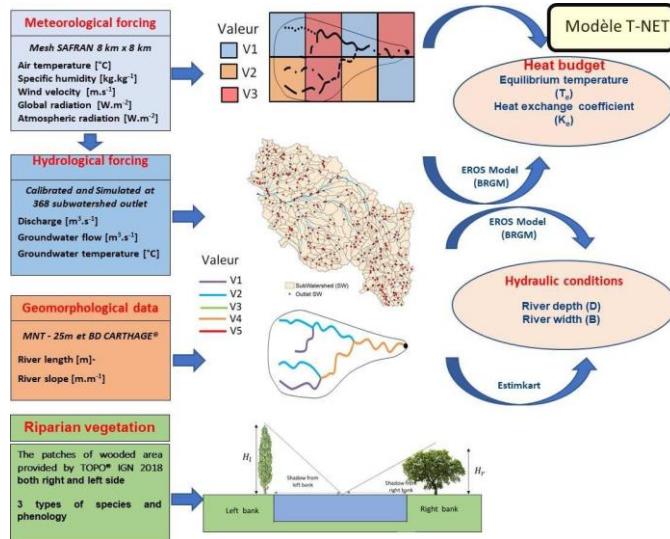
Modèle J2000 : Le modèle hydrologique J2000 a été initialement développé à l'Université Friedrich-Schiller de Jéna (Allemagne) pour répondre aux enjeux de la Directive Cadre sur l'Eau (Krause et al., 2006), et est co-développé à INRAE Riverly depuis 2011. J2000 représente les processus hydrologiques principaux de manière simplifiée, tout en gardant un lien avec la physique des phénomènes, selon une approche « orientée processus » retenant les processus suivants : la partition des précipitations entre pluie et neige ; l'interception des précipitations par la végétation ; l'évapotranspiration ; les processus de fonte et d'accumulation de neige ; l'infiltration dans les sols ; le ruissellement de surface ; la recharge des nappes et le routage dans le réseau hydrographique. C'est un modèle distribué, qui s'appuie sur un maillage élémentaire irrégulier en unités de réponse hydrologique (Hydrological Response Units, ou HRU), obtenues par croisement de couches d'informations géographiques décrivant le relief, la géologie, la pédologie et l'occupation des sols. Le réseau hydrographique est aussi découpé en tronçons permettant le calcul des débits sur chaque tronçon et son routage jusqu'à l'exutoire. J2000 garde trace de la décomposition du débit (ruissellement, débit de subsurface, débit de base) en tout point du réseau hydrographique et à chaque pas de temps, un point favorable au couplage avec le modèle T-NET (température dans la nappe vs température de surface).

Un modèle spécifique au bassin du Rhône, J2000-Rhône, est déployé depuis 2013 (Branger et al., 2016 ; 2018). Un important travail de diagnostic et d'amélioration de la partie souterraine du modèle (classification de la lithologie et paramétrisation) a été réalisé (projet MDR-Eaux Souterraines, financé par l'AE RMC ; Branger et al., 2020) et devrait permettre une meilleure représentation de la contribution souterraine aux écoulements, notamment sur le bassin de la Saône. Le couplage avec la modélisation de la température permettra ainsi de tester si la représentation du compartiment souterrain est suffisante (en termes de discréétisation spatiale, types de lithologie, paramétrisation ou même structure du modèle) pour représenter correctement les contrastes de température liés aux échanges nappes-rivières sur les différentes lithologies.



Modèle J2000 et processus principaux représentés pour chaque HRU (Hydrological Response Unit), Horner, 2020

Modèle T-NET : Le modèle T-NET est un modèle physique, basé sur le concept de température d'équilibre, qui résout le bilan énergétique de façon lagrangienne sur un réseau topologique, issu de la BD Carthage. Il simule au pas de temps horaire la température de l'eau par tronçon en fonction des forçages météorologiques (usuellement SAFRAN), des débits journaliers et de nappe simulés par un modèle semi-distribué ; il tient compte pour cela des caractéristiques géométriques du réseau hydrographique estimés par des lois géomorphologiques (Morel, et al, 2019). La première application de ce modèle a été réalisé avec le modèle hydrologique semi-distribué EROS du BRGM dans le bassin de la Loire (100 000 km²) et a permis de montrer d'assez bon résultats (RMSE moyen de 1.6°C sur 128 stations) (Beaufort et al, 2016). Cependant, le couplage au modèle J2000 pourrait améliorer ces performances compte tenu des variables supplémentaires existantes dans J2000.



Structure du modèle T-NET et variables d'entrée (d'après Beaufort et al, 2016, Loicq et al, 2018).

Cette partie ne produit pas de livrables particuliers. Il s'agit d'un travail technique de couplage de ces deux modèles, développés auparavant dans des langages informatiques différents.

3) Confrontation des simulations à des données observées et développement d'une méthode de correction de biais.

La confrontation des simulations sera faite par rapport aux observations traitées à l'étape 1. Par ailleurs, l'UMR 5600 (collaboration H. Piegay et B. Marteau) dispose de plusieurs profils longitudinaux de température de l'eau en surface mesurées avec une caméra infrarouge par survol en ULM lors des étages récents sur les cours d'eau du bassin et qui pourront être utilisées dans ce cadre (Marteau et al, 2020).

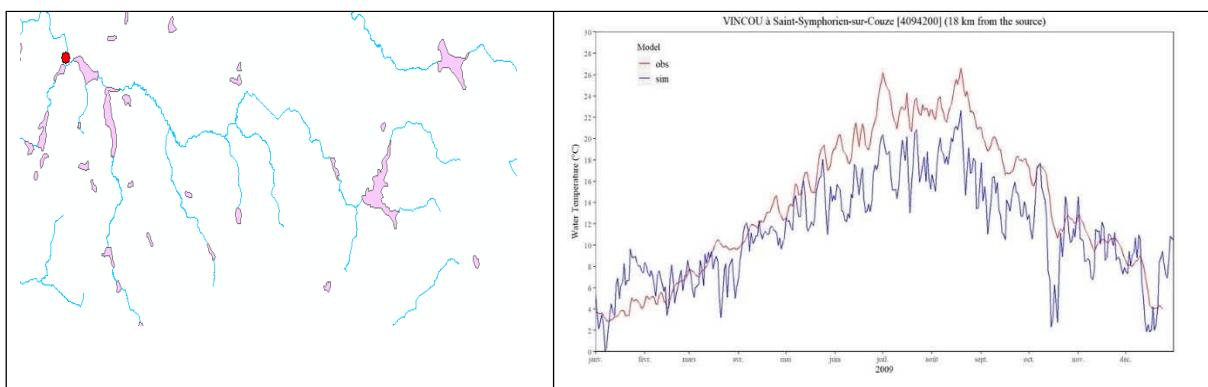
Les travaux publiés pour le bassin de la Loire (Beaufort et al, 2016, Loicq et al, 2018), ont montré des biais systématiques qui peuvent dépendre de la présence des hétérogénéités morphologiques non prises en compte dans le modèle (seuils, étangs) qui peuvent conduire à un réchauffement supplémentaire des cours d'eau (Seyedhasemi et al, 2020). De plus, la caractérisation de l'influence des échanges nappe-rivière pose parfois problème du fait d'une faible connaissance des températures et débits des nappes. Une méthode nouvelle de correction des biais sera développée., qui devra tenir compte de l'avalaison (soit par caractérisation de l'ensemble du bassin amont, soit en raisonnant au tronçon), de la structure locale du paysage (seuils, retenues, végétation) en tant que susceptible d'influence locale, du passé récent susceptible d'influence thermique (possiblement jusqu'à 1 an), et des valeurs modélisées et observées entre lesquelles le biais est constaté. On utilisera pour cela un réseau neuronal de complexité aussi modérée que possible. Au-delà de son usage comme correcteur de biais empirique, l'intérêt d'un tel régresseur non-linéaire est de rechercher la composante systématique des erreurs même en présence d'interactions entre variables explicatives ; ces interactions seront explicitées par une analyse de sensibilité du réseau calé. Cela nous permettra de réaliser un diagnostic du modèle couplé en identifiant les facteurs clef à l'origine des biais observés, dans la continuité du travail sur les diagnostics de modèles hydrologiques déjà développé à RiverLy (Fuamba et al., 2019, Horner., 2020).

Livrables :

- Analyse et cartographie des écarts entre observations et modélisations sur la période récente ou l'on dispose des données observées : suivant les années hydrologiques et climatiques, des bassins type, ...
- Exploitation des résultats des modèles : Cartographie des métriques hydrologiques et thermiques sur des années contrastées, sur des zones à identifiées ; Le choix des secteurs/métriques/chroniques à valoriser sera réalisée en fonction des besoins des gestionnaires associés au projet

4) Simulation des débits et des températures sur la période passée (1960-2021)

Les forçages climatiques SAFRAN sont disponibles à partir des années 1960 et pourront constituer des données d'entrée des deux modèles. L'analyse de ces simulations, notamment pour la température de l'eau ou l'on ne dispose pas de chroniques à longue terme, permettra d'analyser de façon comparée le réchauffement de l'eau par rapport au réchauffement de la température de l'air et à l'évolution des débits. Ainsi, notamment dans les zones karstiques, le pouvoir tampon de ces circulations pourrait être étudié. Par ailleurs, une chronique d'environ 30 ans est disponible sur la Saône aval (données EDF) et pourra être confronté aux simulations réalisées. Aussi, pour des bassins qui disposent des retenues d'eau connectées au réseau hydrographique, les simulations réalisées, comparées aux observations apporteront des résultats sur l'influence de ces retenues sur le réchauffement supplémentaire de ces ouvrages. Un exemple est donné ci-après sur l'influence cumulée de ces ouvrages dans le bassin de la Vienne, qui réchauffent en moyenne de plus de 2°C en moyenne estivale et augmentent la durée avec des températures de plus de 15°C de 20 à 30 jours dans l'année (Seyedhasemi H, thèse en cours).



La simulation permet de montrer l'évolution de la température naturelle dans l'hypothèse où les retenues sont absentes du paysage (tiré de la thèse de H. Seyedhasemi, en cours)

Livrables :

- Analyse des tendances sur les débits et la température des cours d'eau depuis 1960 et leurs facteurs explicatifs : importance des tendances, périodes de basculement, années atypiques, ... ; Ces simulations permettront d'étudier les glissements typologiques en lien avec l'évolution de la température de l'eau (action qui pourrait être prévue en parallèle si d'autres chercheurs sont intéressés)
- Analyse des phénomènes extrêmes (concomitance canicules et étiages, soutien d'étiage différent ...) ; Maille spatiale à caler en fonction des besoins

5) Simulation des débits et de températures sous scénarios climatiques sur l'ensemble du XXIe siècle

Cette phase sera réalisée en lien étroit avec le projet national Explore2, qui vise à remettre à jour les éléments sur l'impact du changement climatique sur l'hydrologie en France. Le projet devrait commencer mi-2021 pour 2 ans. Notamment, les forçages climatiques (pluie, température, évapotranspiration) développés dans Explore2 seront repris. Le modèle couplé hydrologique/thermique sur la Saône ayant une résolution beaucoup plus détaillée que les sorties hydrologiques prévues dans Explore2, les simulations seront réalisées sur un plus grand nombre de points, pour l'hydrologie et la thermie (non étudiée dans le projet Explore2). Ainsi l'évolution de la disponibilité de la ressource en eau sur l'ensemble du XXIe siècle pour différents scénarios d'émission de gaz à effet de serre (RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5), dans un contexte de changement climatique sera analysée sur le bassin de la Saône. Aussi, l'influence de ces scénarios sur la température de l'eau, sera analysée, plus particulièrement en période printanière et estivale, avec un focus sur la concomitance des périodes d'étiage et de canicules. Ces scénarios climatiques seront associés à des scénarios de gestion, notamment concernant la gestion des plans d'eau et des ripisylves.

Livrables :

- Evolution des débits et des températures sous scénarios climatiques au XXIème siècle. Comparaison des écarts sur des secteurs particuliers ;

- **Scénarios sur mode de gestion de plans d'eau**
- **Simulation des corridors rivulaires de densité et longueur différente.**

DUREE DU PROJET: 4 ans à partir de décembre 2021

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES (en gras les références de l'équipe)

Bibliographie

- Arevalo, E., Lassalle, G., Tétard, S., Maire, A., Sauquet, E., Lambert, P., ... & Drouineau, H. (2020). An innovative bivariate approach to detect joint temporal trends in environmental conditions: Application to large French rivers and diadromous fish. *Science of The Total Environment*, 141260.
- Arora, R., Tockner, K., & Venohr, M. (2016). Changing river temperatures in northern Germany: trends and drivers of change. *Hydrological Processes*, 30(17), 3084-3096.
- Beaufort, A., Curie, F., Moatar, F., Ducharme, A., Melin, E., & Thiery, D. (2016). T-NET, a dynamic model for simulating daily stream temperature at the regional scale based on a network topology. *Hydrological Processes*, 30(13), 2196-2210.**
- Beaufort A, F. Moatar, E. Sauquet, 2020. Thermie en rivière : Analyse géostatistique et description de régime : Application à l'échelle de la France, INRAE UR RiverLy, Université de Tours GéHCO, 63 pages + 53 pages d'annexes**
- Branger, F., Gouttevin, I., Tilmant, F., Cipriani, T., Barachet, C., Montginoul, M., Le Gros, C., Sauquet, E., Braud, I., Leblois, E., 2016. Modélisation hydrologique distribuée du Rhône, Rapport final, 110 pp.
- Branger, F.; Gouttevin, I.; Tilmant, F.; Cipriani, T.; Barachet, C.; Montginoul, M.; Le Gros, C.; Sauquet, E.; Braud, I. & Leblois, E. (2018), 'Un modèle hydrologique distribué pour étudier l'impact du changement global sur la ressource en eau dans le bassin versant du Rhône"3ème conférence internationale IS Rivers, 4-8 juin 2018, Lyon, France'.
- Branger, F., Horner, I., Marçais, J., Caballero, Y., and Braud, I.: Diagnostic of a regional distributed hydrological model through hydrological signatures, EGU General Assembly 2020, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-7416, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-7416>, 2020
- Fuamba, M.; Branger, F.; Braud, I.; Batchabani, E.; Sanzana, P.; Sarrazin, B. & Jankowfsky, S. (2019), 'Value of distributed water level and soil moisture data in the evaluation of a distributed hydrological model: Application to the PUMMA model in the Mercier catchment (6.6 km²) in France', *Journal of Hydrology* 569, 753-770.
- Horner, I., 2020. Design and evaluation of hydrological signatures for the diagnostic and improvement of a process-based distributed hydrological model, *thèse de l'Université de Grenoble-Alpes*
- Horner, I., Branger, F., Vannier, O., Braud, I., Lauvernet, C. *Evaluation and value of hydrological signatures for the diagnosis and improvement of a process-based distributed model using a sensitivity analysis, in preparation for submission to Water Resources Research*.
- Krause, P.; Bäse, F.; Bende-Michl, U.; Fink, M.; Flügel, W. & Pfenning, B. (2006), 'Multiscale investigations in a mesoscale catchment - hydrological modelling in the Gera catchment', *Advances in Geosciences* 9, 53-61.
- Loicq, P., Moatar, F., Jullian, Y., Dugdale, S. J., & Hannah, D. M. (2018). Improving representation of riparian vegetation shading in a regional stream temperature model using LiDAR data. *Science of the total environment*, 624, 480-490.**
- Logez, M., Bady, P. and Pont, D.: Modelling the habitat requirement of riverine fish species at the European scale: sensitivity to temperature and precipitation and associated uncertainty: Modelling the habitat requirements of fish species at the European scale, *Ecology of Freshwater Fish*, 21(2), 266–282, doi:10.1111/j.1600-0633.2011.00545.x, 2012.
- Marteau Baptiste, Hervé Piégay, André Chandesris, Flavie Cernesson, Kristell Michel, Jérémie Piffady, Lise Vaudor. 2020. Effets de la ripisylve sur l'échauffement thermique des cours d'eau : de l'évaluation par télédétection à l'extrapolation à l'échelle régionale (plaine de la Bresse), Convention Cadre AERMC-ZABR, 70 pp.
- Michel, A., Brauchli, T., Lehning, M., Schaeffli, B., & Huwald, H. (2020). Stream temperature and discharge evolution in Switzerland over the last 50 years: annual and seasonal behaviour. *Hydrology and earth system sciences*, 24(1), 115-142.
- Minaudo, C., Curie, F., Jullian, Y., Gassama, N., & Moatar, F. (2018). QUAL-NET, a high temporal-resolution eutrophication model for large hydrographic networks. *Biogeosciences*, 15(7).**
- Moatar, F., & Gailhard, J. (2006). Water temperature behaviour in the River Loire since 1976 and 1881. *Comptes Rendus Geoscience*, 338(5), 319-328.**
- Morel, M., Tamisier, V., Pella, H., Booker, D. J., Navratil, O., Piégay, H., ... & Lamouroux, N. (2019). Revisiting the drivers of at-a-station hydraulic geometry in stream reaches. *Geomorphology*, 328, 44-56.**
- Niemeyer, R. J., Cheng, Y., Mao, Y., Yearsley, J. R. & Nijssen, B. (2018). A Thermally Stratified Reservoir Module for Large-Scale Distributed Stream Temperature Models With Application in the Tennessee River Basin, *Water Resour. Res.*, 54(10), <https://doi.org/10.1029/2018WR022615>

- Ouellet, V., St-Hilaire, A., Dugdale, S. J., Hannah, D. M., Krause, S., & Proulx-Ouellet, S. (2020). River temperature research and practice: Recent challenges and emerging opportunities for managing thermal habitat conditions in stream ecosystems. *Science of The Total Environment*, 139679.
- Seyedhashemi, H., Moatar, F., Vidal, J. P., Diamond, J. S., Beaufort, A., Chandesris, A., & Valette, L. (2021). Thermal signatures identify the influence of dams and ponds on stream temperature at the regional scale. *Science of The Total Environment*, 142667.**
- Seyedhashemi, H., Vidal, J.-P., Diamond, J. S., Thiéry, D., Monteil, C., Hendrickx, F., Maire, A., and Moatar, F.: Regional, multi-decadal analysis reveals that stream temperature increases faster than air temperature, *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss. [preprint]*, <https://doi.org/10.5194/hess-2021-450>, in review, 2021.**
- van Vliet, M. T. H., Yearsley, J. R., Franssen, W. H. P., Ludwig, F., Haddeland, I., Lettenmaier, D. P., and Kabat, P. (2012). Coupled daily streamflow and water temperature modelling in large river basins, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, 4303–4321, <https://doi.org/10.5194/hess-16-4303-2012>.