

**CONNAITRE ET RESTAURER LES RÔLES DE DIFFUSION DES
 POCHEs DE BIODIVERSITÉ AU SEIN DE LA TRAME TURQUOISE
 SUR L'ENSEMBLE DU BASSIN VERSANT DE LA BIENNE**

*Approche multi-spécifique et prise en compte des besoins en habitats
 thermiques en lien avec le changement climatique*

Rapport final 4

**VOLET CARTOGRAPHIE THERMIQUE DE LA
 BIENNE PAR IRT-a ET CONDITIONS D'HABITATS
 THERMIQUES POUR LES SALMONIDES**



Référence à citer :

Caudron A., Marteau B., Dugdale S. 2024. Connaitre et restaurer les rôles de diffusion des poches de biodiversité au sein de la trame turquoise sur l'ensemble du bassin de la Bienne – Rapport final 4 Volet
Cartographie thermique de la Bienne par IRT-a et conditions d'habitats thermiques pour les salmonidés. PNR Haut Jura, 75 pages.

SOMMAIRE

1.	Préambule commun aux cinq rapports.....	4
1.1	Présentation générale du bassin versant de la Bienne.....	4
1.2	Un bassin à fort potentiel de résilience.....	6
1.3	Objectifs globaux du projet.....	10
1.4	Une démarche méthodologique en 4 volets.....	11
2.	Méthodologie du volet cartographie thermiques par IRT-a.....	12
2.1	Description de la campagne d'acquisition.....	13
2.2	Conditions climatique et hydrologique.....	14
3.	Résultats du volet cartographie thermique par IRT-a.....	16
3.1	Diversité thermique de la rivière en période estivale.....	16
3.2	Profil longitudinal de température.....	17
3.3	Détection des anomalies thermiques chaudes.....	18
3.3.1	Caractéristiques et distribution sur le linéaire.....	18
3.3.2	Cartographies thermiques détaillées.....	21
3.4	Détection des poches froides.....	32
3.4.1	Caractéristiques et distribution sur le linéaire.....	32
3.4.2	Les apports majeurs d'eau froide.....	37
3.4.3	Cartographies thermiques détaillées des apports d'eau froide.....	40
3.5	Interprétation hydrogéologique et hydromorphologique des poches froides.....	49
3.6	Variations spatio-temporelles des habitats thermiques vis à vis des salmonidés.....	50
3.7	Quelques données estivales sur les affluents.....	55
3.8	Refuges thermiques et refuges climatiques potentiels pour les salmonidés.....	57
3.8.1	Sur la Bienne.....	57
3.8.2	Sur les affluents.....	63
4.	Synthèse des principaux résultats et enjeux.....	67
5.	Propositions d'actions.....	68
5.1	Action de conservation pour maintenir l'état actuel.....	68
5.2	Actions de restauration pour améliorer l'état actuel.....	68
5.2.1	Réduire les réchauffements liés aux barrages et retenues.....	69
5.2.2	Réduire les effets de chaleur liés à l'artificialisation urbaine.....	69
5.2.3	Restituer les ressources d'eau froide majeures au milieu naturel.....	69
5.2.4	Optimiser l'attrait des refuges thermiques existants.....	69
5.2.5	Décloisonner les accès aux refuges thermiques et climatiques pour les salmonidés.....	70
5.2.6	Restaurer les processus hydro-morphologiques.....	70
5.2.7	Replanter une ripisylve efficace pour limiter l'ensoleillement direct.....	71
5.2.8	Création de refuges thermiques artificiels.....	71
5.3	Actions d'amélioration des connaissances.....	74
6.	Références citées.....	75

1. PRÉAMBULE COMMUN AUX CINQ RAPPORTS

Le projet sur le rôle de diffusion des poches de biodiversité sur la Bienne a été mené entre 2021 et 2024. Il a généré une quantité importante de nouvelles données et informations qui sont destinées à être prises en compte dans les futures actions de conservation et de restauration mises en œuvre pour améliorer la résilience de la biodiversité sur le bassin de la Bienne.

Afin d'améliorer la compréhension et la diffusion des résultats obtenus, la totalité du travail réalisé dans ce projet a été séparée en 5 rapports thématiques correspondants aux différents volets d'étude, à savoir :

- Rapport 1 : rapport final du volet « biodiversité ichtyologique »
- Rapport 2 : rapport final du volet « biodiversité invertébrés aquatiques »
- Rapport 3 : rapport final du volet « biodiversité avifaune »
- Rapport 4 : rapport final du volet « cartographie thermique et caractérisation des habitats thermiques de la Bienne »
- Rapport 5 : Synthèse, priorisation et propositions d'actions

Un préambule présentant le contexte et la démarche méthodologique du projet dans sa globalité est repris dans chaque rapport.

1.1 Présentation générale du bassin versant de la Bienne

Le bassin versant de la Bienne d'une surface de 730 km² présente un réseau hydrographique de 422 km de cours d'eau, dont environ 72 km pour le cours principal de la Bienne et 350 km pour les affluents. En complément de ce réseau de surface, le bassin se caractérise par une hydrologie souterraine soutenue en lien avec le réseau karstique du massif jurassien.

La Bienne prend sa source à 1100 m d'altitude sur la commune de Prémanon et conflue avec l'Ain au niveau du lac artificiel de Coiselet. En plus de la Bienne, on note 9 autres cours d'eau importants qui sont de l'amont vers l'aval : l'Evalude, le Pissevielle, le système Tacon-Grosdar-Flumen, le Lizon, le Longvirv, l'Heria et le Merdanson (figure 1).

La Bienne ainsi que ces principaux affluents sont soumises à des pressions diverses qui impactent localement leur qualité. On peut noter, en premier lieu, les impacts en lien avec l'essor historique des activités industrielles (tournage sur bois, et surtout lunetterie) qui a bénéficié de l'utilisation de la force hydraulique. Ces activités ont engendré d'importantes modifications morphologiques des rivières (création de barrages, endiguement des berges et artificialisation des abords, dérivation des eaux), des pollutions d'origine industrielle (métaux et résidus divers, hydrocarbures) et des altérations de la qualité physico-chimique de l'eau liées au développement démographique (assainissement). L'activité agricole affiliée à la production laitière et fromagère implantée sur les plateaux du bassin versant représente également une source de pollution non négligeable.

Au cours de ces 15 dernières années, plusieurs démarches territoriales entreprises par les acteurs de l'eau ont permis d'accentuer les efforts de restauration de la qualité des eaux et des habitats sur le bassin. Le dernier diagnostic du SDAGE (2016-2021) fait état, sur les 41 masses d'eau du bassin, d'une situation écologique globalement bonne à moyenne et d'une situation chimique bonne sur l'ensemble des cours d'eau (figure 2).

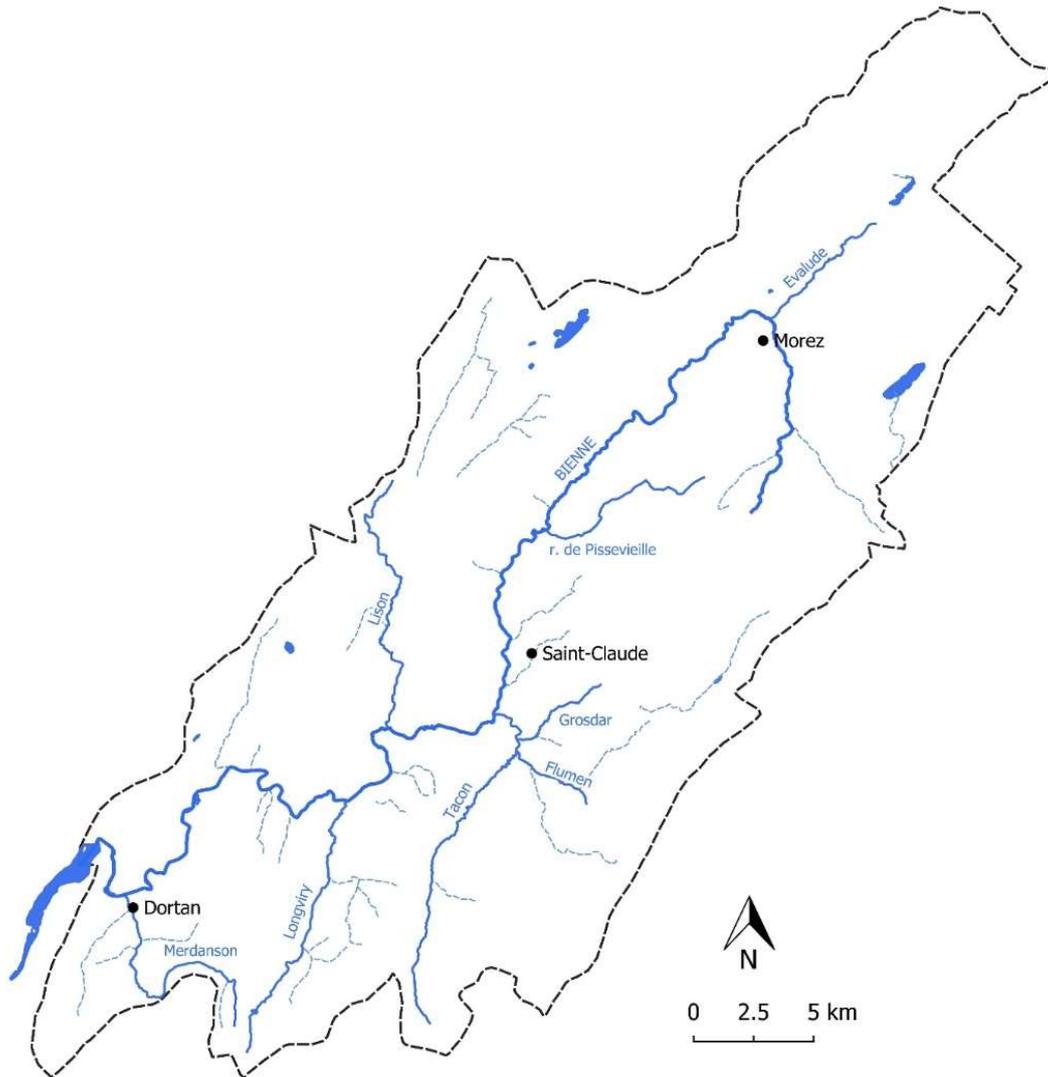


Figure 1 : Carte du réseau hydrographique principal du bassin de la Bienne.

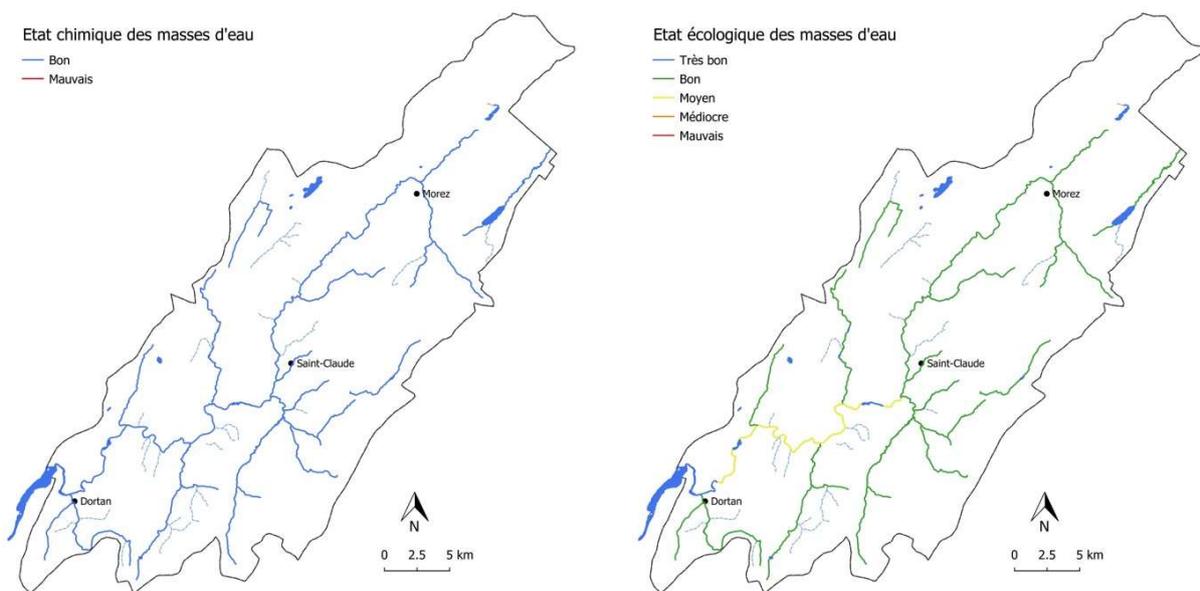


Figure 2 : Cartes des états chimique et écologique des masses d'eau du bassin de la Bienne.

Les principales sources de dégradations relevées aujourd'hui concernent les pollutions sédimentaires par les métaux lourds et les HAP liées au passé industriel du bassin, ainsi que des altérations morphologiques et hydrologiques.

La carte des ouvrages transversaux recensés sur le bassin illustre les modifications morphologiques qu'ont subi les cours d'eau du bassin avec plus de 93 ouvrages artificiels (figure 3).

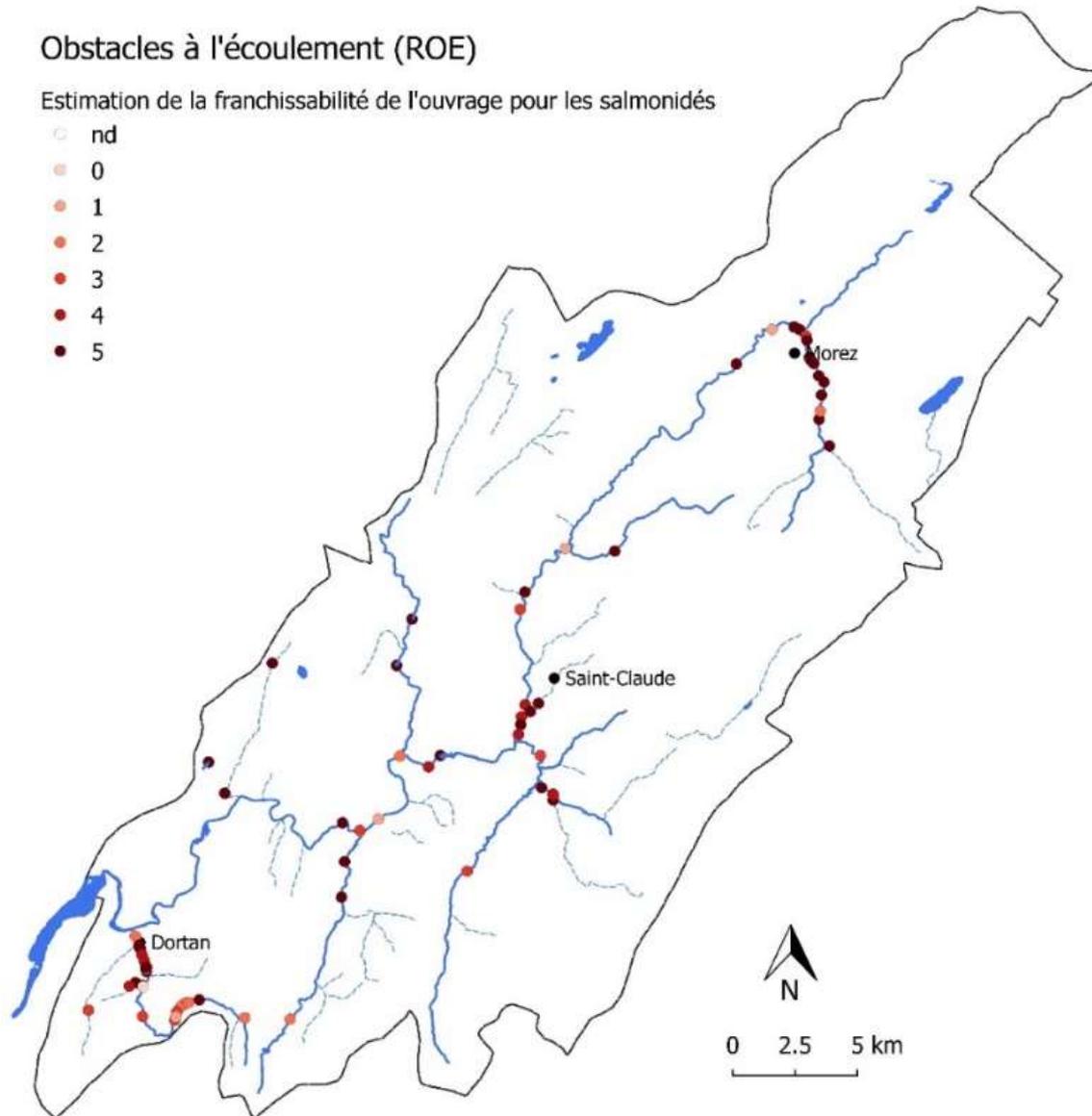


Figure 3 : Carte des ouvrages recensés dans le ROE et note de franchissabilité pour la truite (de 0=franchissable à 5=totalement infranchissable (source OFB/PNRHJ)).

1.2 Un bassin à fort potentiel de résilience

Le projet repose sur le constat que le bassin de la Bienne présente encore plusieurs atouts qui lui permettent d'avoir un fort potentiel de résilience et de restauration :

- A l'échelle du bassin, l'emprise anthropique reste encore limitée (figure 4) : l'occupation du sol est dominée à 75% par les forêts et les milieux semi-naturels, les terres agricoles représentent

environ 18% et sont essentiellement localisées sur les plateaux, et enfin les zones urbanisées sont très minoritaires avec moins de 3% du bassin ;

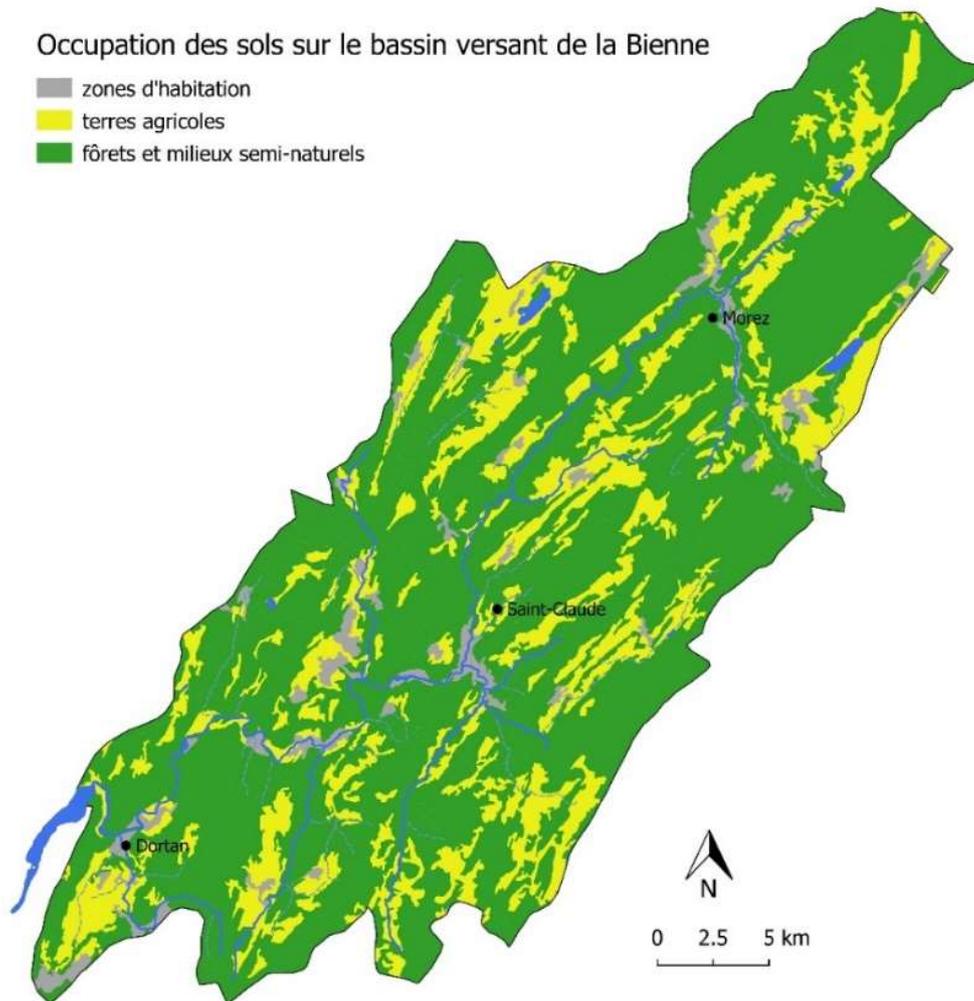


Figure 4 : Carte des occupations du sol par grandes catégories sur le bassin de la Bienne.

- La principale cause qui a légitimé à une époque les modifications morphologiques des rivières, à savoir l'utilisation de la force hydraulique à des fins industrielles, a aujourd'hui disparue ouvrant la voie à une possible restauration des milieux ;
- Les cours d'eau sur ce territoire présentent des capacités de résilience importantes en lien avec leurs caractéristiques géochimiques et hydrologiques qui en font des milieux très biogènes et présentant des dynamiques de restauration rapides ;
- Un acteur GEMAPI unique sur le bassin, le PNR du Haut-Jura qui développe une politique ambitieuse de restauration des habitats pour améliorer la fonctionnalité des milieux ;
- Une diversité de milieux et d'habitats aquatiques importante, source d'une riche diversité biologique et des zones encore préservées sur différentes parties du bassin qui peuvent servir de puits de biodiversité pour accélérer la recolonisation des secteurs restaurés ;
- A l'échelle du bassin et de l'ensemble du réseau hydrographique, les inventaires disponibles font ressortir l'existence d'un patrimoine naturel important avec de forts enjeux de préservation et de restauration de la biodiversité.

Tout d'abord, les ZNIEFFs qui identifient les secteurs d'intérêt écologique abritant une biodiversité patrimoniale sont très présents sur le bassin. **Environ 500 km² du territoire soit 68% de la**

surface du bassin sont inventoriés en ZNIEFF dont 240 km² en type 1 et 320 km² en type 2 (figure 5).

Il est important de noter qu'une grande partie des cours d'eau sont inclus dans les ZNIEFFs dont notamment la Bienne au niveau de ses sources, puis sur un long linéaire entre Morez et la confluence avec le Tacon, ainsi que plusieurs affluents (figure 5). Il en est de même de la répartition des zones NATURA 2000 et en particulier des Zones Spéciales de Conservation à forts enjeux au niveau européen (figure 6).

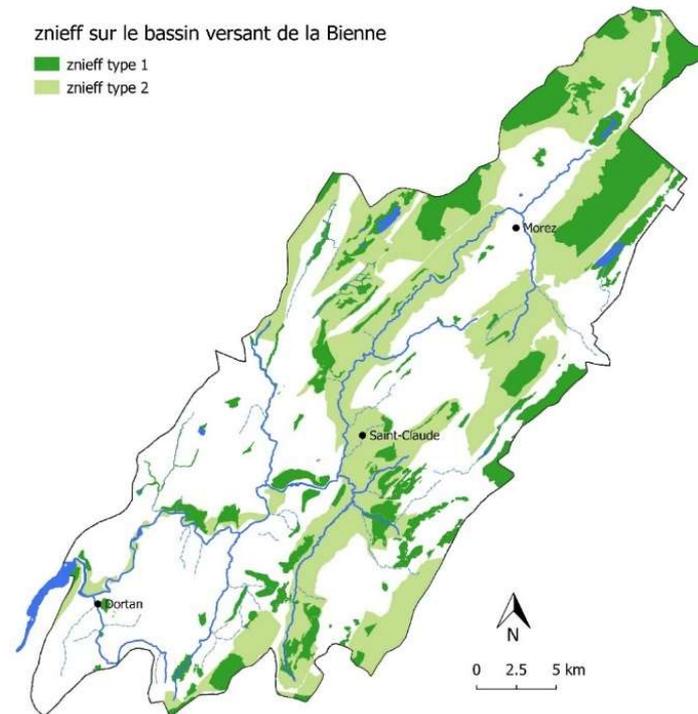


Figure 5 : Cartographies des ZNIEFF (type 1 et 2) sur le bassin de la Bienne (source INPN).

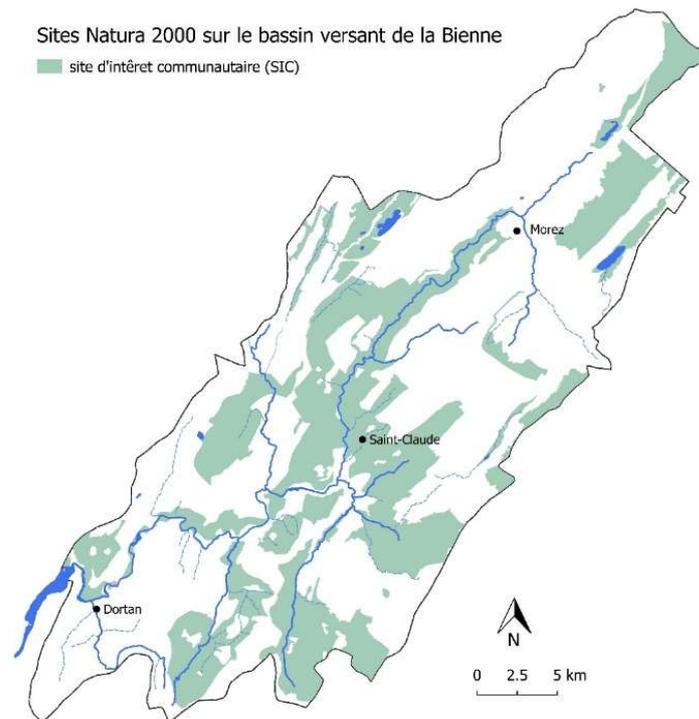


Figure 6 : Cartographies des Sites d'Importance Communautaire (SIC) inscrite au réseau NATURA 2000 (Zones Spéciales de Conservation) sur le bassin de la Bienne.

En ce qui concerne les réseaux écologiques (réservoirs biologiques et corridors), le bassin de la Bienne montre un potentiel important en termes de flux de biodiversité grâce à la présence de réservoirs de biodiversité conséquents et d'une diversité de milieux, ouverts, boisés, aquatiques pouvant servir de corridors (figure 7). En particulier, sur le bassin, la majorité des cours d'eau et de leurs abords a été identifiée comme trame bleue représentant donc un enjeu essentiel pour la restauration de la biodiversité aquatique. De même, une surface importante du bassin versant a été identifiée comme trame verte dont une grande partie jouxte les cours d'eau classés en réservoirs biologiques (figure 7).

Trame verte et bleue sur le bassin versant de la Bienne

Schéma régional de cohérence écologique (SRCE)

 cours d'eau et leur espace de mobilité

 réservoir de biodiversité

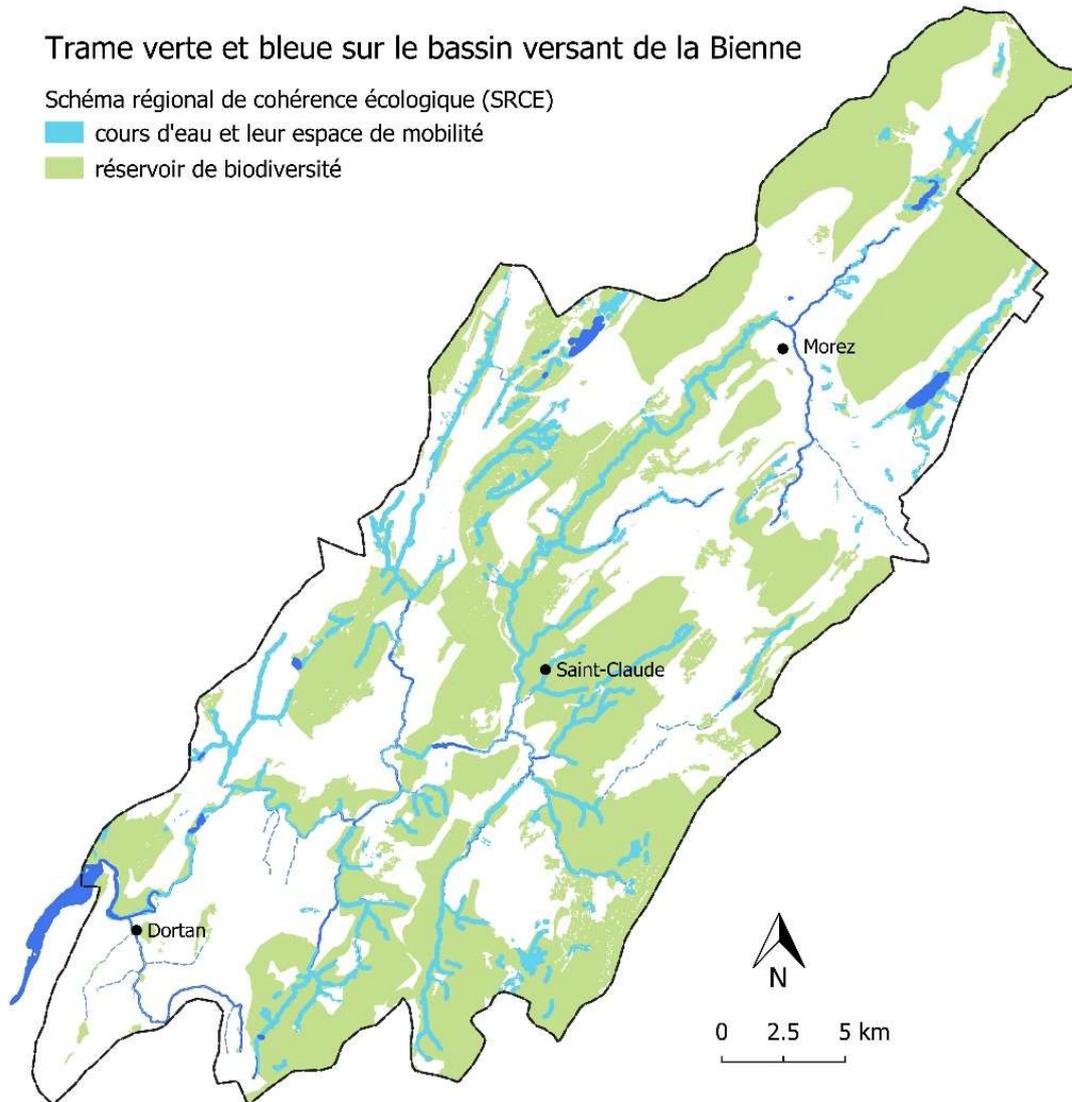


Figure 7 : Carte de la trame verte et bleue sur le bassin de la Bienne regroupant les réservoirs de biodiversité superficiels et des cours d'eau inscrits au SRCE.

Ce fort potentiel de restauration fait du bassin de la Bienne un territoire à enjeux où la résilience des processus assurant la fonctionnalité des milieux aquatiques est encore possible afin d'avoir un impact positif sur la biodiversité associée.

1.3 Objectifs globaux du projet

Le projet a pour but de favoriser la résilience de la biodiversité sur le bassin de la Bienne par une approche originale de restauration des habitats en priorisant les actions qui favorisent le rôle de diffusion des poches de biodiversité existantes (notion de puit de biodiversité).

L'objectif final du projet est de définir un plan d'actions opérationnelles pour assurer une meilleure circulation biologique au sein de la trame bleue et de la trame turquoise à partir des poches (ou « hotspots ») de biodiversité encore présentes sur le bassin de la Bienne.

Le travail réalisé a consisté à répondre aux différents objectifs suivants :

- Localiser sur l'ensemble du réseau hydrographique les poches de biodiversité présentant à la fois une forte richesse biologique et une bonne fonctionnalité écologique à partir d'espèces cibles de poissons, d'invertébrés aquatiques et d'oiseaux inféodés à la trame verte et bleue ;
- Identifier les points noirs ou points de blocage qui limitent la diffusion des individus et des espèces depuis ces poches de biodiversité vers les autres zones du bassin et notamment les milieux restaurés ou en cours de restauration (rupture de continuité, lacunes en corridors écologiques, qualité d'habitat insuffisante ou absence d'habitat favorable, artificialisation des berges, barrages structurants,...) ;
- Prendre en compte les besoins de continuité écologique au sein des différents habitats thermiques disponibles en lien avec le réchauffement climatique en caractérisant la distribution spatiale des refuges thermiques essentiels à la survie des individus et en identifiant les points de blocages qui limitent l'accès à ces refuges ;
- Proposer un plan d'actions pour lever les points de blocage identifiés et ainsi accroître la résilience des espèces cibles en augmentant les flux de biodiversité sur l'ensemble du territoire.

1.4 Une démarche méthodologique en 4 volets

Pour atteindre ces objectifs, nous avons développé une **approche multi-spécifique** ciblée sur trois compartiments biologiques représentant chacun un volet d'étude :

- **Les poissons** en s'intéressant à la truite commune qui représente les besoins des salmonidés ;
- **Les invertébrés aquatiques** avec une approche quantitative de la biodiversité présente et qualitative sur les espèces patrimoniales de plécoptères, éphémères et trichoptères ;
- **L'avifaune** avec deux espèces cibles concernées par les deux trames vertes et bleues : le cingle plongeur et le martin pêcheur.

L'échelle géographique du projet est l'ensemble du réseau hydrographique du bassin versant de la Bienne, afin d'assurer une cohérence du point de vue des trames écologiques et du fonctionnement des poches de biodiversité en lien avec les espèces cibles.

Un 4^{ème} volet a consisté à réalisation d'une cartographie thermique de la Bienne en utilisant la technologie de l'infra-rouge thermique aéroporté (IRT-a) afin de décrire les **habitats thermiques** favorables pour les salmonidés et d'inventorier les refuges thermiques.

La combinaison des méthodes mises en place doit permettre de relever les différences de répartition de cette biodiversité au sein du bassin aussi bien au niveau de la richesse spécifique que des abondances.

Notre démarche méthodologique s'est appuyée en premier lieu sur les données existantes en termes d'inventaires patrimoniaux et d'abondances pour mettre en œuvre les collectes de données complémentaires et nécessaires aux objectifs de ce projet.

2. MÉTHODOLOGIE DU VOLET CARTOGRAPHIE THERMIQUES PAR IRT-A

La cartographie thermique des rivières par télédétection aéroportée repose sur l'utilisation de capteurs dits « infrarouges thermiques » capables de mesurer les radiations émises dans le spectre de longueur d'ondes 7,5-14 μm . Ce spectre représente le rayonnement émis par tout objet dont la température est supérieure à 0°K (Vollmer and Möllmann, 2018). En utilisant certaines lois de physique thermodynamique, la quantité de rayonnement reçue par les micro-capteurs de la caméra thermique peut être convertie en des valeurs de température « radiante », c'est-à-dire émise par l'objet étudié. En installant la caméra thermique sur un hélicoptère ou un ULM, il est alors possible d'imager le linéaire du cours d'eau en rafale (une image toutes les 1 à 2 s), puis de « mosaïquer » ces images pour obtenir une carte des températures de surface de la rivière.

Les propriétés physiques de l'eau, ainsi que les propriétés de la masse d'air qui sépare l'objet d'étude (la rivière) du capteur, peuvent générer des écarts entre la température radiante imagée et la température réelle de la masse d'eau. Afin de valider et/ou corriger d'éventuels écarts, une série de thermographes est installée en rivière le temps du vol afin de comparer la température radiante à des mesures de température réelle. Ces sondes sont attachées à des bouées, afin de mesurer la température à la surface, et amarrées au fond de l'eau pour éviter leur dérive. La relation entre ces deux mesures permet alors (1) d'évaluer la fiabilité des cartes de température, et (2) de corriger, le cas échéant, la mosaïque thermique.

En plus d'une caméra thermique, un appareil photo « classique », c'est-à-dire photographiant dans le domaine du visible, est également embarqué afin de réaliser une orthophoto haute-résolution de la zone d'étude. L'orthophoto permet de valider les observations faites sur la mosaïque thermique, évitant ainsi les mauvaises interprétations de zones froides ou chaudes pouvant s'apparenter à des structures alluviales particulières, mais qui peuvent s'avérer être des artefacts ponctuels (ex. banc de galet à l'ombre, kayaks, embâcles).

L'orthophoto ainsi réalisée permet également de définir le chenal en eau de la rivière afin d'en extraire uniquement les pixels « en eau » de la mosaïque thermique correspondante. La détermination du chenal en eau a été réalisée par classification d'image avec l'outil Orfeo ToolBox¹ 8.1.0. L'orthophoto a également servi à définir une « ligne centrale » le long de laquelle l'ensemble des observations ont été projetées, afin d'utiliser un seul et unique référentiel linéaire commun à toutes les analyses.

La température médiane, extraite tous les 100 m au sein d'une zone tampon de 2,4 m autour de cette ligne centrale, a été utilisée pour construire le profil longitudinal de température. A partir de ce profil, une carte de température médiane locale a été générée par interpolation spatiale (outil d'interpolation *B-spline*). La comparaison de la mosaïque thermique avec cette carte nouvellement établie de la température médiane locale permet de ressortir des poches d'eau plus froide que la masse d'eau générale. Le seuil de température en-deçà duquel une poche d'eau est considérée comme significativement plus froide que l'eau de la rivière a été calculé à 0,50°C. Ce seuil est construit sur une approche de seuil de détection limite qui intègre l'ensemble des incertitudes liées à la méthode (erreurs intrinsèques de la caméra, calibration empirique, etc., Marteau et al., 2022). Enfin, un seuil de taille a été choisi pour éliminer les structures pouvant être générées lors de la création de la mosaïque thermique : pour être comptabilisée, une poche froide doit donc être constituée d'au moins 4 pixels adjacents, c'est-à-dire avoir une taille visible à la surface d'au moins 0,64 m².

¹ <https://www.orfeo-toolbox.org/>

2.1 Description de la campagne d'acquisition

La campagne d'acquisition IRT-a a été réalisée en ULM le 21 juillet 2022, entre 17h44 et 19h05 sur les 63 km de la Bienne, du lac de Coiselet à la confluence Biennette/Bief de Challe. Les images thermiques ont été acquises à l'aide d'une caméra VarioCAM HR Research 600 (résolution 480 x 640 pix, focale = 30 mm), et les photographies ont été prises à l'aide d'un Nikon D7000 (résolution 4928 x 3264 pix, objectif = 35 mm). Les vols ont été réalisés à une altitude de 550 m et à une vitesse moyenne de 25 m·s⁻¹.



Figure 8 : Stabilisateur embarquant les capteurs optique et thermique installés sur le côté de l'ULM. (Crédit : S. Blanchon – Jura ULM©).

Le matin du vol, 14 thermographes (HOBO® Water Temp Pro v2, précision de $\pm 0,2^\circ\text{C}$, résolution de $0,02^\circ\text{C}$) ont été déployés le long du linéaire d'étude, avant d'être récupérés une fois le vol terminé. Leur positionnement a été choisi afin de maximiser la diversité des conditions de température observées. En effet, plus la gamme de température utilisée pour la validation/calibration est grande, plus la certitude de la mesure augmente. Ainsi, la droite de régression représentant la relation entre température « radiante » et la température réelle montre une représentation satisfaisante ($R^2 = 0.98$) sur une gamme de température d'environ 8 à 26°C (figure 9).

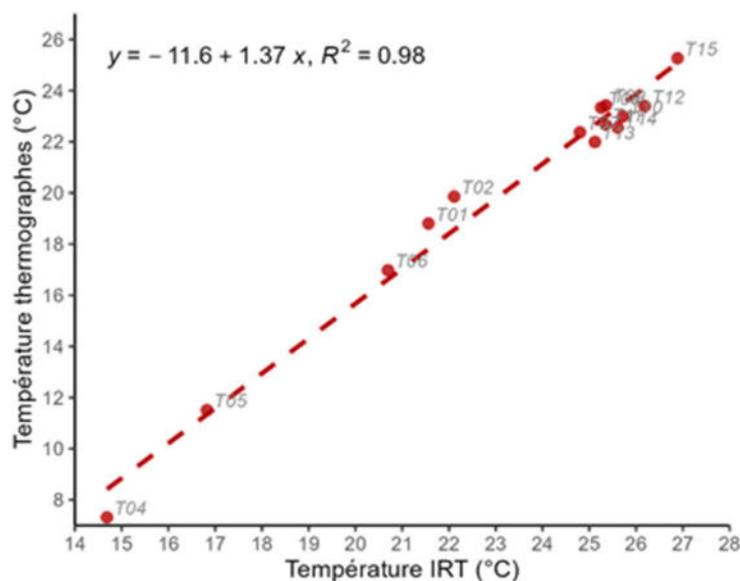


Figure 9 : Relation entre la température radiante (issue des images thermiques) et la température réelle de la rivière (issue des thermographes), enregistrées pendant le survol.

2.2 Conditions climatique et hydrologique

Afin de caractériser les conditions climatique et hydrologique sur la Bienne au cours de l'été 2022 et le jour du survol, les températures de l'air et les débits ont été étudiés entre le 15 juin et le 31 août 2022. Pour les données de températures d'air, la station météorologique d'Arbent a été utilisée car il s'agit de la station la plus proche du bassin de la Bienne pour laquelle des données validées pour l'été 2022 étaient disponibles (source www.infoclimat.fr). Pour les débits, les données hydrométriques des stations de Jeurre et Morez ont été exploitées (source HydroPortail : www.hydro.eaufrance.fr/).

Le jour du survol, soit le 21 juillet 2022, le débit de la Bienne était de 0,095 m³/s à Morez et de 1,28m³/s à Jeurre. Les températures de l'air minimale et maximale observées ce jour-là sous abri à Arbent ont été respectivement de 12,7°C et 31,3 C (figure 10).

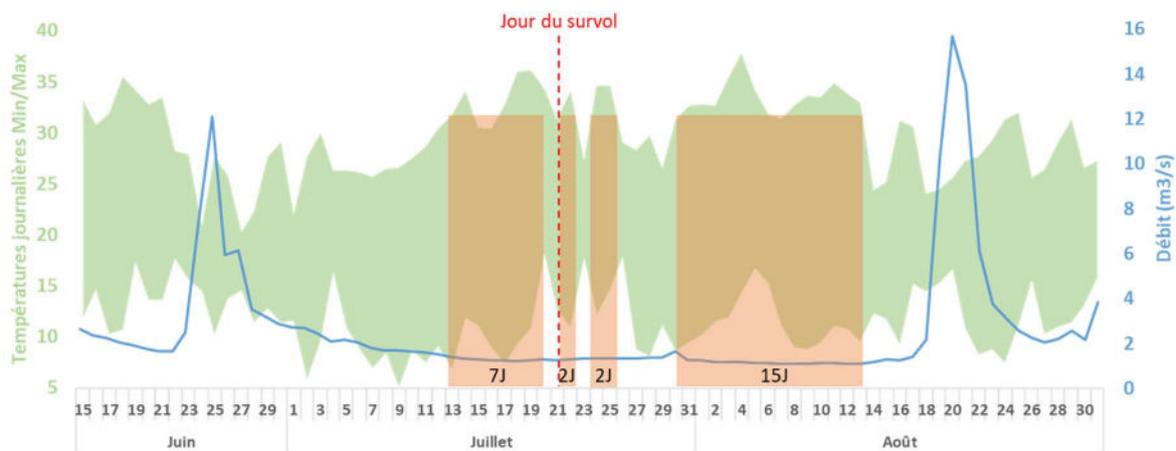


Figure 10 : Evolution des amplitudes des températures journalières de l'air à Arbent et des débits de la Bienne à Jeurre du 15 juin au 31 août 2022 (source météo France et HydroPortail).

L'évolution des conditions de températures de l'air et de débit de la Bienne au cours de l'été 2022 est présentée sur la figure 10. Des conditions climatique et hydrologique similaires à celles du jour du survol ont été observées sur un total de 26 jours entre le 15 juin et le 31 août 2022 soit environ 34% du temps (figure 10).

Les températures moyennes journalières de l'eau observées le jours du survol restent dans des valeurs comparables au cours de l'été 2022, notamment fin juin-début juillet puis du 15 juillet au 31 août (figure 11). La localisation des stations de suivi thermique est présentée sur la figure 12.

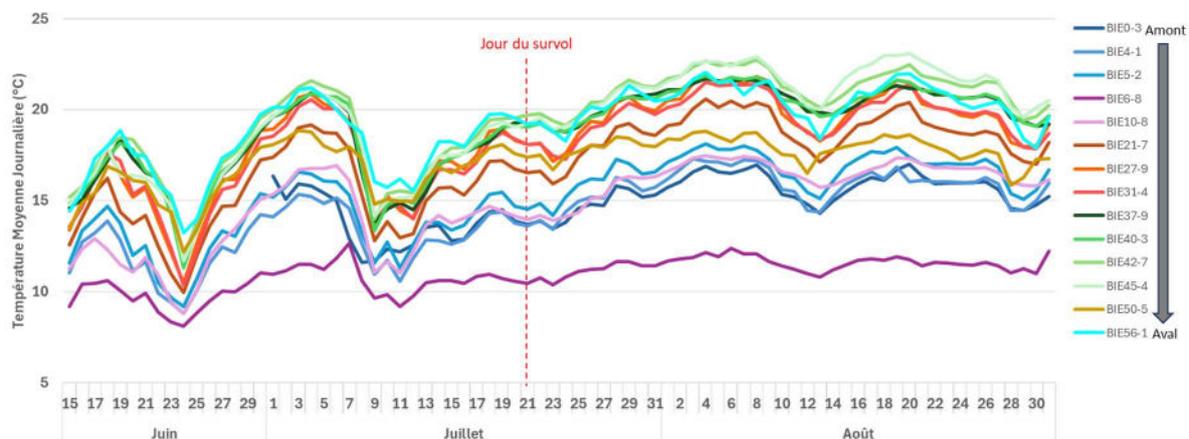


Figure 11 : Températures moyennes journalières du 15 juin au 31 août 2022 pour les 14 stations suivies sur le cours principal de la Bienne (source FDPPMA 39 et PNRHJ).

La station BIE6-8 (courbe violette, figure 11) qui se trouve au niveau de la résurgence du Trou Bleu se distingue très nettement des autres avec des températures tamponnées autour de 10-12°C pendant tout l'été.



Figure 12 : Localisation des 14 stations de suivi thermique disponibles en été 2022 sur la Bièvre.

3. RÉSULTATS DU VOLET CARTOGRAPHIE THERMIQUE PAR IRT-A

Au total, 1178 photographies ont été acquises et alignées pour générer une orthophoto recouvrant environ 23 km² pour une résolution au sol de 10 cm·pix⁻¹. De la même manière, 2265 images thermiques ont été prises pour créer une mosaïque thermique recouvrant la même superficie, pour une résolution d'image au sol de 40 cm·pix⁻¹. Il est important de garder en mémoire pour l'interprétation des résultats que la technologie IRT-a fournit une information de température de surface, et ne cartographie que ce qui est visible depuis les airs.

3.1 Diversité thermique de la rivière en période estivale

Une première approche dans l'analyse des résultats issus de la cartographie thermique consiste à regarder l'histogramme des valeurs de température de l'ensemble des pixels en eau extraits de la carte de température (figure 14). L'histogramme présente la particularité d'être multimodal, avec :

- Deux modes avec des températures élevées, un autour de 24°C et un autre autour de 28°C, ce qui montre une forte densité de secteurs dont les températures se situent entre 23 et 30°C ce qui apparaît comme très élevé par rapport aux exigences thermiques des salmonidés ;
- Un troisième mode autour de températures plus fraîches (~17°C), représentant majoritairement les poches froides ou les secteurs les plus froids de la rivière qui peuvent jouer un rôle clé de refuge thermique en période estivale puisque ces zones se trouvent dans le *preferendum* thermique des salmonidés.

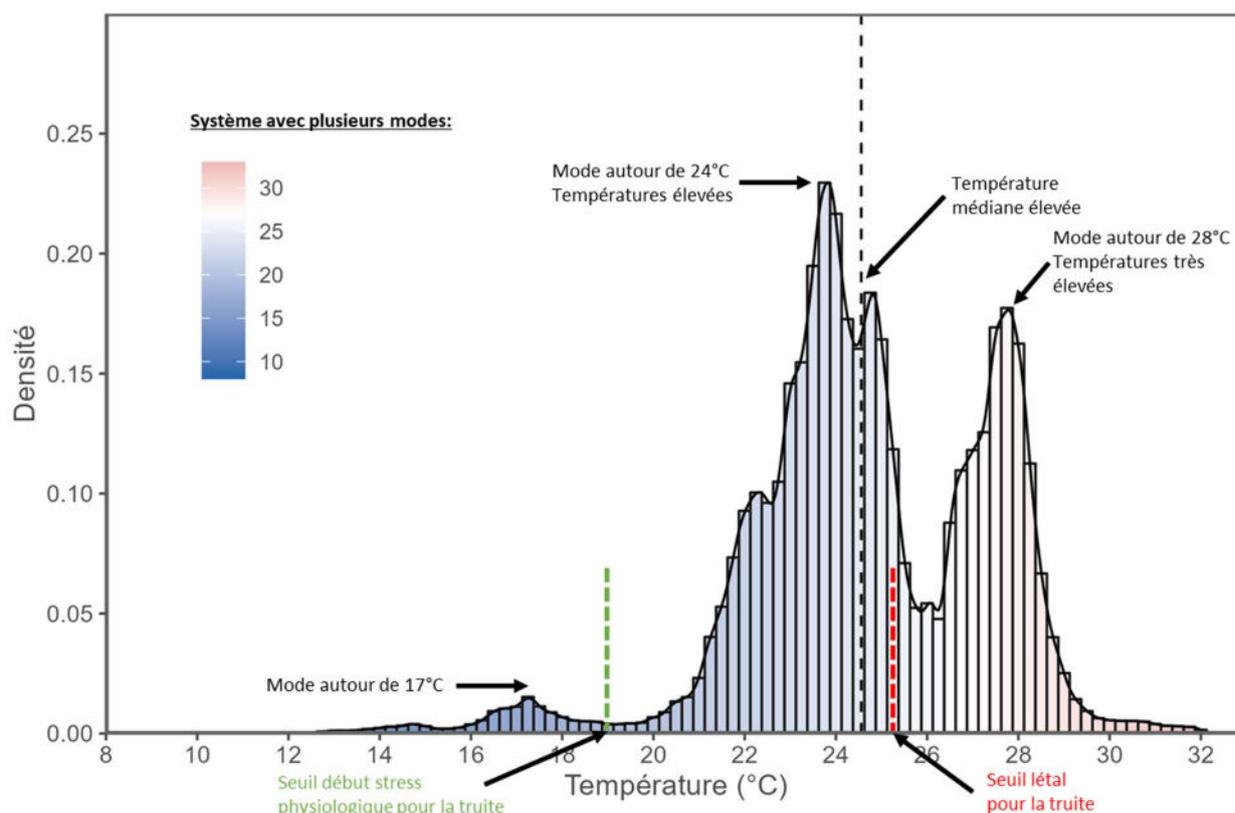


Figure 14 : Histogramme de distribution des pixels de température sur la Bienne issus de la campagne IRT-a de juillet 2022. La température médiane observée le 21 juillet 2022 est de 24,4°C. Données sur les exigences thermiques de la truite issues de Crisp (1996), Elliott et Hurley (2001).

3.2 Profil longitudinal de température

Le profil longitudinal, obtenu à partir des températures médianes tous les 100 mètres, illustre la forte variabilité de répartition des différents habitats thermiques sur les 63 km de rivière avec une gamme de température allant de 12°C à 28°C. Le profil thermique de la Bienne est loin d'être linéaire, au contraire, il se caractérise par une succession de nombreux réchauffements et refroidissements sur des linéaires plus ou moins importants (figures 15 et 16).

Dès les premiers km à l'amont de Morez, la température de l'eau connaît une forte augmentation puis une baisse importante liée à la confluence du ruisseau de l'Arce. Ensuite, dans les 3 km de la traversée de Morez, le profil montre un gradient positif important passant d'une température médiane de 15,5°C à 20,5°C soit (+1,66°C·km⁻¹).

La résurgence karstique du trou Bleu apporte un refroidissement majeur et quasi immédiat en faisant baisser la température médiane de 20,5°C à 12,3°C en moins de 600 mètres (-13,6°C·km⁻¹). Dans les gorges, le profil montre un gradient positif relativement important de 2°C·km⁻¹ jusqu'au barrage de Tancua suivi d'un linéaire relativement stable jusqu'au promontoire de Lézat (+0,09°C·km⁻¹). Entre le promontoire de Lézat jusqu'au barrage Manzoni, le gradient thermique est fortement positif avec environ 0,6°C·km⁻¹ notamment sur le linéaire d'environ 1,5km compris entre les barrages de Roche Blanche et Manzoni où la température passe de 21,8°C à 24,3°C.

Ensuite, sur 9 km, la température reste relativement stable, montrant uniquement de petites variations autour de 23-24°C jusqu'à la retenue du barrage d'Etable. Dans cette dernière, la température de surface montre une forte augmentation avec des valeurs comprises entre 25,5°C et 27°C sur les 1,5 km de la retenue.

A l'aval du barrage d'Etable, le profil montre plusieurs cycles de réchauffements et refroidissements sur environ 12 km jusqu'au Gour aux Moines à Vaux les St-Claude où des apports karstiques apportent un refroidissement majeur sur le profil avec un gradient de -2,8°C km⁻¹. Ensuite le gradient redevient positif jusqu'à l'amont de l'ancienne carrière Perrier (+1,14 °C·km⁻¹) avant de baisser d'environ 3°C jusqu'au remous thermique et hydraulique provoqué par la retenue du barrage de Lavancia. Les retenues de Lavancia puis de Coiselet provoquent chacune une forte augmentation des températures de surface, de l'ordre de 3°C.

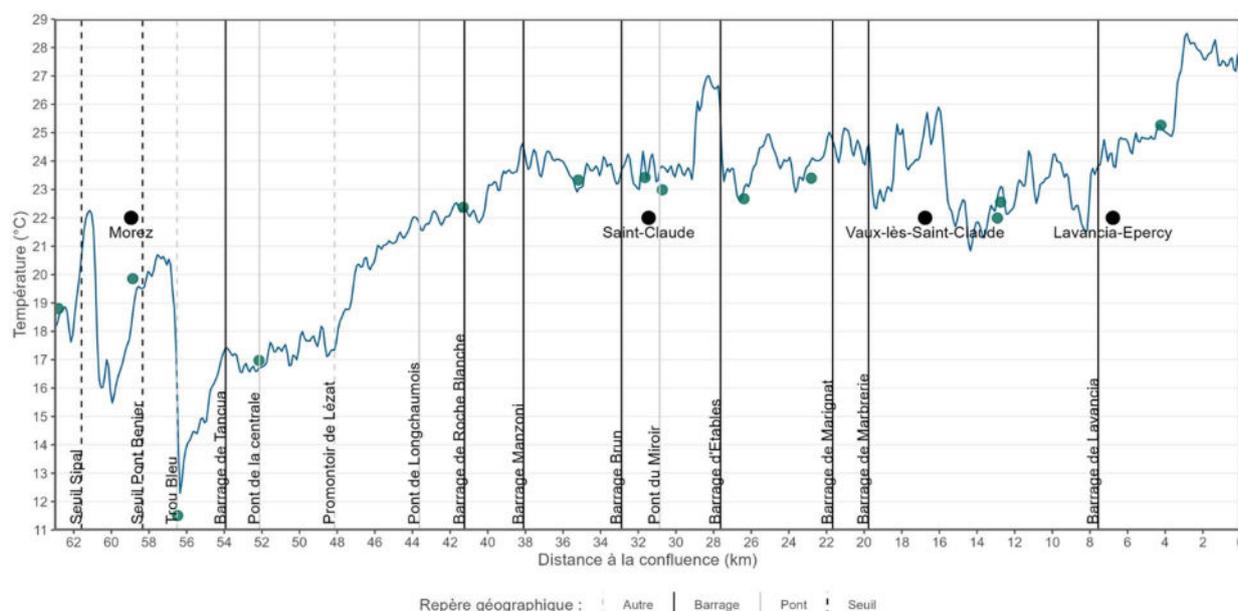


Figure 15 : Profil longitudinal de température issu de la campagne IRT-a. Les points bleus représentent les thermographes utilisés pour la validation des images thermiques (cf. figure 9).

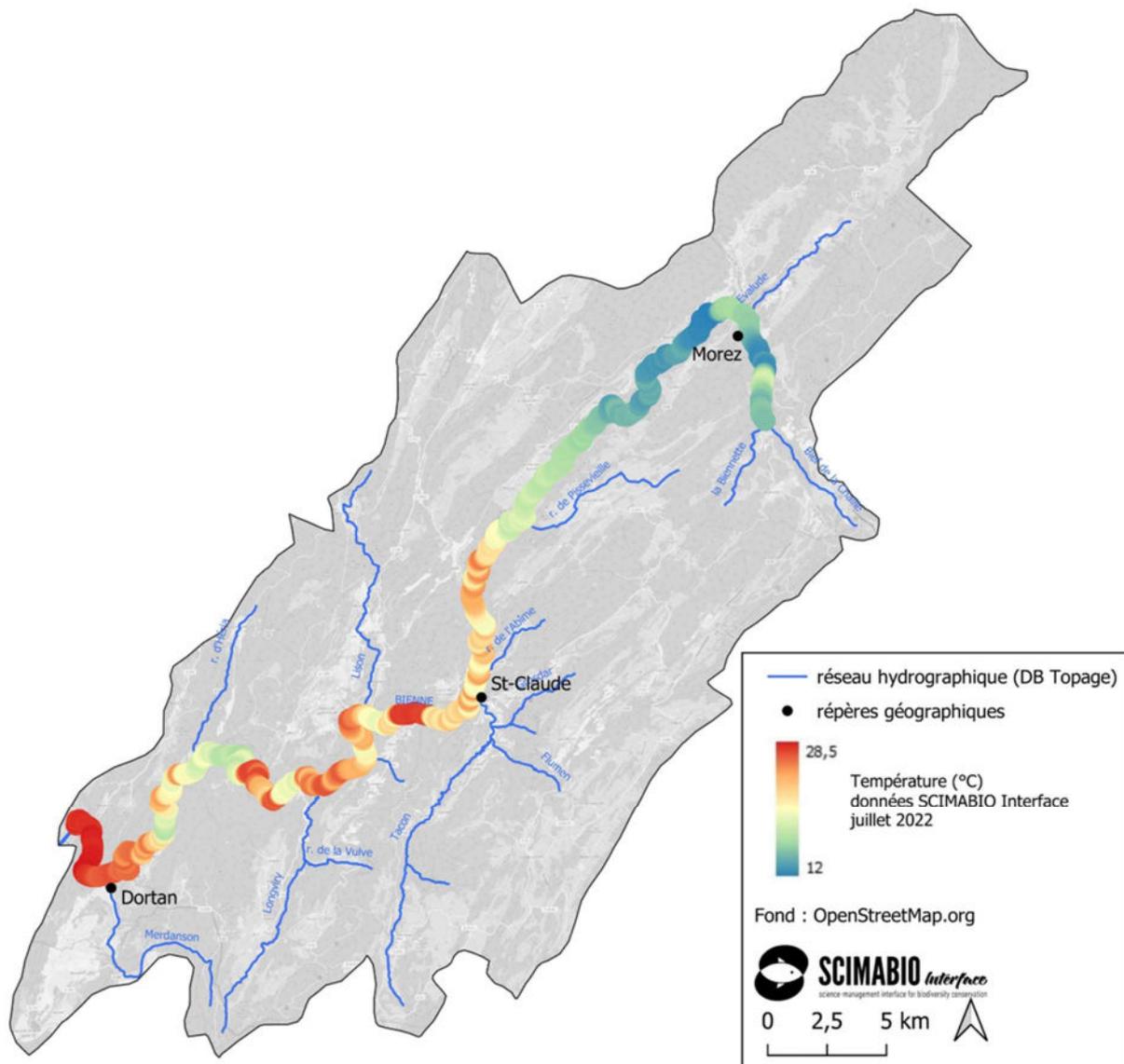


Figure 16 : Carte des températures médianes par tronçon de 100 mètres de rivière obtenues sur la Bienne à partir des données IRT-a.

3.3 Détection des anomalies thermiques chaudes

3.3.1 Caractéristiques et distribution sur le linéaire

Dix zones de réchauffement important, ayant chacune un effet significatif sur le linéaire, ont été recensées. Elles influencent le profil thermique de la Bienne en provoquant des augmentations de températures sur des linéaires de rivières non négligeables (figure 17 et 18, tableau 1). Certains barrages provoquent des anomalies thermiques avec des augmentations brutales et importantes de la température qui peuvent se prolonger sur des linéaires variables selon l'importance des remous thermiques formés par les retenues (figure 17, tableau 1).

Code Pt chaud	T° Médiane Amt (°C)	T° Médiane avl (°C)	ΔT°C (Médiane)	PK Amt (km)	PK Avl (km)	Linéaire (km)	Gradient (T°C.km ⁻¹)	Description
C_Bi1	18,6	22,3	3,7	62	61,2	0,8	4,6	Absence de poches froides sur ce linéaire reflétant un déficit d'échanges nappe-rivière. Linéaire partiellement rectifié et fortement urbanisé depuis 1950 en rive droite avec des constructions jusqu'au niveau du lit (murs, parking). Déficit de ripisylve et orientation du lit sud-nord soumis aux rayonnement solaires importants lors des moments chauds de la journée.
C_Bi2	15,8	20,6	4,8	59,9	57,3	2,6	1,8	Traversée urbaine de Morez, urbanisation et artificialisation du lit et des berges, peu d'échanges nappe-rivière, absence de ripisylve et présence de nombreux seuils provoquant des faciès d'écoulement plus sensibles aux réchauffements liés aux rayonnements solaires
C_Bi3	17,6	20,6	3,0	48,1	46,6	1,5	2,0	Contrairement au 6km amont, à partir de Lézat, le nombre de poche froide est en nette diminution et leur différentiel thermique par rapport à la rivière est minime (-0,5°C). La réduction des échanges hyporhéiques associée au faciès peu profond sur ce linéaire favorise le réchauffement de l'eau.
C_Bi4	21,9	24,6	2,7	40,4	38,3	2,1	1,3	A partir de l'aval de l'usine hydroélectrique de Roche Blanche, le faciès d'écoulement majoritaire de la rivière est de type radier avec des profondeurs faibles et un étalement de la lame d'eau sur toute la largeur du lit. En outre les apports hyporhéiques froids sont peu nombreux et de petites tailles. Enfin, le remous thermique provoqué par la retenue du barrage de Manzoni qui occupe un linéaire d'environ 300 mètres vient aggraver ce réchauffement. La retenue fortement soumise aux rayonnements solaires entraîne une augmentation de la température de surface médiane de la rivière de plus d'1°C.
C_Bi5	23,4	27	3,6	29,1	28,3	0,8	4,5	La retenue du barrage d'Etable provoque un remous thermique sur 1400 mètres de linéaire avec des températures de surface comprises entre 26°C et 29°C. Le passage du faciès lotique de la rivière à la retenue se traduit par une augmentation de la température quasi-instantanée de 4°C.
C_Bi6	23,1	24,9	1,8	26,2	25,1	1,1	1,6	La température de la Bienne à l'aval du barrage d'Etable est contenue à 22-23°C jusqu'à la confluence du Lison grâce à quelques apports hyporhéiques réguliers. Le Lison, en apportant une eau environ 2°C plus chaude que celle de la Bienne, provoque une élévation de température de la rivière qui se prolonge sur un linéaire important.
C_Bi7	22,9	25	2,1	23,6	21,6	2	1,1	Ce linéaire de 3,8 km est caractérisé par trois augmentations successives provoquées par les retenues des barrages de Marignat, Marbrerie et Molinges (ancien Smoby). Quelques poches froides venant de résurgences et d'affluents (Longviry et Enragé) permettent de réduire légèrement les températures mais leurs effets sont réduits par les remous thermiques des retenues.
	23,9	25,1	1,2	21,3	20,8	0,5	2,4	
	23,9	24,6	0,7	20,1	19,8	0,3	2,3	
C_Bi8	22,3	25,1	2,8	18,9	17,9	1	2,8	Ce linéaire de 2,8 km est impacté par deux augmentations de températures. Une au niveau du faciès lentique situé en aval immédiat du stade de Molinges qui est soumis aux rayonnements solaires. L'autre entre le pont de Vaux et le Gour aux moines.
	23,7	25,9	2,2	17,6	16,1	1,5	1,5	Entre ces deux zones de réchauffement, des échanges hyporhéiques présents sur environ 900 mètres permettent de baisser la température de quelques degrés.
C_Bi9	21,6	24,7	3,1	8,1	7,3	0,8	3,9	Le remous thermique provoqué par le barrage de Lavancia occupe un linéaire d'environ 600 mètres. L'élévation de température immédiate entre la rivière et la retenue est de 2°C. Dans la retenue les températures de surface tournent autour de 24-25°C.
C_Bi10	24,8	28,5	3,7	4,5	2,9	1,6	2,3	Sur l'extrême aval de la rivière, le barrage de Coiselet forme un remous thermique d'environ 3500 mètres de linéaires qui présente des températures de surface comprises entre 27°C et 28°C soit +3°C à +4°C supérieures à celles de la rivière.

Tableau 1 : Caractéristique et description des zones de réchauffements majeures recensées sur la Bienne.

3.3.2 Cartographies thermiques détaillées

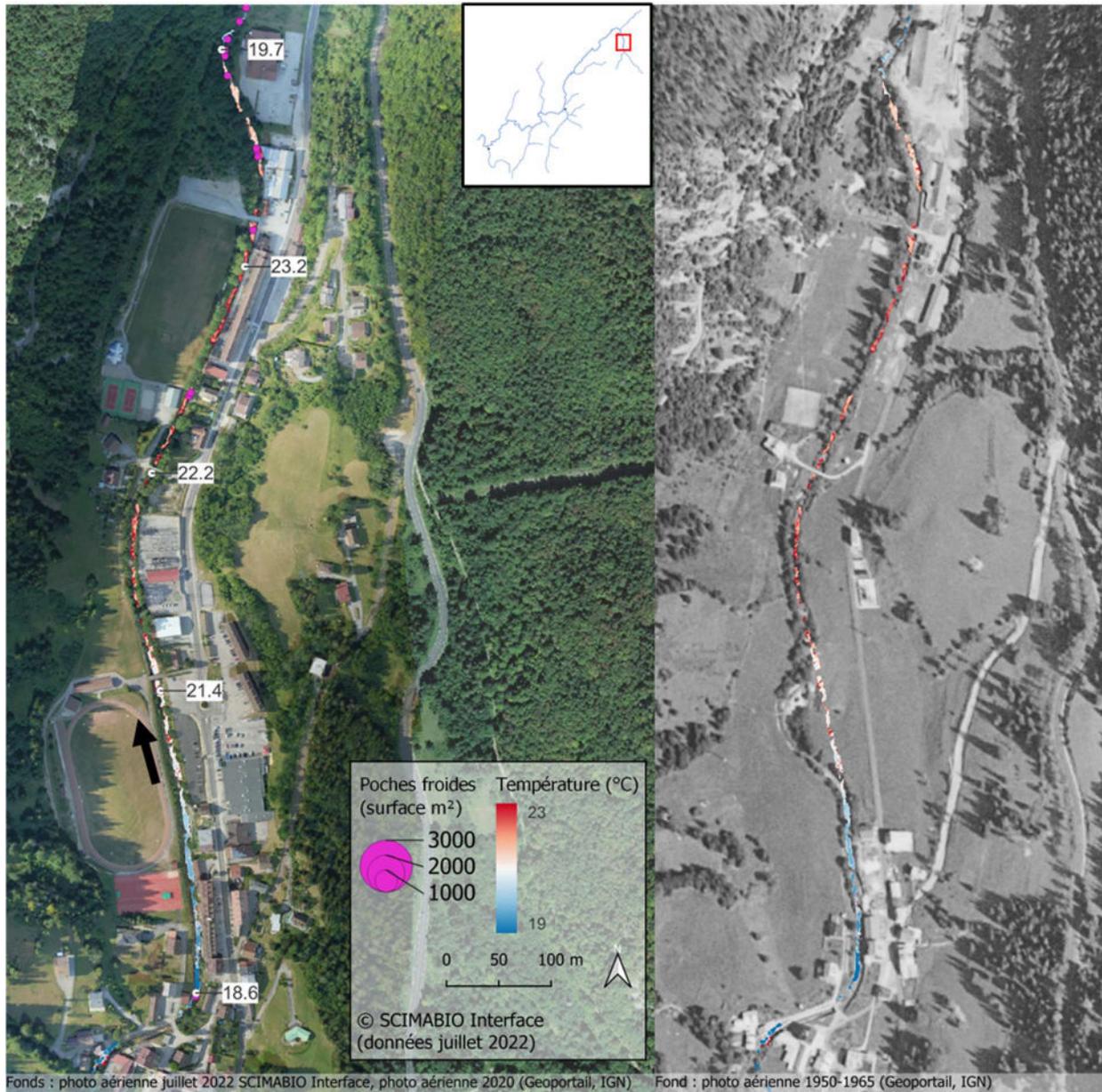


Figure 19 : Mosaïque thermique et orthophoto actuel (à gauche) et historique (1950-1965, à droite) illustrant le réchauffement observé à l'amont de Morez au lieu-dit La Doye et l'évolution de l'occupation du sol.

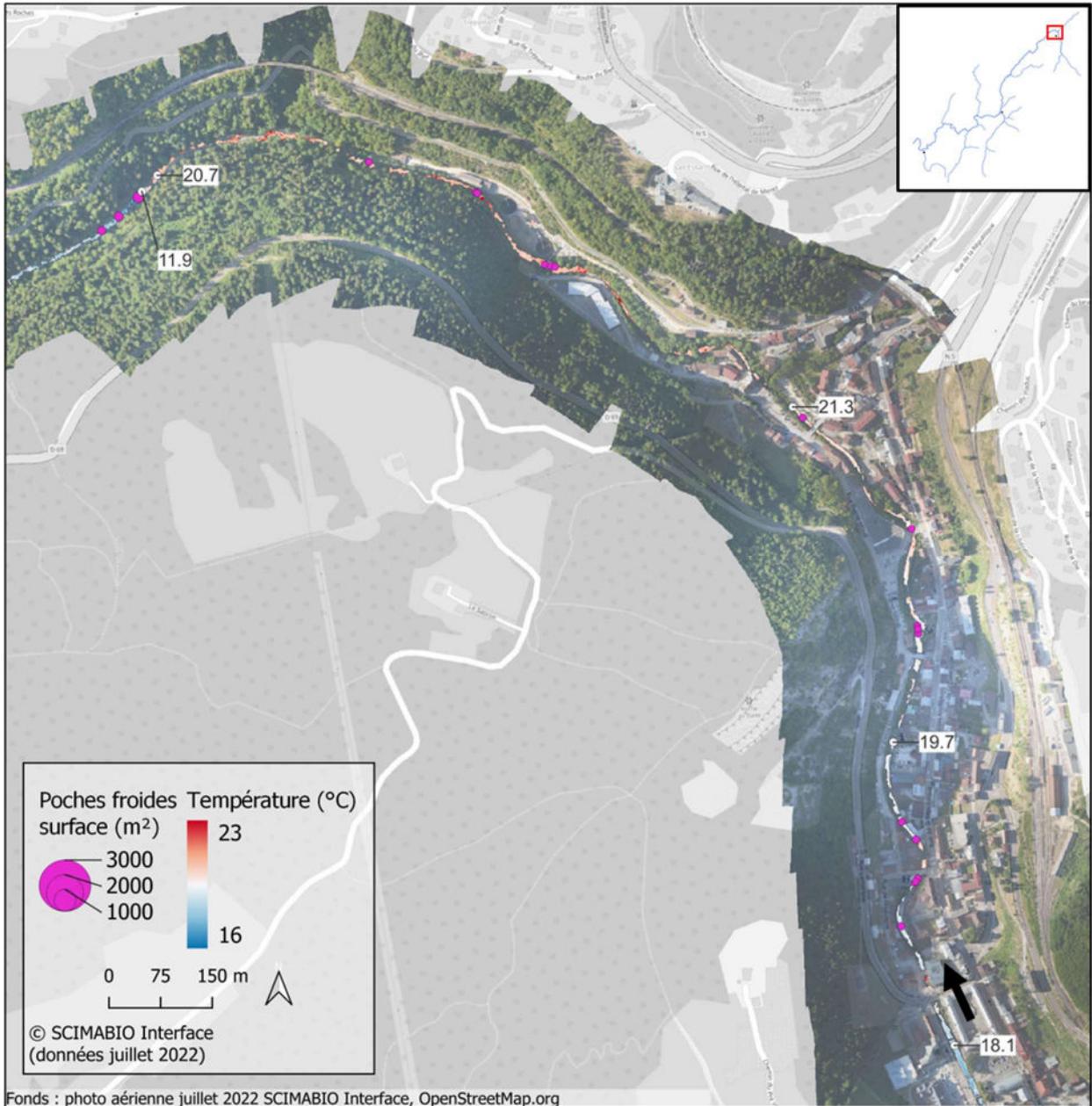
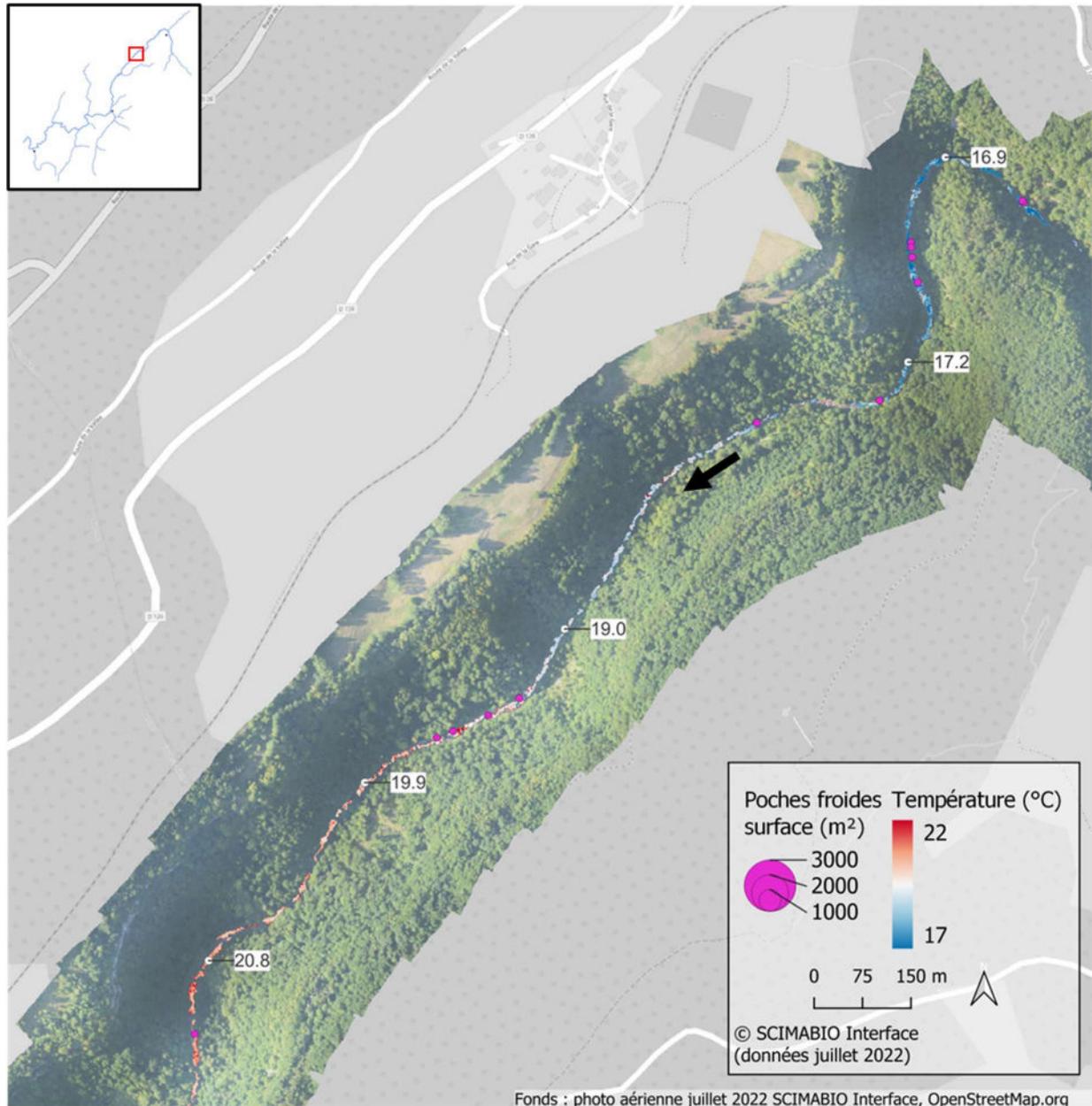


Figure 20 : Mosaïque thermique et orthophoto illustrant le réchauffement observé dans la traversée de Morez jusqu'à la résurgence du Trou Bleu.



Fonds : photo aérienne juillet 2022 SCIMABIO Interface, OpenStreetMap.org

Figure 21 : Mosaïque thermique et orthophoto illustrant le réchauffement observé dans les gorges en aval du lieu-dit Lézat.

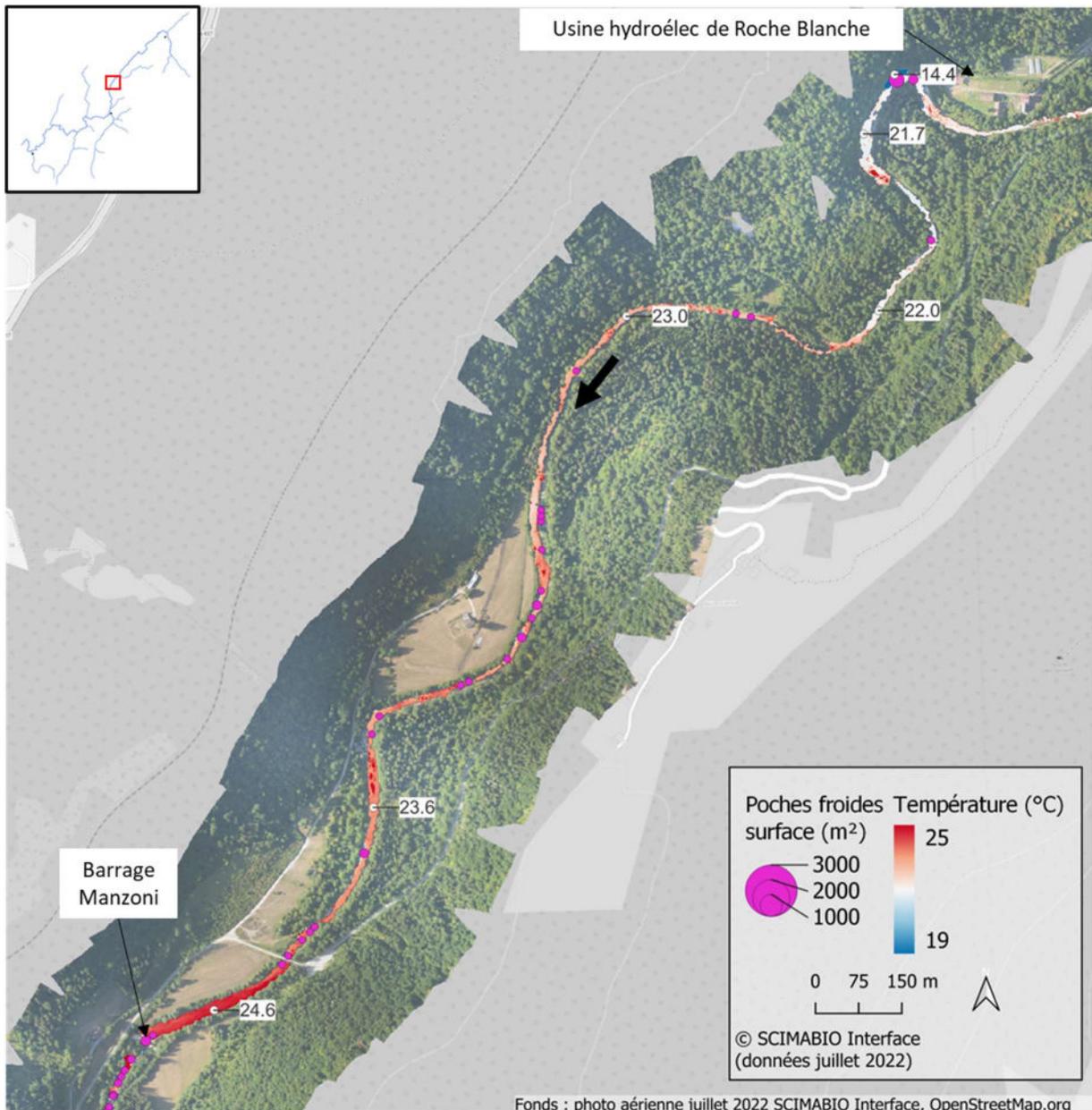


Figure 22 : Mosaïque thermique et orthophoto illustrant le réchauffement observé entre les barrages de Roche Blanche et Manzoni.

Sur ce secteur, un zoom a été réalisé au niveau du barrage Manzoni pour définir l’emprise et l’effet du remous thermique formé par la retenue d’eau (figure 23). Le remous thermique remonte sur un linéaire d’environ 250 à 280 mètres. La présence de résurgences hyporhéiques en rive droite en amont du pont et en amont immédiat du barrage permet de limiter le réchauffement mais leurs effets restent contraints par la retenue d’eau stagnante.

En période estivale, lorsque l’eau de surface ne surverse pas au-dessus du barrage, on perçoit l’existence de résurgence hyporhéique en rive gauche à l’aval immédiat de l’ouvrage qui permet de réduire le réchauffement sur le linéaire aval (figure 22).

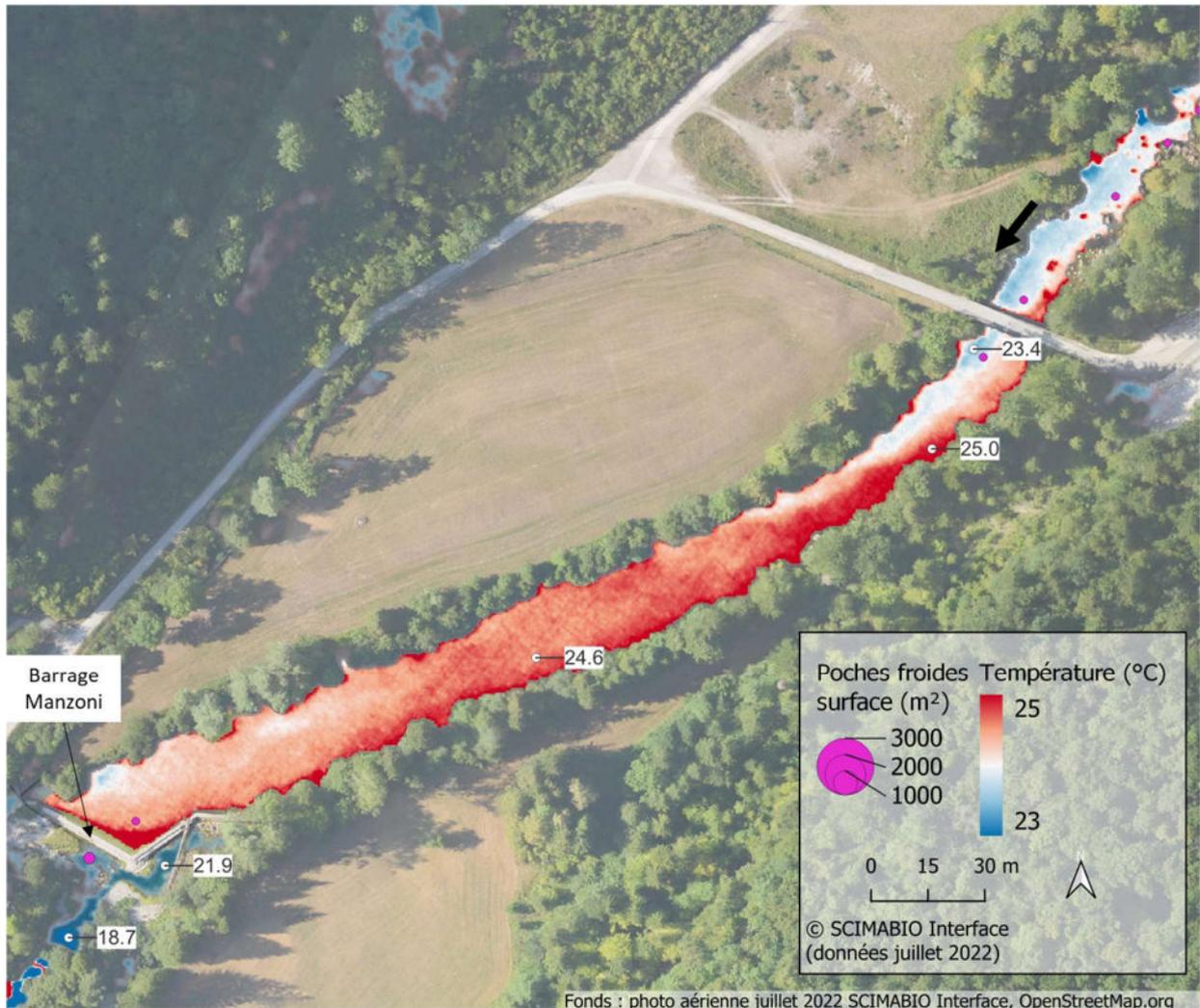


Figure 23 : Zoom de la mosaïque thermique au niveau du barrage Manzoni permettant de caractériser l'empreinte du remous thermique formé par la retenue.

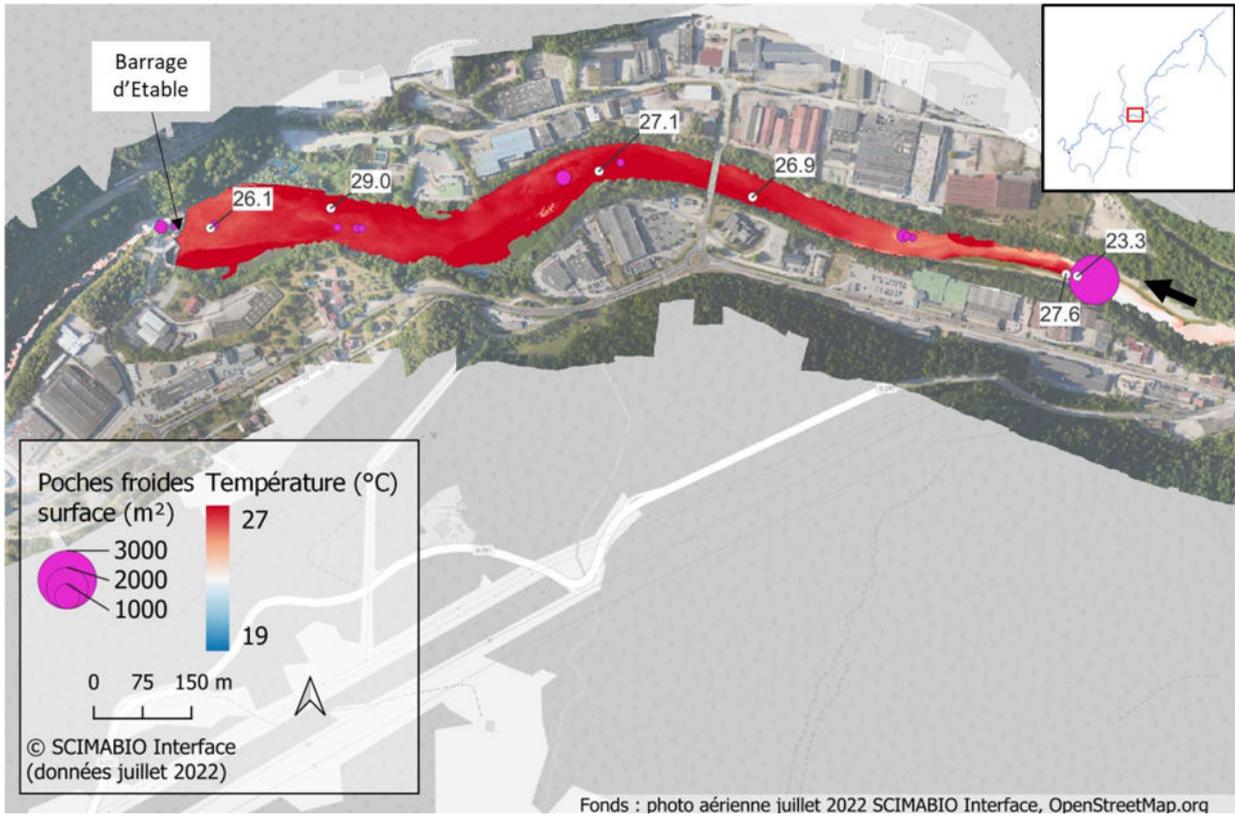


Figure 24 : Mosaïque thermique et orthophoto illustrant le réchauffement observé au niveau de la retenue du barrage d'Etabelle et l'emprise du remous thermique formé par la retenue.

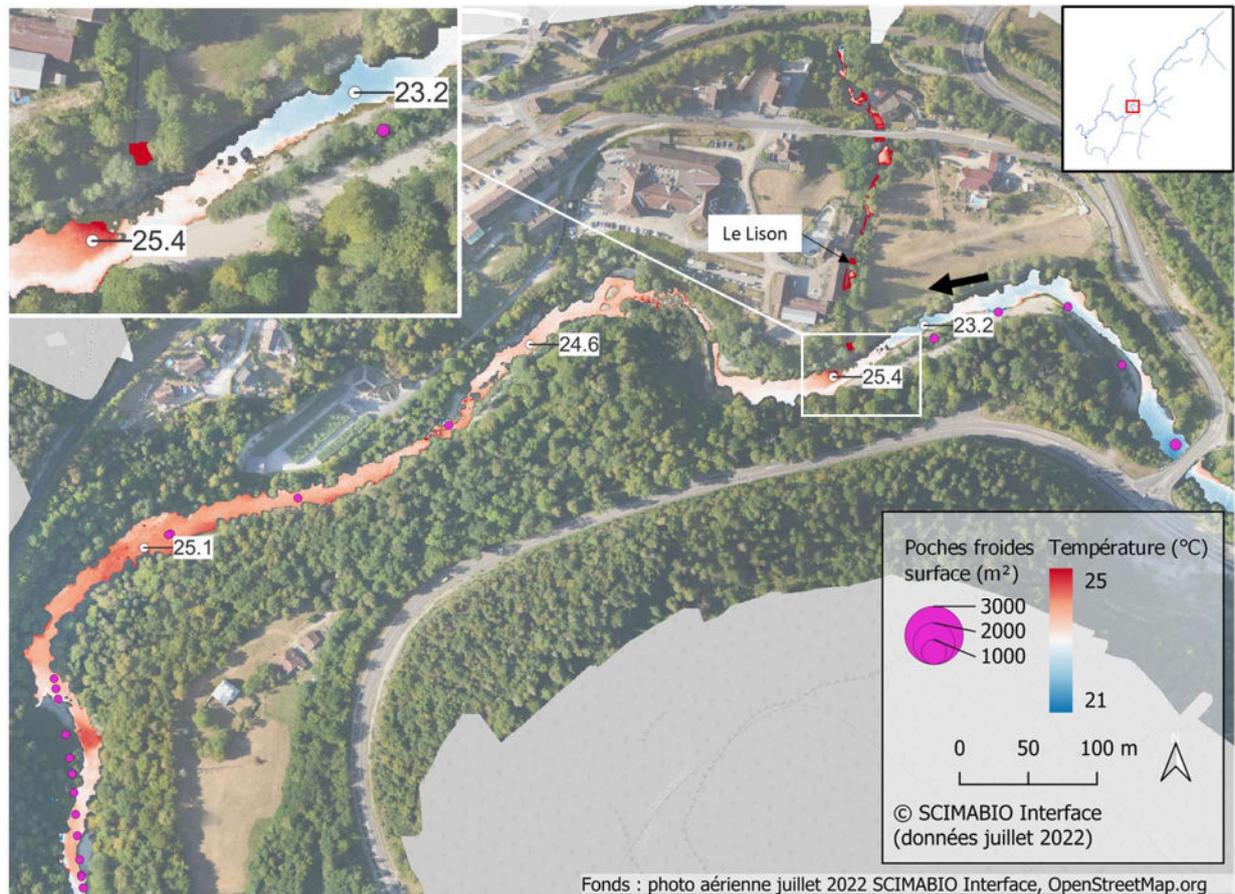


Figure 25 : Mosaïque thermique et orthophoto illustrant le réchauffement observé au niveau du Lison et zoom sur le panache « chaud » du Lison.

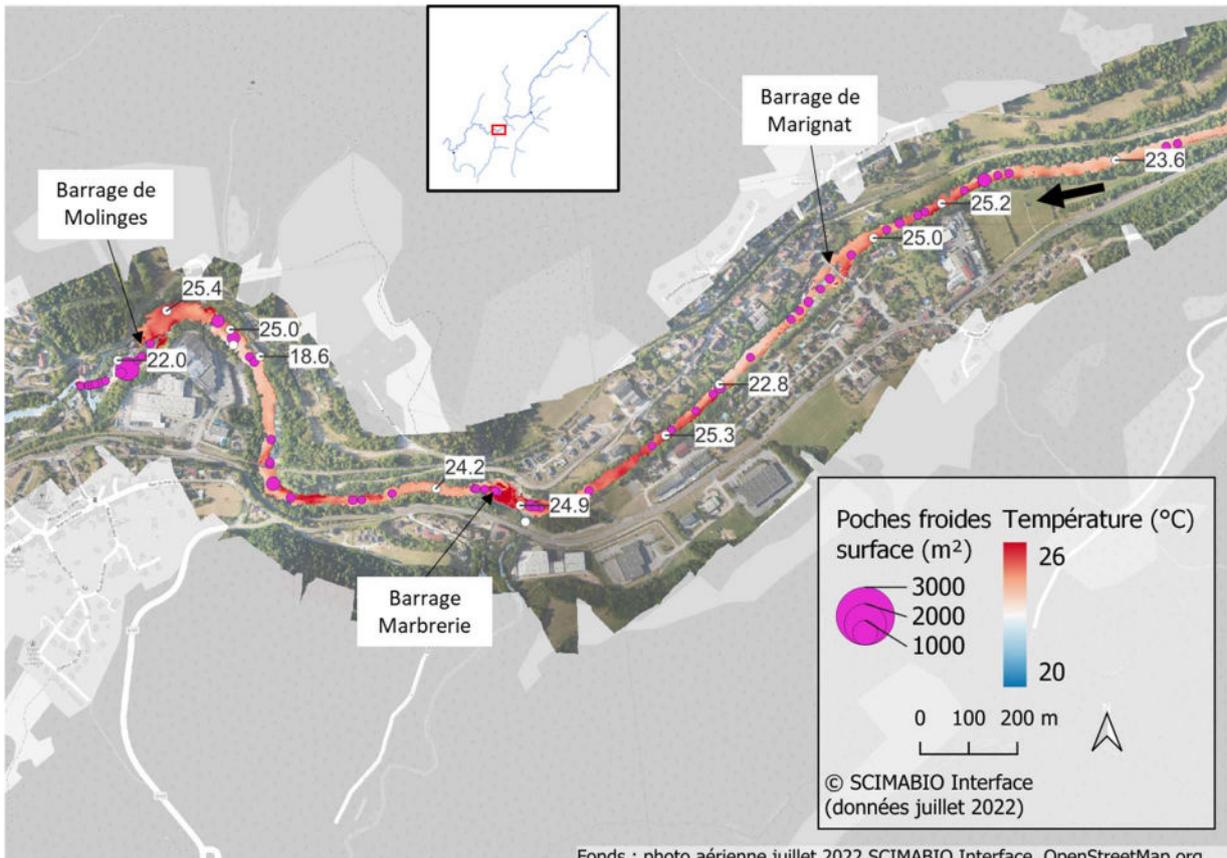


Figure 26 : Mosaïque thermique et orthophoto illustrant les 3 échauffements observés entre Marignat (Chassal) et Molinges.

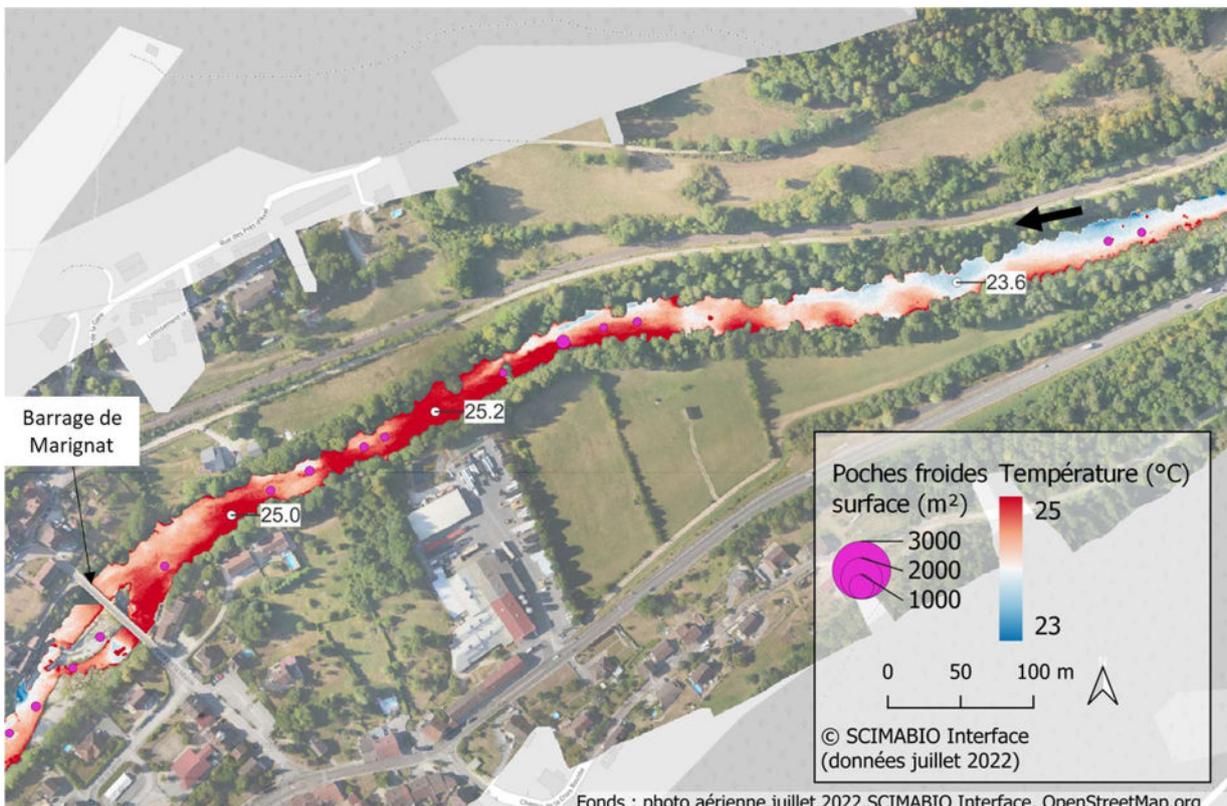
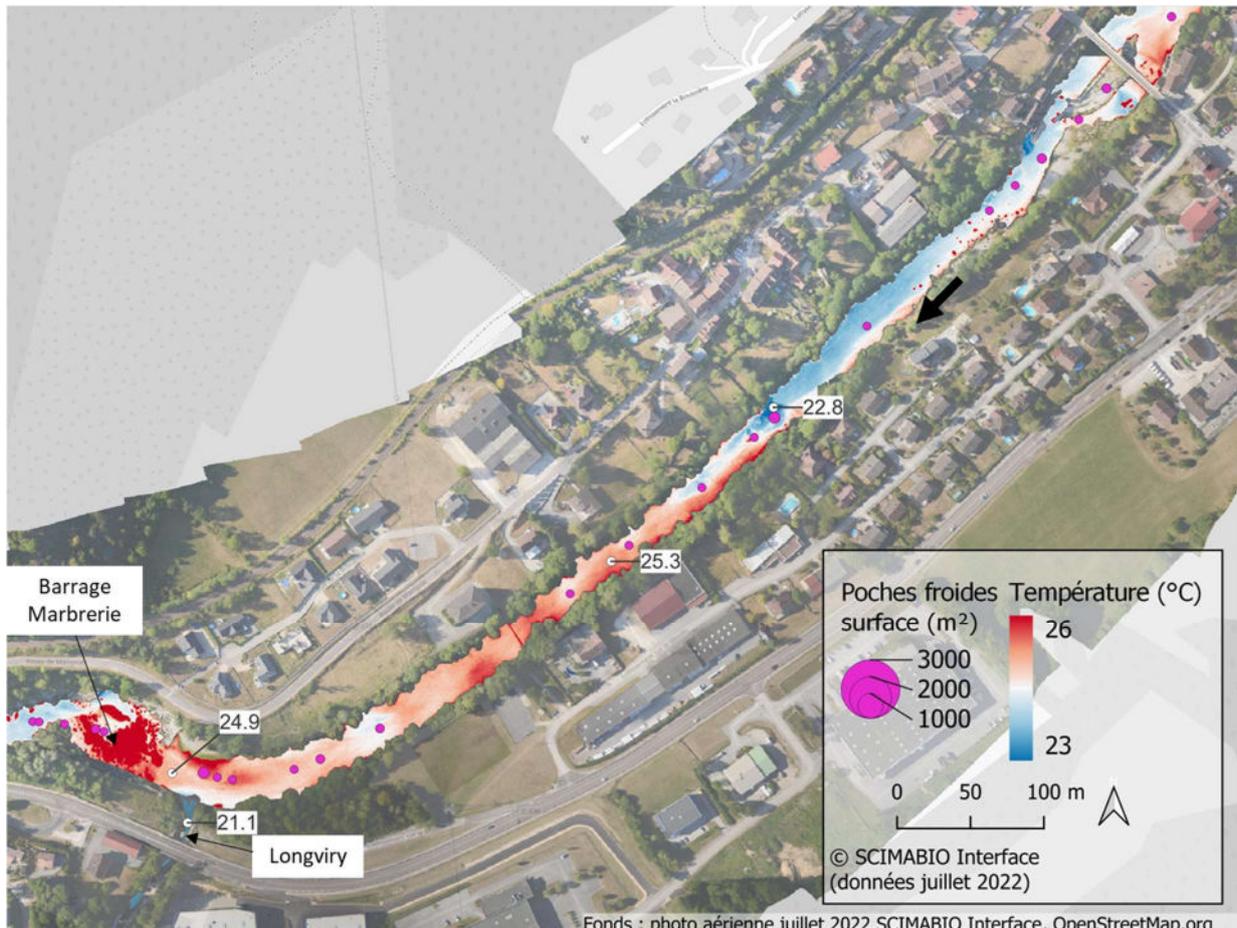
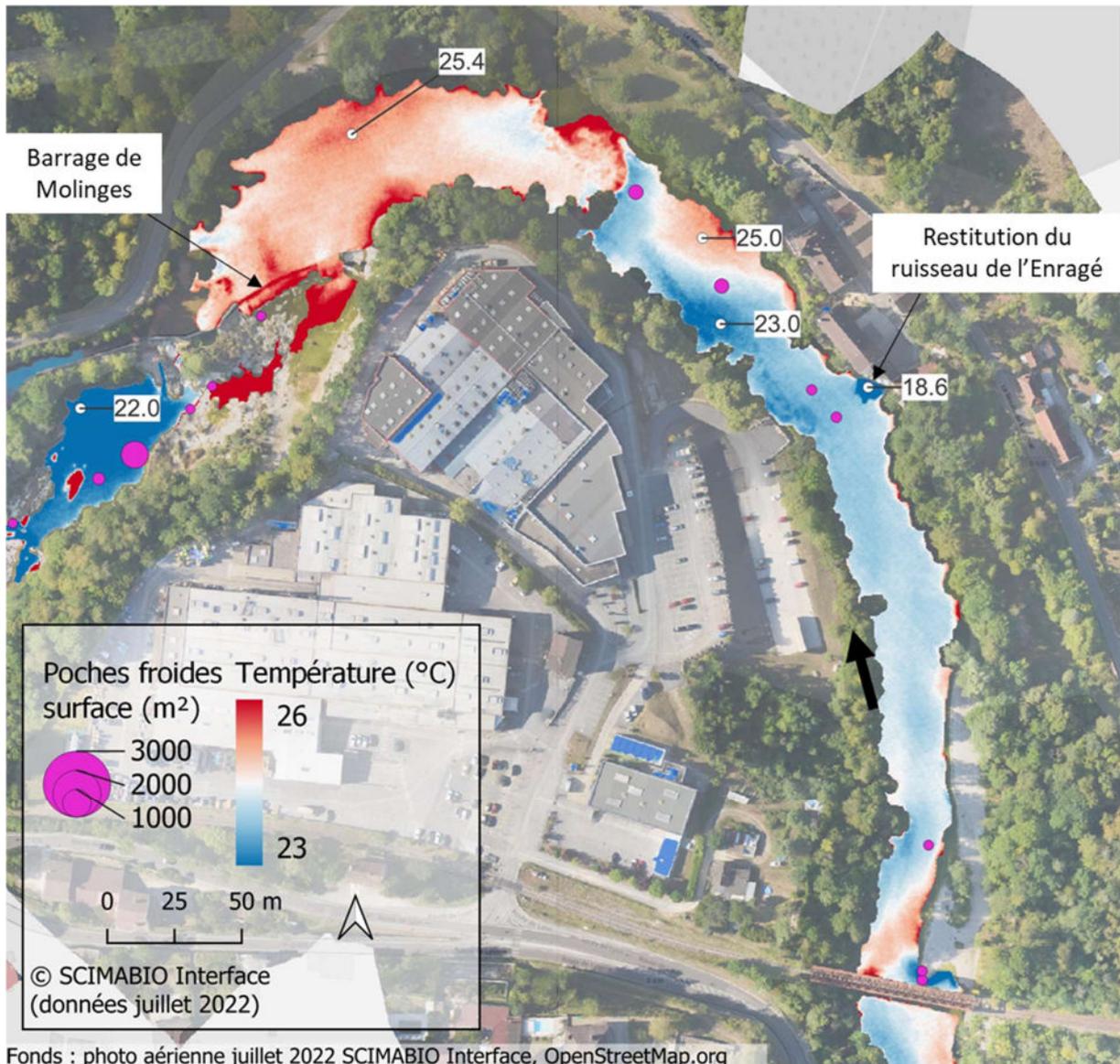


Figure 27 : Zoom de la mosaïque thermique au niveau du barrage de Marignat permettant de caractériser l'emprise du remous thermique sur environ 450 mètres formé par la retenue.



Fonds : photo aérienne juillet 2022 SCIMABIO Interface, OpenStreetMap.org
 Figure 28 : Zoom de la mosaïque thermique au niveau du barrage Marbrerie permettant de caractériser l'emprise du remous thermique sur environ 450 mètres formé par la retenue.



Fonds : photo aérienne juillet 2022 SCIMABIO Interface, OpenStreetMap.org

Figure 29 : Zoom de la mosaïque thermique au niveau du barrage de Molinges permettant de caractériser l'emprise du remous thermique sur environ 150 mètres formé par la retenue.

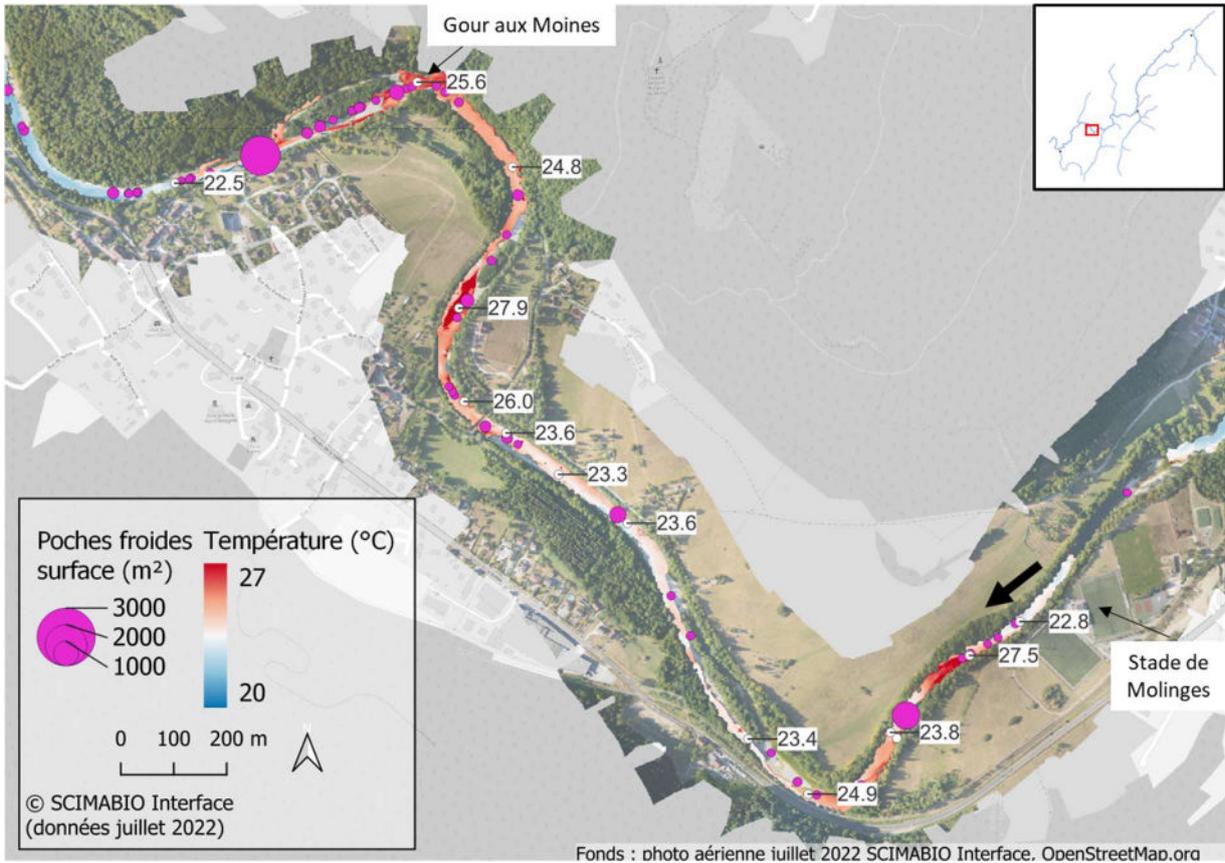


Figure 30 : Mosaïque thermique et orthophoto illustrant les 2 échauffements observés en aval du stade de Molinges et en aval de Vaux-lès-Saint-Claude.

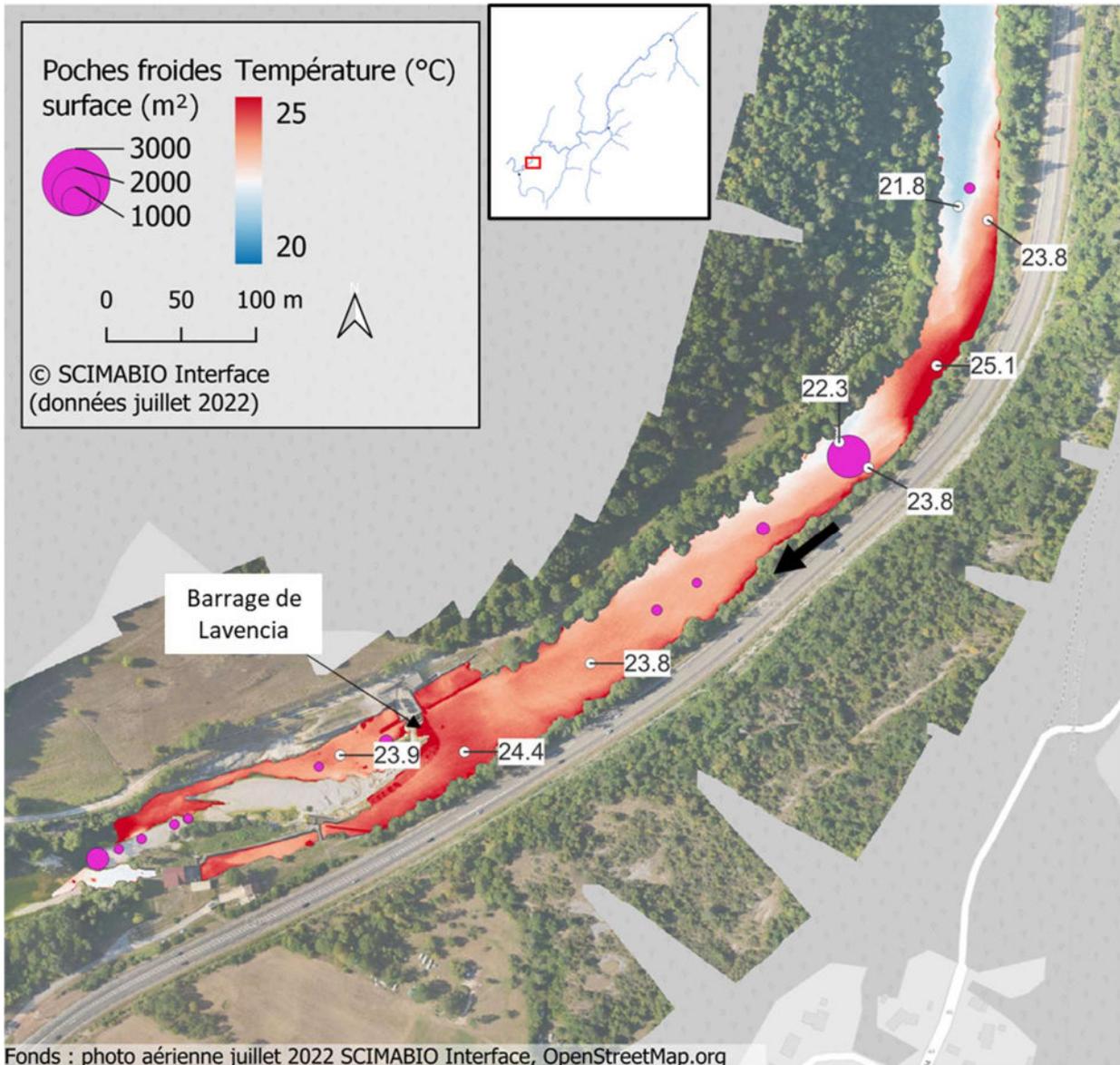


Figure 31 : Mosaïque thermique et orthophoto illustrant l'échauffement observé au niveau du remous thermique formé par la retenue de Lavancia.

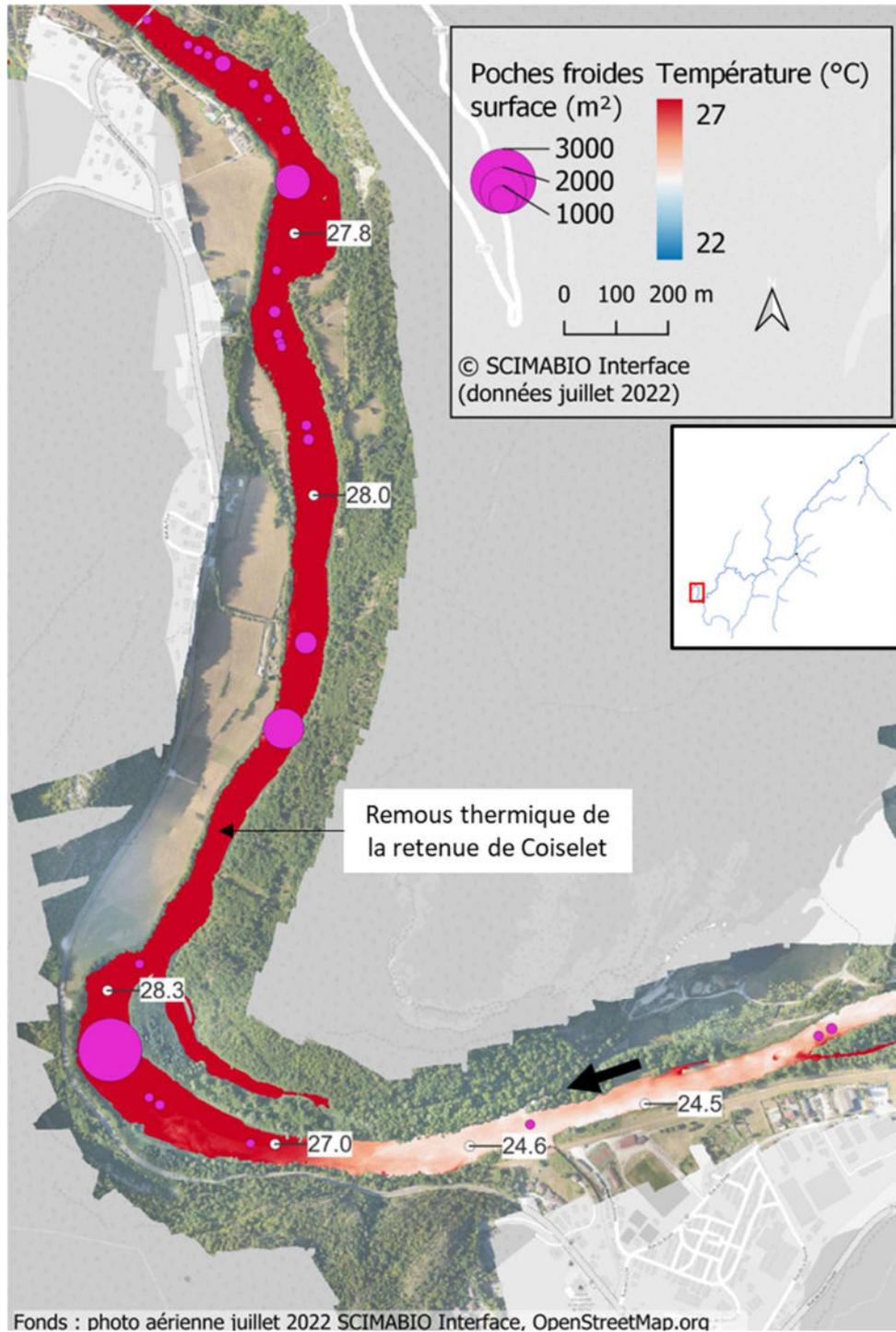


Figure 32 : Mosaïque thermique et orthophoto illustrant l'échauffement observé au niveau du remous thermique formé par la retenue de Coiselet.

3.4 Détection des poches froides

3.4.1 Caractéristiques et distribution sur le linéaire

Pour rappel, une arrivée d'eau est considérée comme une poche froide lorsque sa surface est au moins égale à 4 pixels adjacents (0,64 m²) et que sa température est inférieure d'au moins 0,5°C à celle de la rivière.

Un total de 715 poches froides a été recensé le long des 63 km du linéaire d'étude. Leur surface varie de 0,64² à 2933 m², pour des écarts de température médiane avec la rivière pouvant atteindre -5,4°C (figure 33).

Une information majeure obtenue est que des poches froides sont présentes tout le long de la rivière, ce qui traduit globalement une bonne fonctionnalité hydromorphologique de la Bienne.

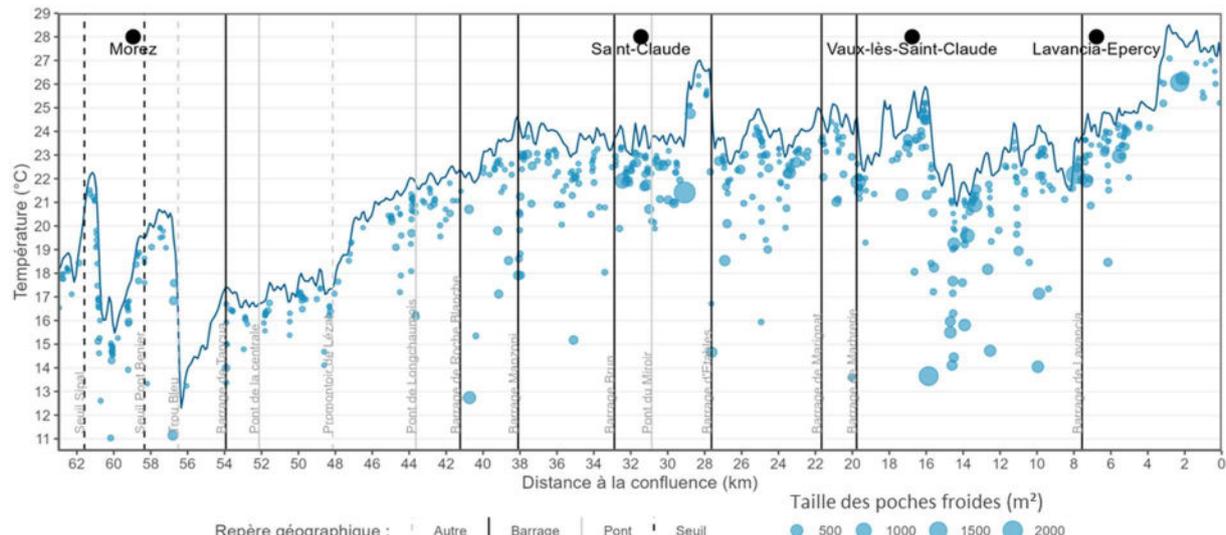


Figure 33 : Distribution des poches froides recensées sur le linéaire de la Bienne. La taille des cercles reflète la superficie visible sur les images des poches froides, et leur positionnement sur l'axe-y représente leur température minimale.

Le nombre de poches froides et les écarts de température avec la rivière montrent des variations le long du linéaire (figures 33 et 34). De manière générale, les poches dont les écarts de température sont importants illustrent des arrivées phréatiques ou karstiques, voire des affluents froids (eux-mêmes alimentés par des apports phréatiques). A l'inverse, les poches dont l'écart de température avec la masse d'eau est moins important sont caractéristiques d'échanges hyporhéiques, d'un « recyclage local » des eaux de surface ou d'apports surfaciques (zones humides, bras secondaires, voire rejets plus ou moins naturels).

Le secteur de Morez, jusqu'au Trou Bleu, montre un faible nombre de poches froides avec des surfaces limitées, mais dont certaines présentent un écart thermique important avec la rivière. Ces observations peuvent s'expliquer par (1) des températures médianes qui ne sont pas encore très élevées sur ce secteur amont, ce qui fait que les contrastes entre les zones froides et la masse d'eau sont moins marqués ; et (2) par les caractéristiques morphologiques de la vallée au niveau de Morez. Le village est situé entre deux « verrous géologiques » ; la vallée y est un peu plus ouverte qu'à l'amont et à l'aval immédiat, et les échanges avec la nappe probablement plus importants qu'en amont (cf. le nombre de puits et forages autour de Morez).

Dans les gorges, sur environ 14km en aval du Trou Bleu, les poches froides se révèlent moins nombreuses et présentent des écarts thermiques moins importants jusqu'au barrage de Roche Blanche. La vallée y est très encaissée et peu large, l'espace disponible pour des échanges y est donc limité. L'épaisseur du substrat alluvial y est aussi limitée par endroit, ce qui limite les échanges hyporhéiques. De plus, l'eau est fortement refroidie par la résurgence karstique froide (~8°C) du Trou Bleu et la vallée est protégée des rayonnements solaires par la topographie et la ripisylve.

Du barrage de Roche Blanche jusqu'à Vaux-lès-Saint-Claude, les poches froides sont plutôt denses et régulièrement réparties sur le linéaire avec notamment plusieurs d'entre elles qui montrent des écarts de températures importants avec la rivière (jusqu'à -9°C). Ces apports relativement froids jouent

² Note : ceci correspond au seuil minimal de taille défini dans la méthode.

probablement un rôle non négligeable pour tamponner l'échauffement régulier observé entre le km 47 et le km 42 (figure 33).

Sur plusieurs km en aval de Vaux-lès-Saint-Claude, la Bienne bénéficie de nombreux apports d'eau froide dont des résurgences karstiques qui permettent de baisser d'environ 5°C la température médiane de la rivière et de ralentir ensuite son réchauffement. Ici, les apports froids sont importants, autant du point de vue des poches froides que de leur effet sur la température moyenne de la masse d'eau. De plus, leur localisation dans un secteur qui tend à s'échauffer peut leur conférer des rôles écologiques d'intérêt pour des espèces thermo-sensibles.

A partir de la retenue de Lavancia, les poches froides restent nombreuses mais leurs tailles sont limitées et leurs températures relativement élevées ($\geq 21^\circ\text{C}$). Rapidement, la rivière se retrouve sous l'influence du remous généré par le lac de Coiselet. Les écoulements y sont alors lents, la température de surface augmente, à tel point que de nombreuses taches « froides » apparaissent en surface simplement du fait de l'ombrage. L'ombrage est capable de limiter l'échauffement mais ses effets se mesurent généralement sur la longueur (ex. sur le profil longitudinal). Ici, le fait que des taches soient visibles s'apparentent plutôt à des phénomènes observés sur des lacs ou des étangs, c'est-à-dire des étendues d'eau stagnantes.

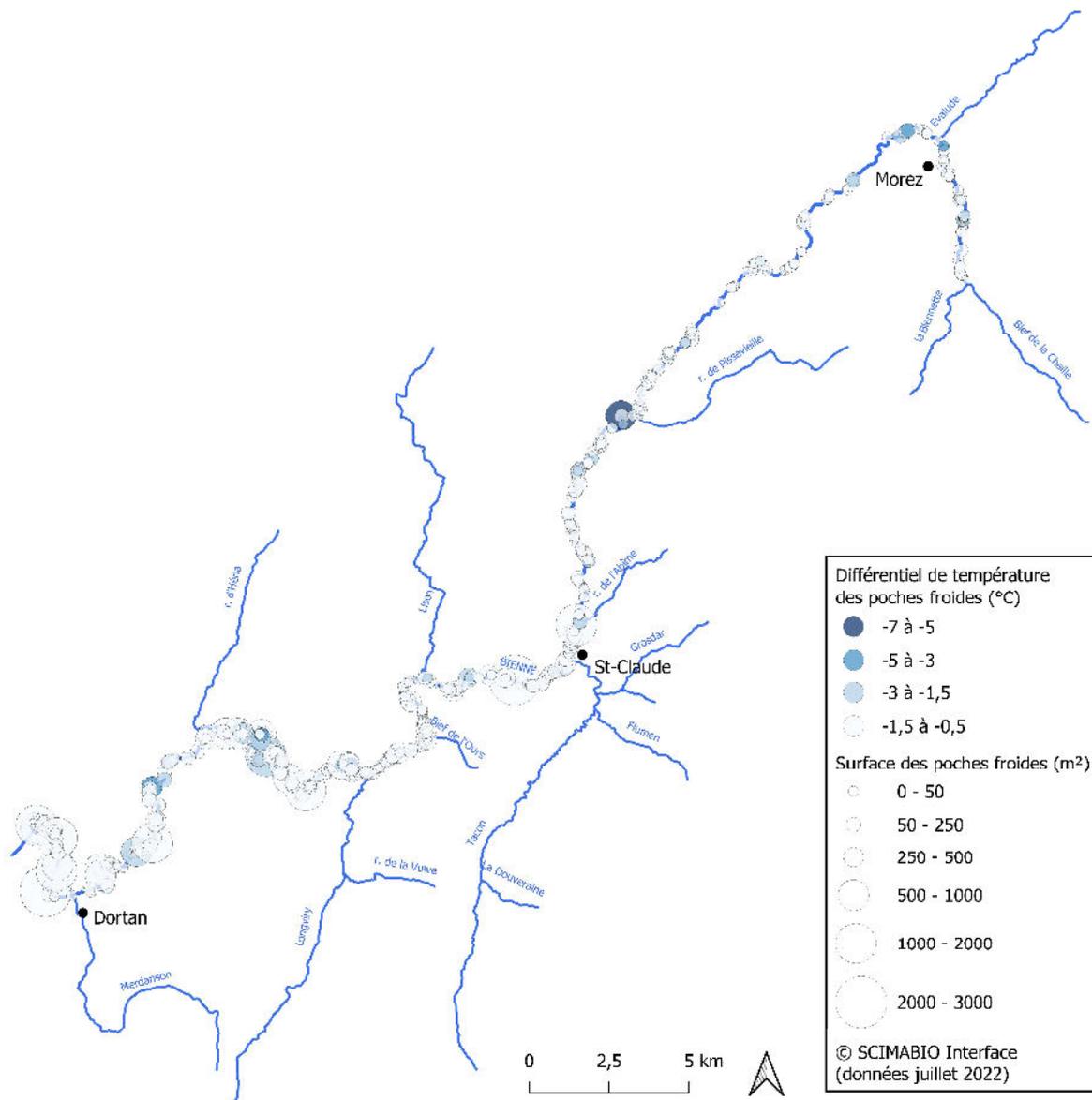


Figure 34 : Répartition des poches froides sur le linéaire de la Bienne en fonction de leur taille (superficie en m²) et de la différence de température médiane entre la poche froide et le tronçon de la rivière.

La grande majorité des poches froides recensées ont des superficies faibles, entre 1 et 3m². Cependant, on dénombre une quantité non négligeable de poches froides ayant des superficies de plusieurs dizaines de m². Ainsi 125 poches froides présentent une taille supérieure à 50m² (figure 35).

En ce qui concerne le différentiel thermique entre les poches froides et la rivière, 78 % des poches froides montre un différentiel inférieur ou égal à -1°C. Environ 17 % montre un différentiel compris entre -1°C et -2°C. Moins de 10 poches froides présentent un différentiel supérieur à -3°C avec la rivière (figure 36). Parmi les taches froides de grande taille, seules 14 présentent un différentiel thermique supérieur à -2°C.

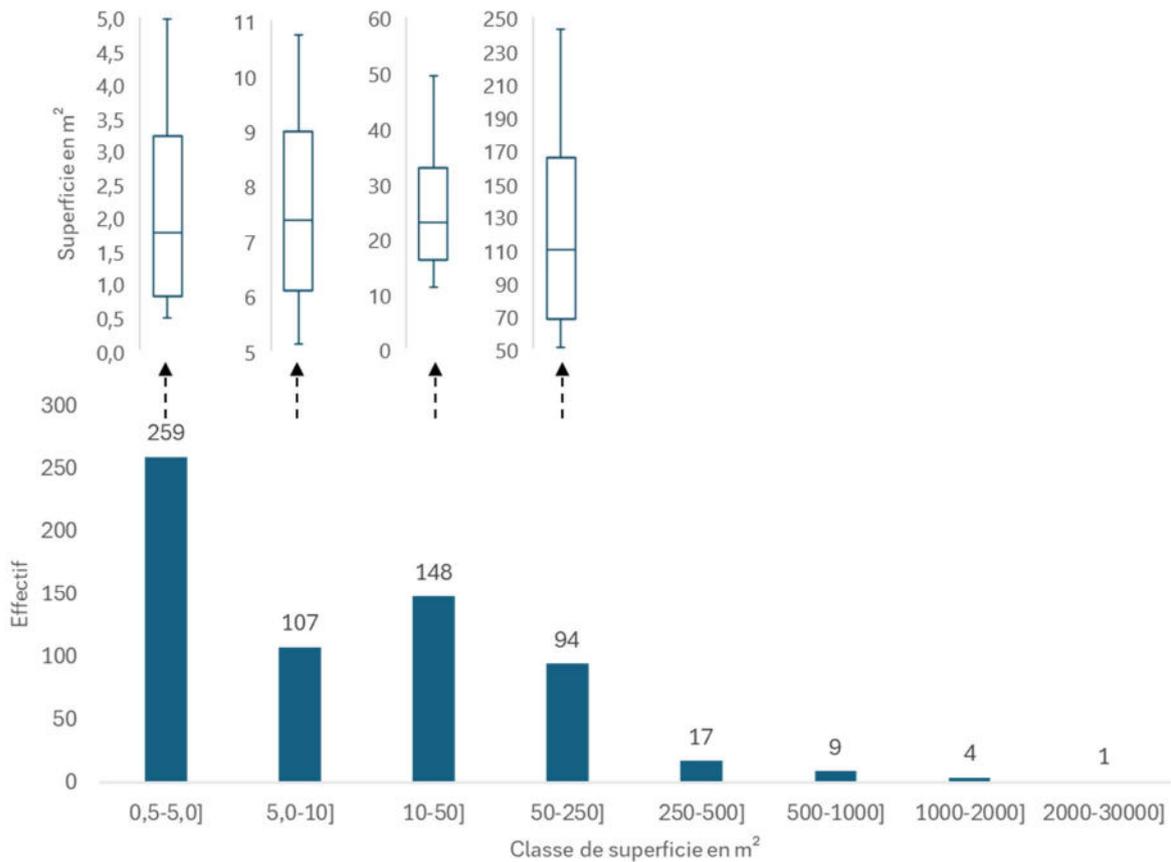


Figure 35 : Distribution des poches froides en fonction de leur taille (superficie en m²).

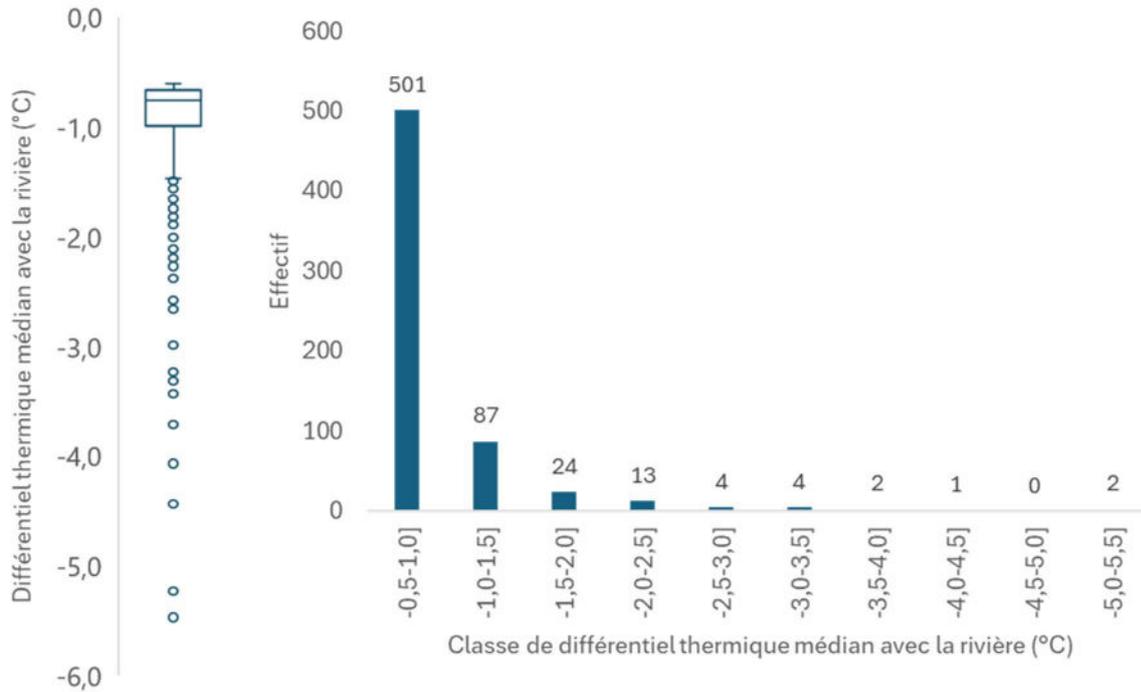


Figure 36 : Distribution des poches froides en fonction de leur différentiel thermique avec la température médiane de la rivière.

Sur les 14 poches froides les plus étendues, plus de 500m², 9 présentent des différentiels de température faible autour de -1°C, 2 présentent des amplitudes autour de -2 °C à -2,5°C par rapport à la température médiane de la rivière et une présente un fort différentiel de -5,5°C (figure 37). Ensuite la majorité des poches froides qui présentent des différentiels de plus de -3°C sont de faibles superficies mais 5 d'entre elles présentent des tailles respectables entre 100 et 250 m² (figure 37).

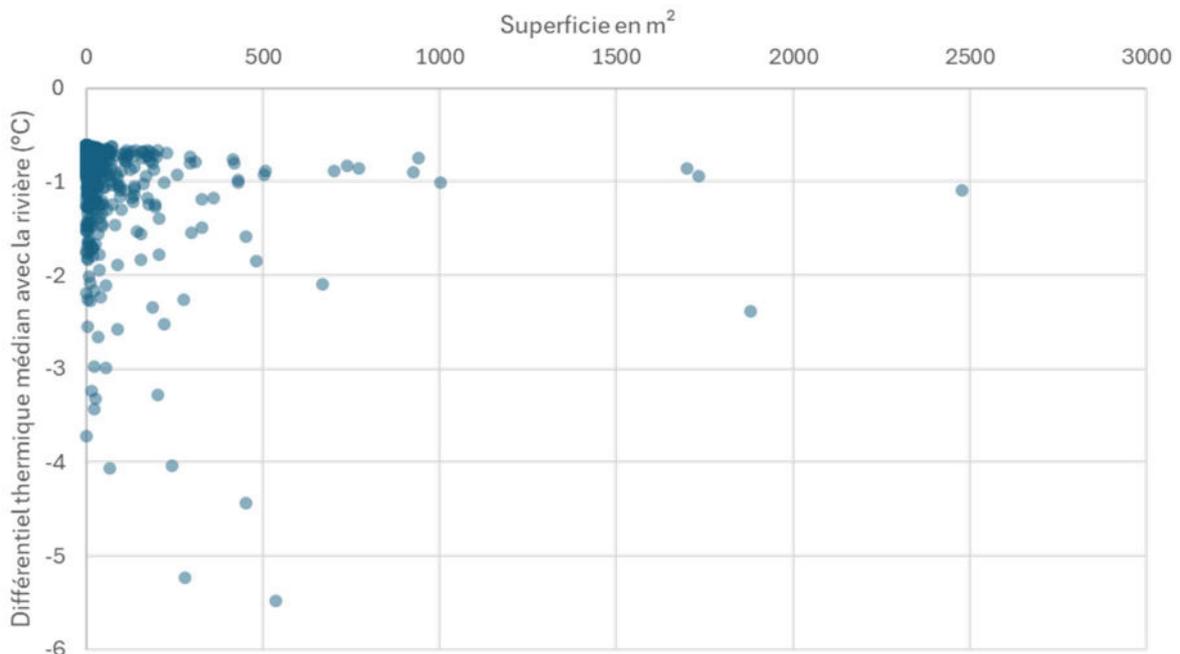


Figure 37 : Répartition des poches froides en fonction de leur différentiel thermique avec la température médiane de la rivière et de leur superficie en m².

3.4.2 Les apports majeurs d'eau froide

Même si chacune des poches froides identifiées est importante et que c'est bien l'ensemble de ces poches qui collectivement joue un rôle de catalyseur thermique permettant de réduire la température de l'eau ou de la stabiliser, certaines zones présentent des apports majeurs, qui influencent le profil thermique longitudinal de la Bienne, peuvent être identifiées. Ainsi, 9 zones d'apports majeurs d'eau froide ont été recensées (figures 41 et 42, tableau 2).

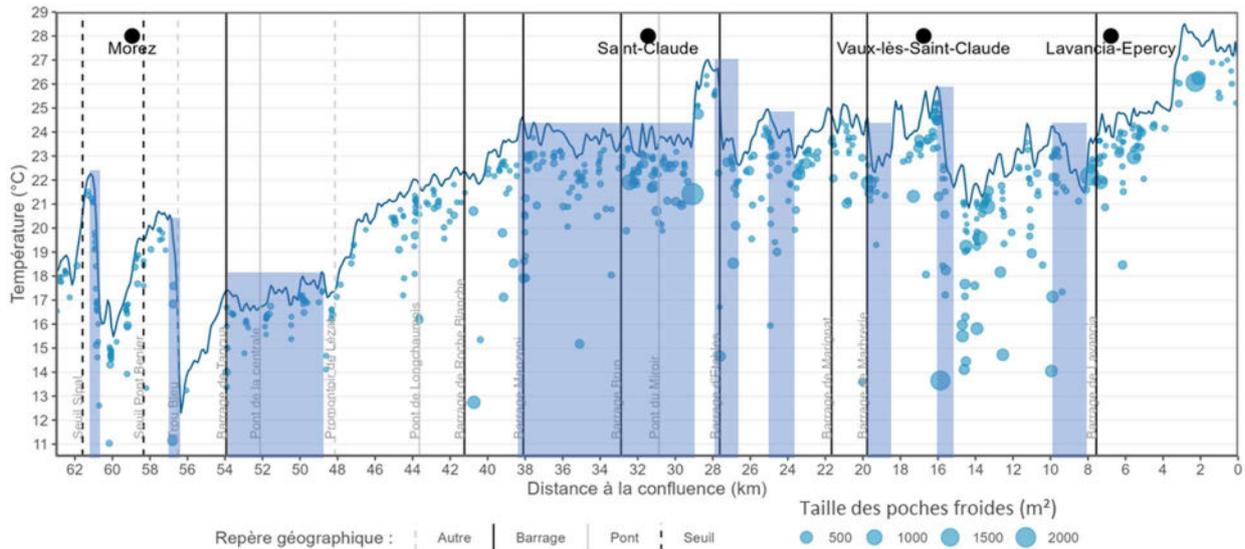


Figure 38 : Localisation sur le profil thermique des neuf zones d'apports majeurs d'eau froide recensées sur la Bienne.

Code Pt froid	T° Médiane Amt (°C)	T° Médiane avl (C°)	$\Delta T^{\circ}C$ (Médiane)	T°Min poche froide	PK Amt (km)	PK Avl (km)	Linéaire (km)	Gradient (T°C.km ⁻¹)	Description
F_Bi1	22,3	15,5	-6,8	12,6°C	61,2	60	1,2	-5,7	A partir du Pk 60,85, de nombreux apports d'eau froide sont présents sur plusieurs centaines de mètres puis la restitution de la résurgence de l'Arce (captée pour AEP) au Pk 60,1 représente un apport essentiel. Elle permet de faire diminuer nettement la température médiane de l'eau qui dépassait déjà les 22°C en amont et de limiter son réchauffement en aval en la maintenant en deçà de 20°C sur 3 km de linéaire.
F_Bi2	20,5	12,3	-8,2	11,1°C	57	56,4	0,6	-13,7	La résurgence du Trou Bleu représente un apport d'eau froide essentiel pour la Bienne. Elle permet de faire baisser quasi instantanément la température médiane de -8°C. Cette résurgence influence la température de l'eau sur 10km, il faut attendre le Pk 46,6 pour retrouver une température médiane équivalente à celle de l'amont du Trou Bleu.
F_Bi3	17,4	17,3	-0,1	13,3°C	54	48,2	5,8	0,0	Sur ce linéaire de près de 6km la température médiane reste stable entre 16,5 et 17,5°C grâce à des apports hyporhéiques nombreux. Notamment à l'aval immédiat du barrage de Tancua, des résurgences en rive gauche permettent un refroidissement significatif.
F_Bi4	24,6	23,4	-1,2	15,1°C	38,1	29,1	9	-0,1	Sur ce linéaire la température médiane n'augmente plus sur 9km jusqu'au remous thermique formé par la retenue d'Etable et oscille entre 23 et 24°C. Cette stabilité s'explique grâce à des petits apports hyporhéiques présents tout le long du linéaire et aux confluences du ruisseau de l'Abîme et du Tacon qui apportent des eaux plus fraîches.
F_Bi5	25,8	22,6	-3,2	14,6°C	27,6	26,6	1	-3,2	Sur le premier km du tronçon court-circuité en aval du barrage d'Etable, plusieurs résurgences latérales en rive droite permettent de refroidir l'eau venant du barrage.
F_Bi6	24,1	23,3	-0,8	19,9°C	24	23,3	0,7	-1,1	Sur quelques centaines de mètres en amont de la centrale hydro-électrique de porte Sachet, plusieurs apports hyporhéiques viennent stopper le réchauffement observé en amont et réduire légèrement la température médiane de la rivière.
F_Bi7	24,6	22,6	-2	21,4°C	19,8	18,9	0,9	-2,2	Sur quelques centaines de mètres en aval du barrage de Molinges, plusieurs apports hyporhéiques permettent de réduire la température médiane de la rivière.
F_Bi8	25,9	20,8	-5,1	13,6°C	16	14,3	1,7	-3,0	En aval du Gour aux Moines, plusieurs résurgences majeures permettent sur un faible linéaire de faire baisser de 5°C la température médiane de la rivière. Le réchauffement en aval reste également contenu sur 1 km par d'autres apports hyporhéiques.
F_Bi9	24	21,5	-2,5	17,3°C	9,6	8,3	1,3	-1,9	En amont du remous thermique formé par la retenue de Lavancia, plusieurs apports hyporhéiques sur un peu plus d'1km permettent des apports d'eau plus froide.

Tableau 2 : Caractéristique et description des apports majeurs d'eau froide recensés sur la Bienne.

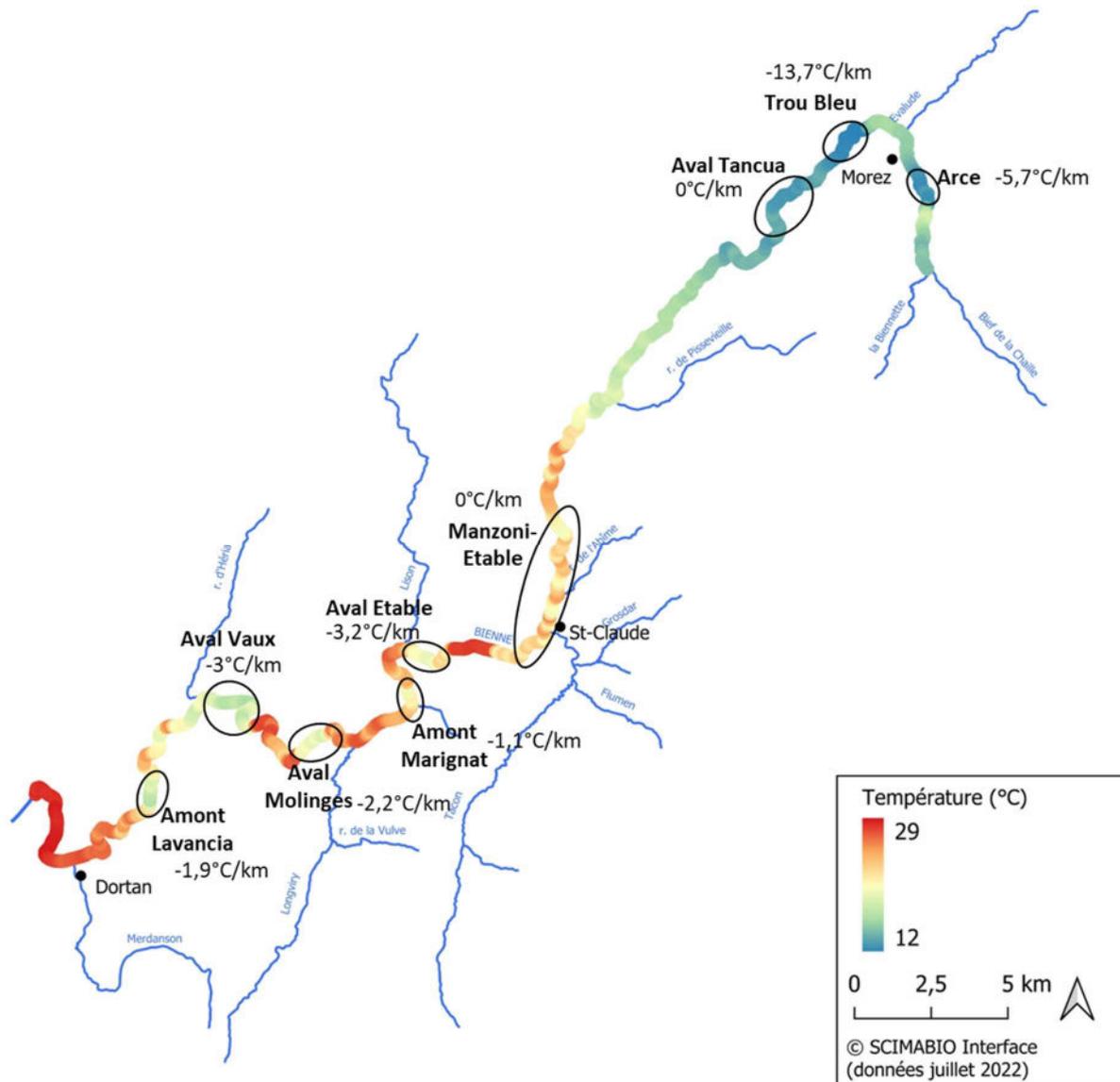


Figure 39 : Localisation sur le profil thermique des neuf zones présentant des apports majeurs d'eau froide sur la Bienne.

3.4.3 Cartographies thermiques détaillées des apports d'eau froide

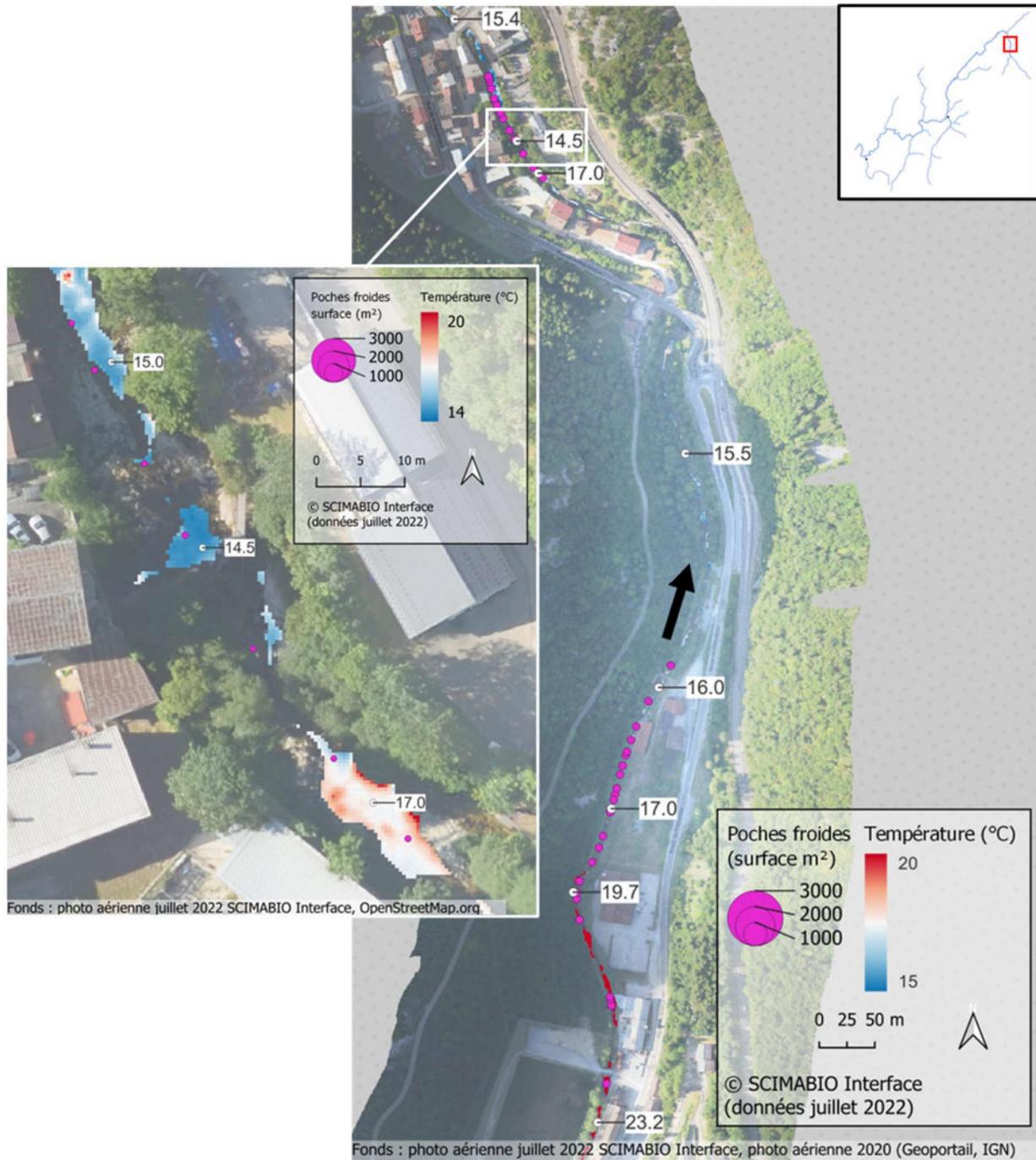
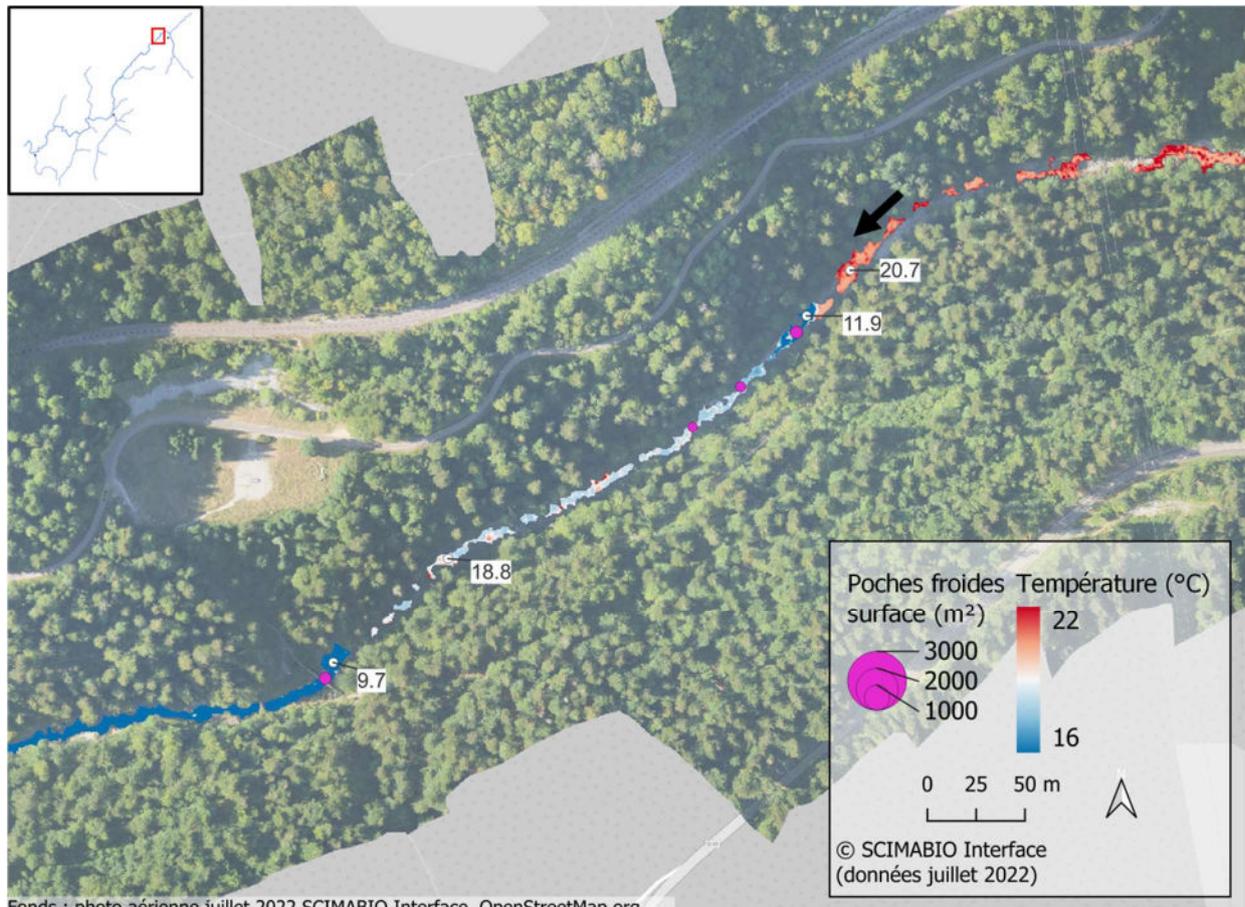


Figure 40 : Mosaïque thermique et orthophoto illustrant le refroidissement observé à partir du Pk 60,85 et au niveau de la restitution du captage AEP de l'Arce (Zoom).



Fonds : photo aérienne juillet 2022 SCIMABIO Interface. OpenStreetMap.org

Figure 41 : Mosaïque thermique et orthophoto illustrant le refroidissement au niveau du Trou Bleu. NB : la tache froide relative à la résurgence du Trou Bleu apparaît d'une taille relativement modeste puisque, très rapidement, ses apports modifient radicalement la température de l'ensemble de la masse d'eau.

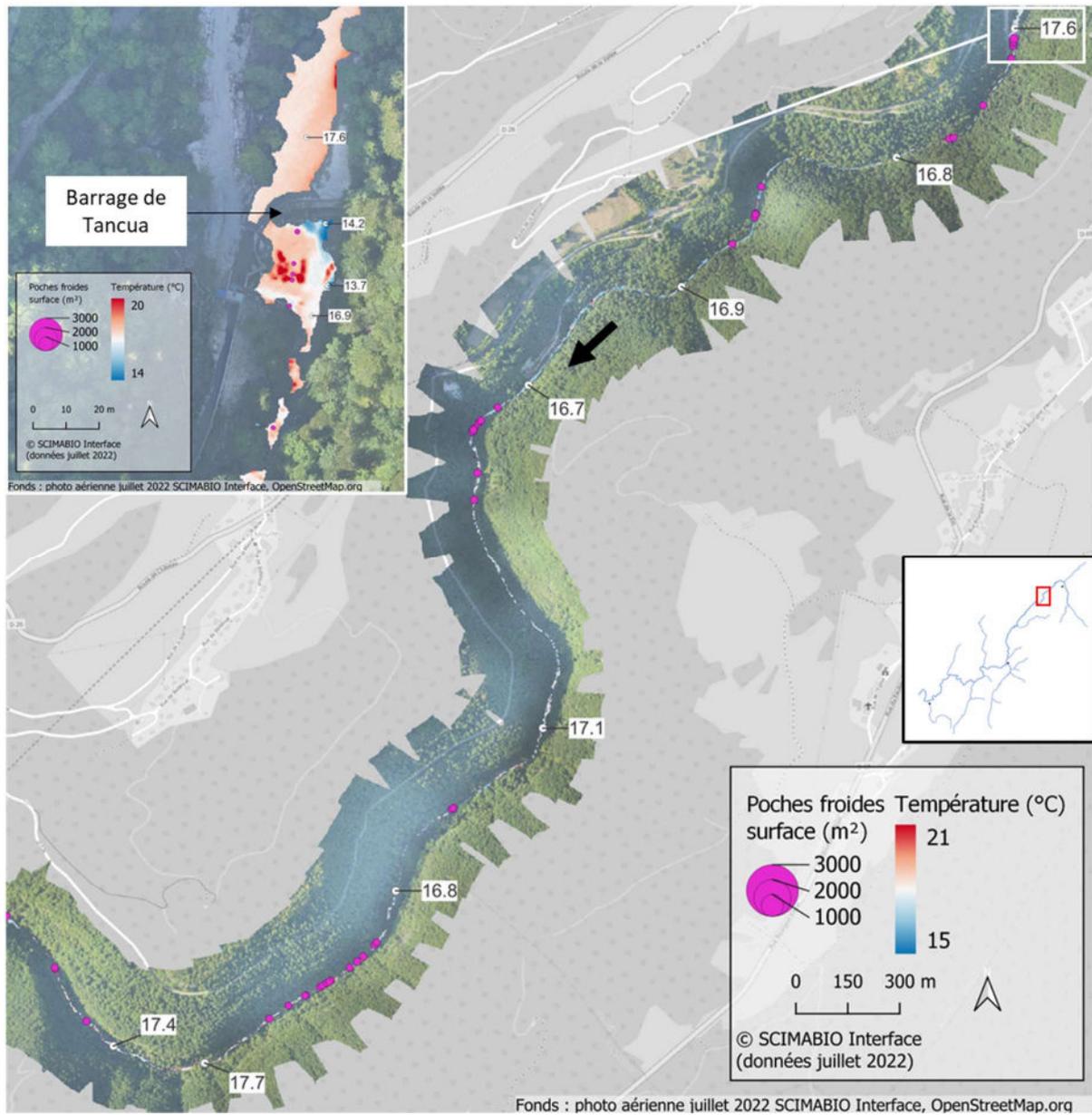


Figure 42 : Mosaïque thermique et orthophoto illustrant les apports hyporhéiques permettant de refroidir la température de l'eau restituée par la retenue de Tancua et de la stabiliser sur 6km en aval avec un zoom sur l'aval immédiat du barrage de Tancua.

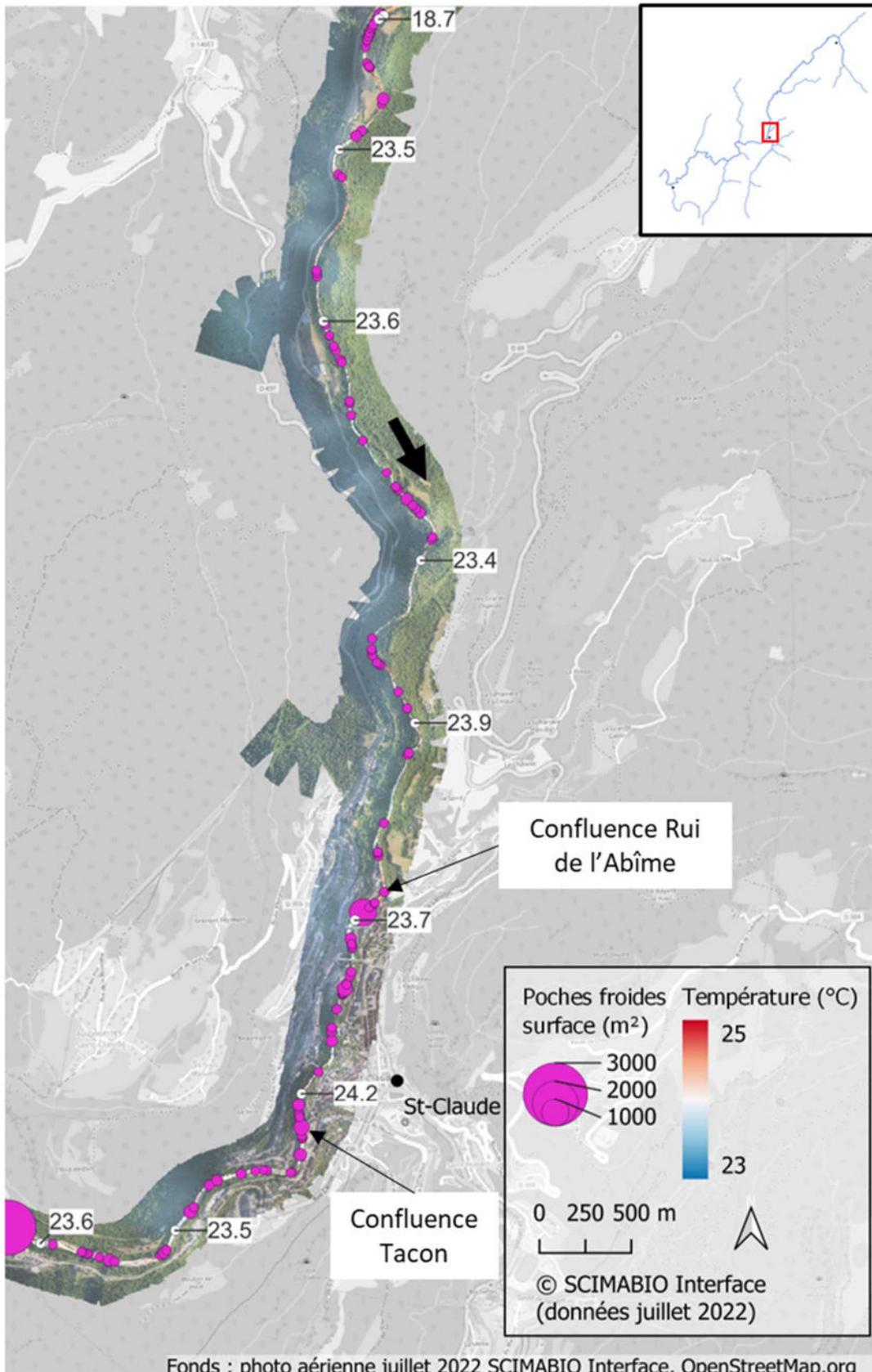


Figure 43 : Mosaïque thermique et orthophoto illustrant les nombreux apports hyporhéiques entre le barrage Manzoni et la retenue qui permettent de stabiliser la température de l'eau sur 9km.

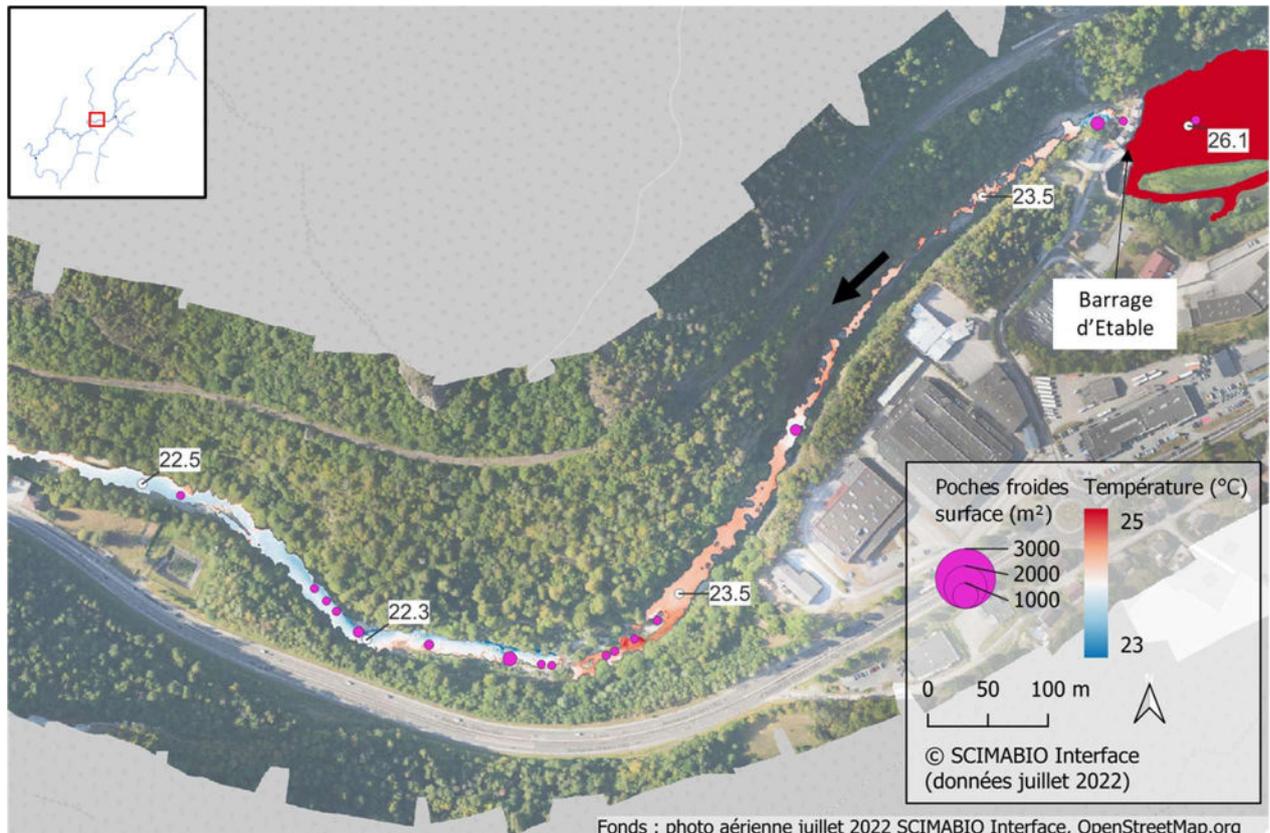


Figure 44 : Mosaïque thermique et orthophoto illustrant les apports hyporhéiques en rive droite situés à l'aval du barrage d'Étable.

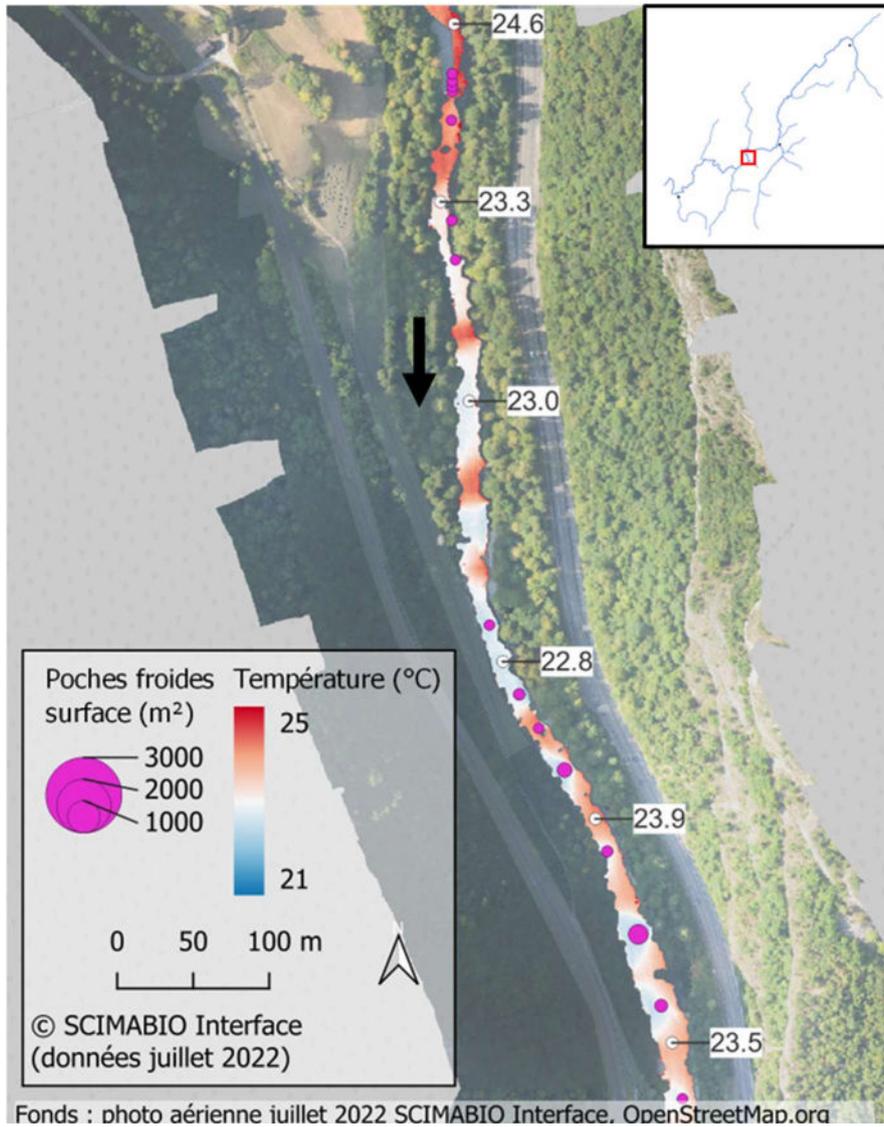
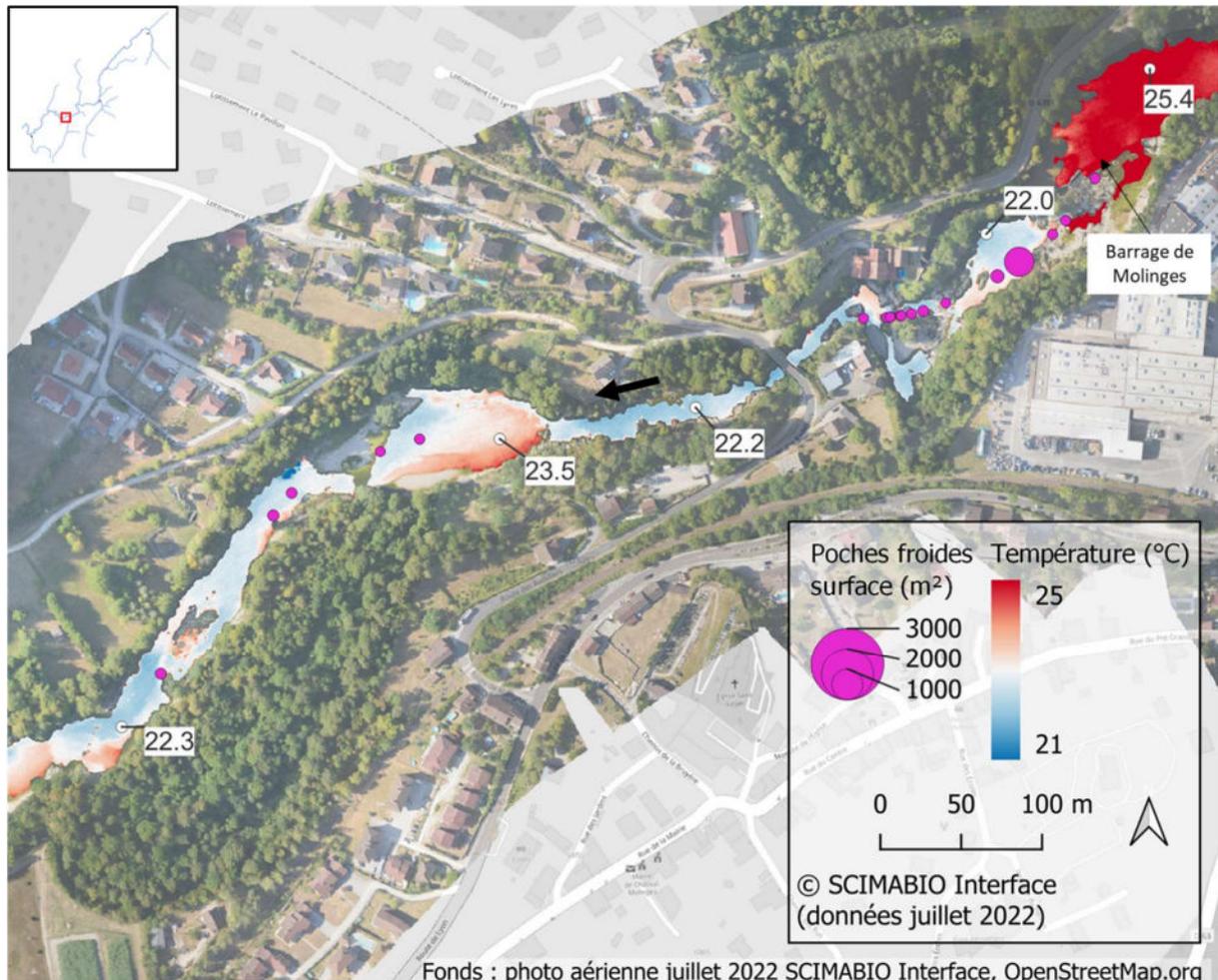


Figure 45 : Mosaique thermique et orthophoto illustrant les apports hyporhéiques dans le Tronçon court-circuité du barrage d'Etable en amont immédiat de la centrale hydroélectrique de Porte Séchet.



Fonds : photo aérienne juillet 2022 SCIMABIO Interface, OpenStreetMap.org

Figure 46 : Mosaïque thermique et orthophoto illustrant les apports hyporhéiques permettant de refroidir la température de l'eau en aval du barrage de Molinges.

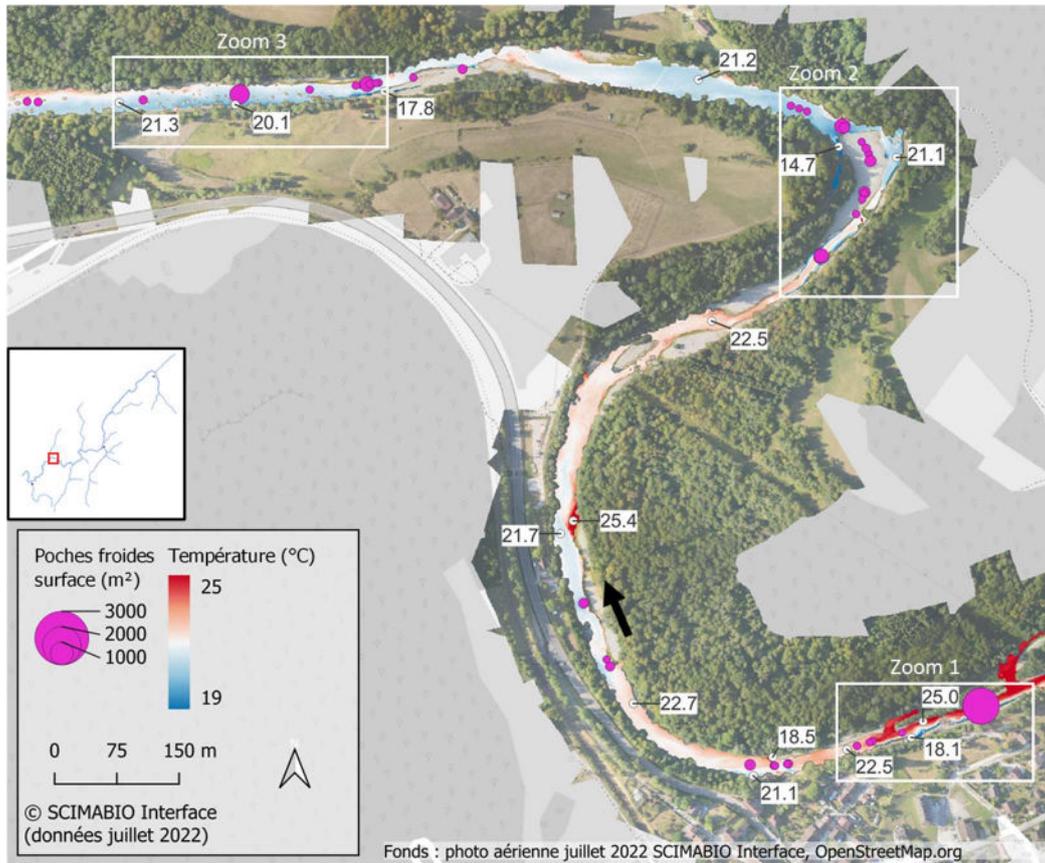


Figure 47 : Mosaïque thermique et orthophoto illustrant les résurgences majeures identifiées en aval de Vaux-lès-Saint-Claude.

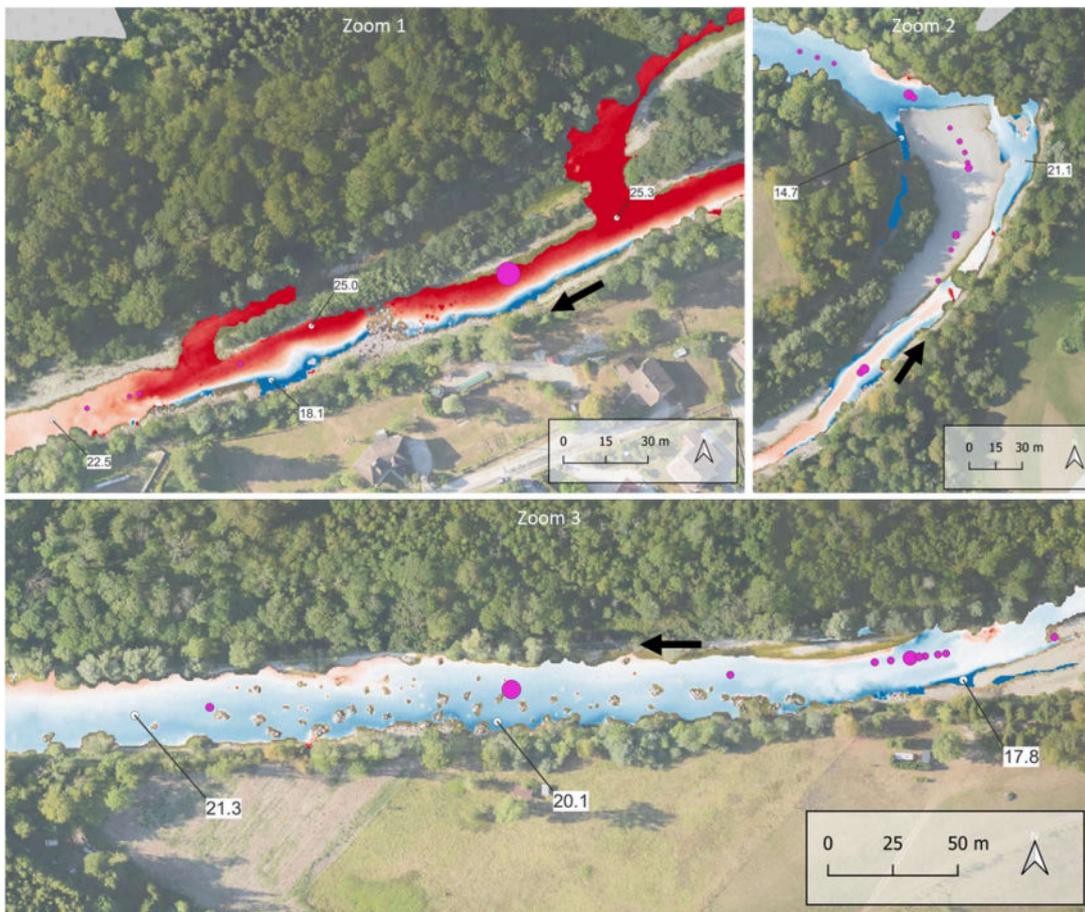


Figure 48 : Zoom sur 3 zones de résurgences identifiées en aval de Vaux-lès-Saint-Claude.

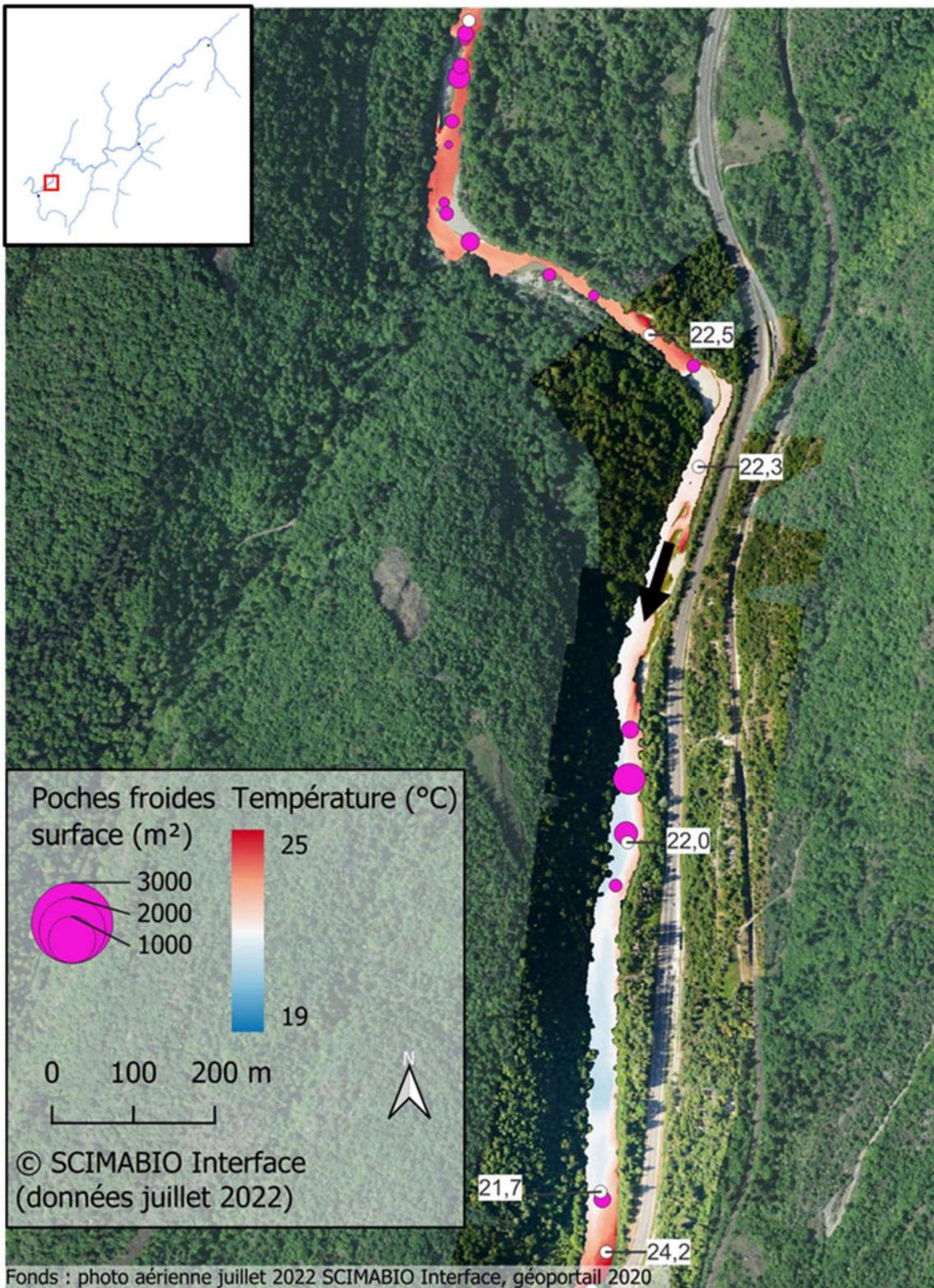


Figure 49 : Mosaïque thermique et orthophoto illustrant La zone de refroidissement observée en amont de la retenue de Lavancia.

3.5 Interprétation hydrogéologique et hydromorphologique des poches froides

Le nombre de poches froides et les écarts de température avec la rivière montrent des variations le long du linéaire (figures 33 et 34). De manière générale, les poches dont les écarts de température sont importants illustrent des arrivées phréatiques ou karstiques, voire des affluents froids (eux-mêmes alimentés par des apports phréatiques). A l'inverse, les poches dont l'écart de température avec la masse d'eau est moins important sont caractéristiques d'échanges hyporhéiques, d'un « recyclage local » des eaux de surface ou d'apports surfaciques (zones humides, bras secondaires, voire rejets plus ou moins naturels).

Le secteur de Morez, jusqu'au Trou Bleu, montre un faible nombre de poches froides avec des surfaces limitées, mais dont certaines présentent un écart thermique important avec la rivière. Ces observations peuvent s'expliquer par (1) des températures médianes qui ne sont pas encore très élevées sur ce secteur amont, ce qui fait que les contrastes entre les zones froides et la masse d'eau sont moins marqués ; et (2) par les caractéristiques morphologiques de la vallée au niveau de Morez. Le village est situé entre deux « verrous géologiques » ; la vallée y est un peu plus ouverte et les échanges avec la nappe probablement plus importants qu'en amont (cf. le nombre de puits et forages autour de Morez).

Dans les gorges, sur environ 14km en aval du Trou Bleu, les poches froides se révèlent moins nombreuses et présentent des écarts thermiques moins importants jusqu'au barrage de Roche Blanche. La vallée y est très encaissée et peu large, l'espace disponible pour des échanges y est donc limité. De plus, l'eau est fortement refroidie par la résurgence karstique froide (~8°C) du Trou Bleu et la vallée est protégée des rayonnements solaires par la topographie et la ripisylve.

Du barrage de Roche Blanche jusqu'à Vaux-lès-Saint-Claude, les poches froides sont plutôt denses et régulièrement réparties sur le linéaire avec notamment plusieurs d'entre elles qui montrent des écarts de températures importants avec la rivière (jusqu'à -9°C). Ces apports relativement froids jouent probablement un rôle non négligeable pour tamponner l'échauffement régulier observé entre le km 47 et le km 42 (figure 33).

Sur plusieurs km en aval de Vaux-lès-Saint-Claude, la Bienne bénéficie de nombreux apports d'eau froide dont des résurgences karstiques qui permettent de baisser d'environ 5°C la température médiane de la rivière et de ralentir ensuite son réchauffement.

A partir de la retenue de Lavancia, les poches froides restent nombreuses mais leurs tailles sont limitées et leurs températures relativement élevées ($\geq 21^\circ\text{C}$).

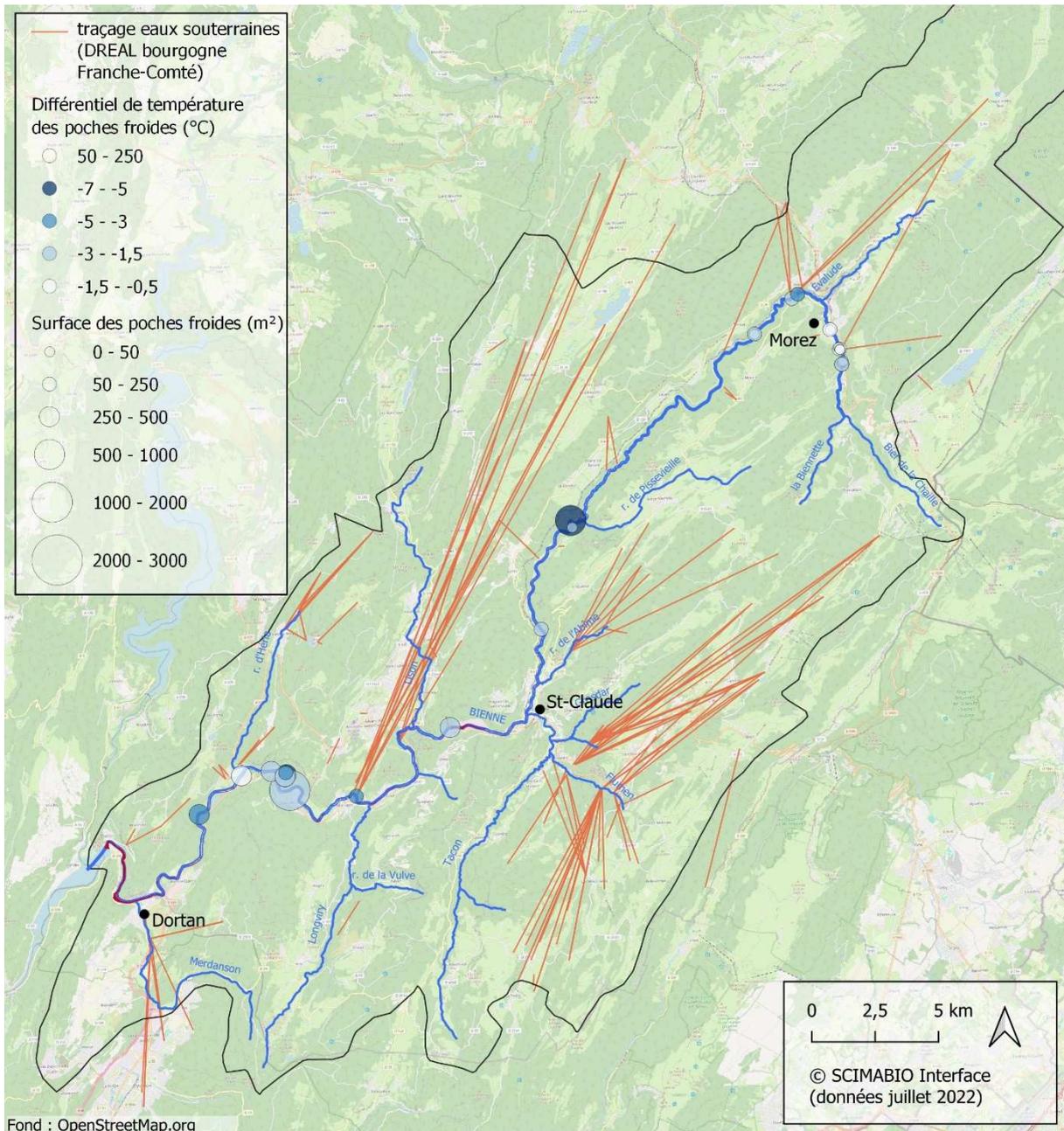


Figure 50 : Cartographie des poches froides d'eau souterraine (présentant une température minimale de résurgence inférieure ou égale à 16°C) et traçages connus sur le bassin de la Bienne.

3.6 Variations spatio-temporelles des habitats thermiques vis-à-vis des salmonidés

Pour interpréter les conditions d'habitat thermique sur la Bienne vis-à-vis des salmonidés, les données spatiales obtenues par IRT-a ainsi que les données temporelles collectées par les 14 enregistreurs thermiques au cours de l'été 2022 (données FDPMA 39/PNRHJ) ont été confrontées aux exigences écologiques de la truite commune.

Au niveau spatial, le profil thermique obtenu par IRT-a le 21 juillet 2022 montre que la majorité du linéaire se situe au-dessus de 19°C, c'est-à-dire dans des conditions de stress physiologique pour la truite (figure 53, tableau 3). Seul 8% du linéaire montre des conditions thermiques dans l'optimum écologique en dessous de 17°C et 11% montre des températures médianes supérieures à 25°C, valeur considérée comme l'étal pour l'espèce.

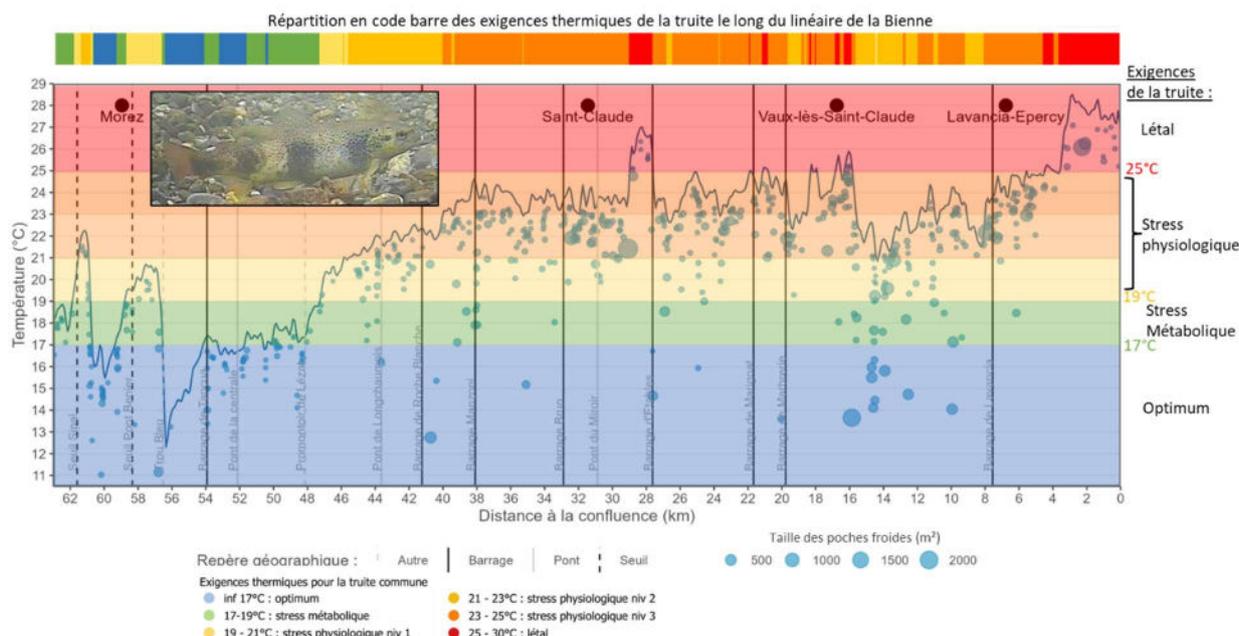


Figure 51 : Confrontation du profil thermique obtenu par IRT-a aux exigences thermiques de la truite commune et retranscription en code barre des exigences le long du linéaire de la Bienne.

$\leq 17^\circ\text{C}$	Optimum	8,6%	
17-19°C	Stress métabolique	11,1%	
19-21°C	Stress physiologique	6,8%	69,2%
21-23°C		20,4%	
23-25°C		42,0%	
>25°C	Létal	11,1%	

Tableau 3 : Pourcentages du linéaire de la Bienne correspondant aux différentes exigences thermiques de la truite commune calculés à partir des températures médianes par tronçon de 100m. Le code couleur des différentes gammes de température est identique à celui utilisé dans la figure 53.

Les conditions thermiques dépassent rapidement les 17°C puis les 19°C dès l’amont de la Bienne. Ce sont les apports majeurs des résurgences de l’Arce puis du Trou Bleu qui permettent de revenir à des conditions plus favorables pour la truite, puis la forme de la vallée et l’ombrage (à la fois topographique et rivulaire) permet de les maintenir sur un certain linéaire (figure 51 et 52).

A partir du barrage de Roche Blanche, soit sur environ 65% du linéaire de la Bienne, les températures médianes restent au-dessus de 23°C provoquant des conditions de stress physiologique pour la truite. Entre Vaux-lès-Saint-Claude et Jeurre, la situation s’améliore légèrement avec des températures qui redescendent autour de 20°C grâce aux résurgences d’eau froide identifiées sur cette zone. Le rôle de ces résurgences froides sur des secteurs échauffés peut également être interprété au regard du comportement de thermorégulation des salmonidés (cf. §3.8.).

Ces données spatialisées représentent les conditions thermiques obtenues le jour du survol aux heures les plus chaudes, elles renseignent donc sur les conditions les plus impactantes pour les salmonidés.

Pour mieux apprécier les conditions thermiques auxquelles sont soumis les poissons pendant l’été, les variations des habitats thermiques au cours du temps ont été analysées à partir des données horaires des 14 enregistreurs thermiques répartis sur la Bienne (figure 52).

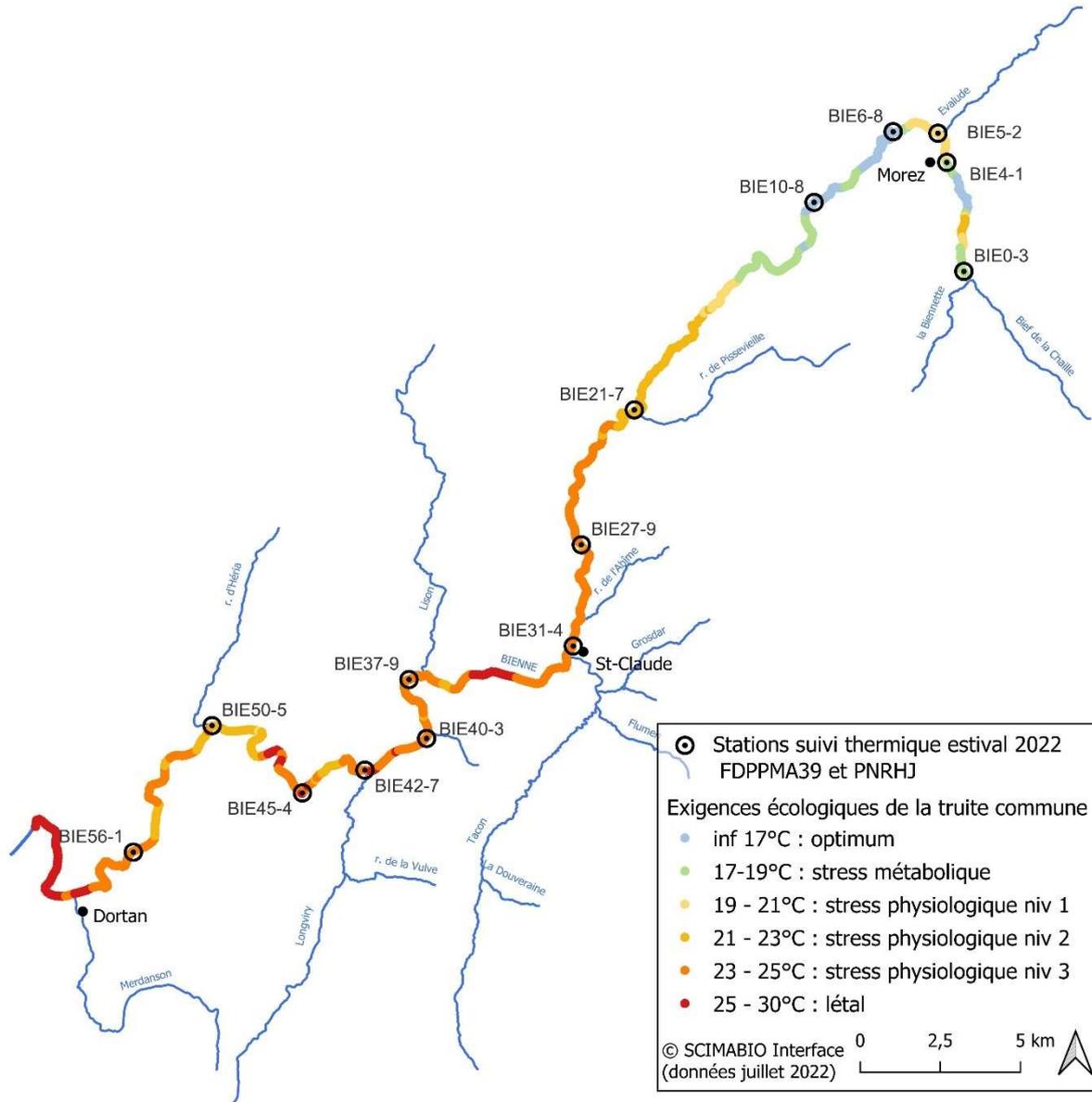


Figure 52 : Linéaire des exigences thermique de la truite commune et localisation des 14 enregistreurs thermiques utilisés pour l'analyse temporelle des conditions thermiques.

Dans un premier temps, la représentativité temporelle des données spatiale obtenues par IRT a été appréciée sur une petite échelle de temps en étudiant les variations thermiques journalières sur 3 jours autour de la date du survol. Les résultats indiquent que comme souhaité, le survol pour l'acquisition des données IRT a été réalisé au cours des heures les plus chaudes de la journée. Sur toutes les stations, les températures d'eau les plus élevées se situent en fin d'après-midi autour de 17-19 heures, et les plus faibles en début de matinée dans la tranche 8h-10h (figure 53).

A l'aval immédiat du Trou Bleu (BIE6-8), les températures restent tamponnées entre 11°C et 14°C. La station située 4km à l'aval du Trou Bleu (BIE10-8) et la station la plus amont (source de la Bienne) montrent des profils similaires variant entre 15°C et 19°C.

Les deux stations situées dans Morez (BIE4-1 et BIE5-2) montent au-dessus de 19°C pendant 6 à 8 heures consécutives au cours de l'après-midi puis redescendent jusqu'à 15°C au cours de la nuit, offrant ainsi plusieurs heures avec des conditions favorables pour la truite.

La station située entre Vaux-lès-Saint-Claude et Jeurre (BIE50-5), en aval des résurgences apportant des eaux froides, montre des températures relativement élevées, jusqu'à 22°C, en fin de journée mais

retrouve des températures plus clémentes pour la truite en fin de nuit et le matin (<16°C). Ces fortes variations journalières, sur ce secteur fortement influencé par la présence des résurgences, permettent aux truites de retrouver un habitat thermique favorable pendant plusieurs heures par jour. Elles démontrent également l'importance de ces résurgences sans lesquelles les températures maximales seraient probablement nettement plus élevées au pic de la journée.

La station située vers Roche Blanche (BIE21-7) présente des températures bien au-dessus de 19°C pendant la majorité de la journée avec des pics jusqu'à 22°C. Aux heures les plus froides, la température redescend juste quelques heures autour de 19°C ce qui met les truites dans des conditions limites par rapport à leurs exigences. Il est intéressant de noter également que c'est le secteur avec la plus grande inertie, c'est-à-dire où le cycle temporel est le plus décalé par rapport aux autres stations. Les valeurs maximums peuvent n'arriver que vers 20h, et les minimums parfois être observés autour de 10h (figure 53).

Sur les 7 autres stations qui concernent le linéaire entre Roche Blanche et Vaux-lès-Saint-Claude, et le linéaire aval Lavancia (de BIE27 à BIE56), les températures restent au-dessus de 19°C toute la journée et présentent même des températures supérieures à 22°C pendant plusieurs heures par jour. Sur ces secteurs, les poissons ne retrouvent plus de conditions adéquates au cours de la journée.

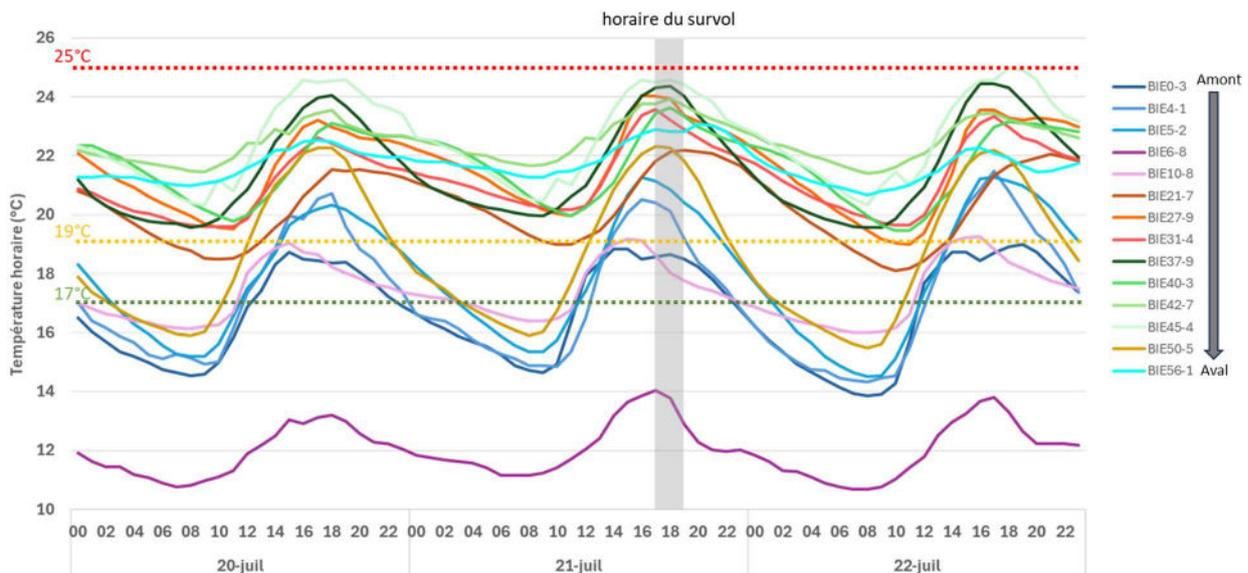


Figure 53 : Données de températures horaires sur les 14 stations suivies au cours de l'été 2022 autour de la date du survol réalisé pour l'IRT (données FDPPMA39/PNRHJ).

Dans un deuxième temps, les conditions thermiques pour la truite ont été évaluées sur l'ensemble de la période la plus chaude, à savoir du 15 juin au 31 août (figure 54).

Il ressort que sur les 15 km amont de la Bienne depuis les sources jusqu'au lieu-dit Lézat, les conditions thermiques estivales restent favorables ou acceptables pour la truite. D'une part, les deux résurgences majeures de l'Arce et du Trou Bleu apportent des eaux froides qui permettent de maintenir des bonnes conditions sur des linéaires importants et d'autre part sur les autres secteurs moins favorables, les cycles thermiques journaliers permettent aux poissons de retrouver des températures plus fraîches pendant plusieurs heures tous les jours.

Par contre, à partir de Roche Blanche et jusqu'au gour aux Moines, soit sur un linéaire de 32 km, les habitats thermiques sur le plan spatial et temporel sont nettement en décalage avec les exigences de la truite. Notamment, le mois de juillet présente des conditions difficiles avec des températures supérieures à 17°C au moins 70% du temps. Sur de nombreux secteurs, les températures sont supérieures à 19°C pendant la majorité du temps et ne redescendent pas en dessous pendant plusieurs jours consécutifs (figures 55 et 56). Par exemple, au niveau de Molinges la température de l'eau peut rester au-dessus de 19°C pendant 35 jours consécutifs (figure 55). Sur tout ce linéaire l'accès des

poissons à des poches plus froides, pouvant servir de refuges thermiques, apparaît donc essentiel pour leur permettre de survivre pendant la période estivale.

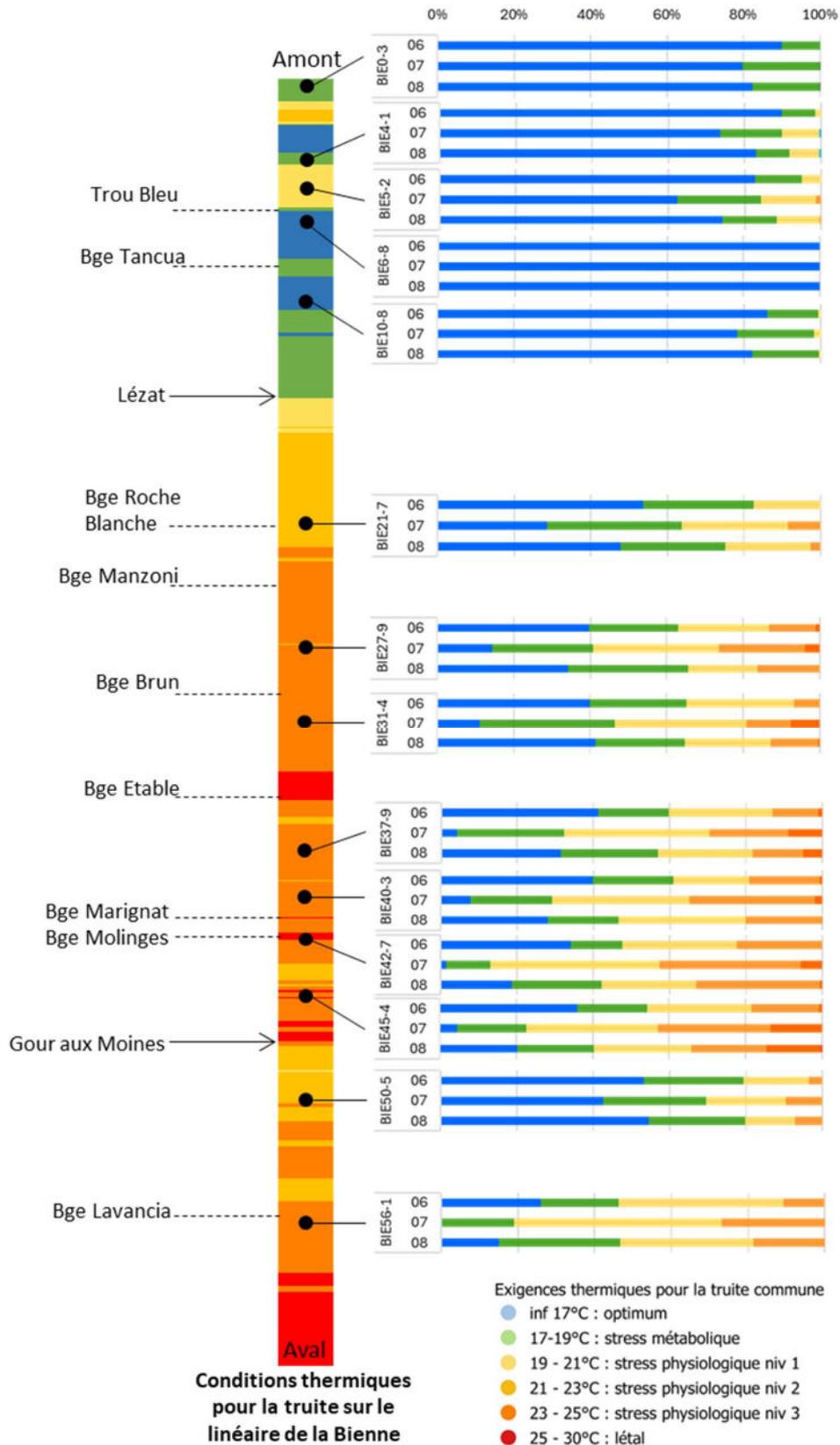


Figure 54 : Répartition spatio-temporelle des conditions d'habitats thermiques pour la truite sur la Bienne. Le code barre au centre représente les linéaires des différentes exigences écologiques pour la truite obtenus par IRT. Les graphiques à droite indiquent pour chacun des 14 enregistreurs thermiques (données FDPMA39/PNRHJ) le pourcentage de temps des différentes exigences écologiques pour 3 mois du 15 juin au 31 août.

Ensuite, les résurgences majeures d’eau froide situées à l’aval de Vaux-lès-Saint-Claude permettent de retrouver des conditions globalement acceptables, bien que sub-optimales, pour les salmonidés jusqu’à Lavancia. Sur ce secteur, les températures maximales journalières restent élevées mais la présence des résurgences permet de réduire fortement la température médiane de la rivière, d’offrir des zones refuges plus fraîches pendant les heures les plus chaudes et de retrouver des températures sous le seuil de 19°C pendant plusieurs heures tous les jours.

Sur les 6km aval à partir de Lavancia, les conditions thermiques redeviennent majoritairement défavorables pour la truite.

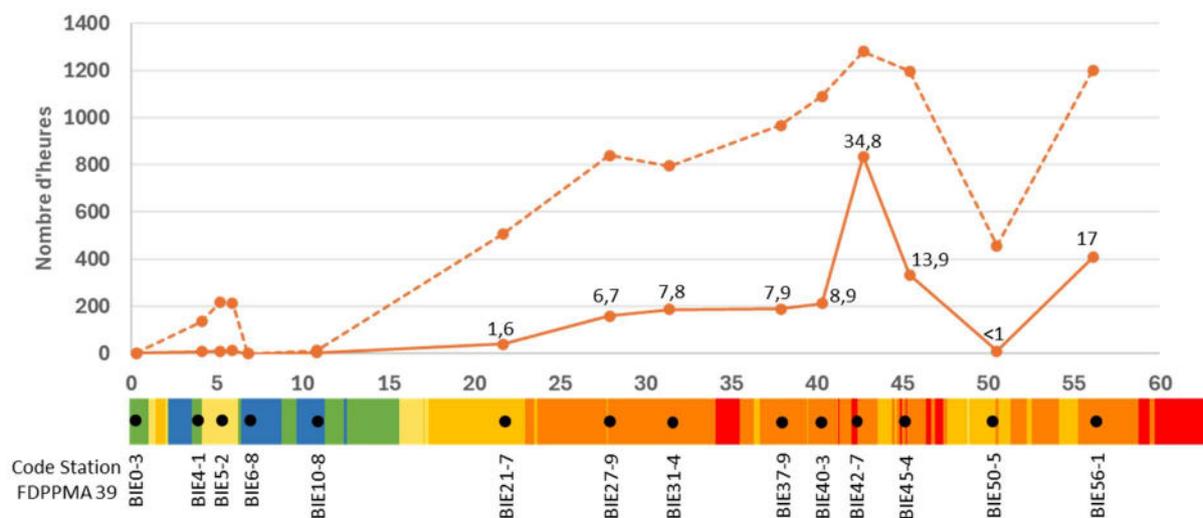


Figure 55 : Durée des températures d’eau supérieures ou égales à 19°C entre le 15 juin et le 31 août 2022 sur les 14 stations de suivi thermique réparties sur la Bienne (Données FDPPMA39/PNRHJ). Ligne pointillée = nombre total d’heures. Ligne pleine = durée de la plus longue période consécutive, le nombre indique la durée en jours.

3.7 Quelques données thermiques estivales sur les affluents

Plusieurs sondes thermiques ont été mises en place sur des affluents pour compléter les données estivales acquises sur la Bienne par la campagne IRT-a et le réseau d’enregistreurs thermiques existant.

Au total, 13 sondes ont été placées au mois de juin 2022 et récupérées au mois de septembre 2022 sur 11 affluents ou sous affluents différents : le Merdanson, l’Héria, le Bief d’Ours, le Longvirvry, le Lison, le Tacon, le Flumen, le Grosdar, l’Evalude, la Biennette et le Bief de Chailles. Au final, 10 stations ont présenté des données exploitables, 3 n’ont pas pu être exploitées à cause soit de la perte ou de la mise hors d’eau des sondes (figure 56).

Seules les données enregistrées sur les deux mois complets de juillet et août 2022 ont été utilisées afin de caractériser les conditions thermiques pendant les deux mois d’été les plus chauds.

Thermographes été 2022

⊙ Bienne (source : FD39)

Affluents (source : SCIMABIO interface, PNRHJ)

- Exploitable
- Non Exploitable

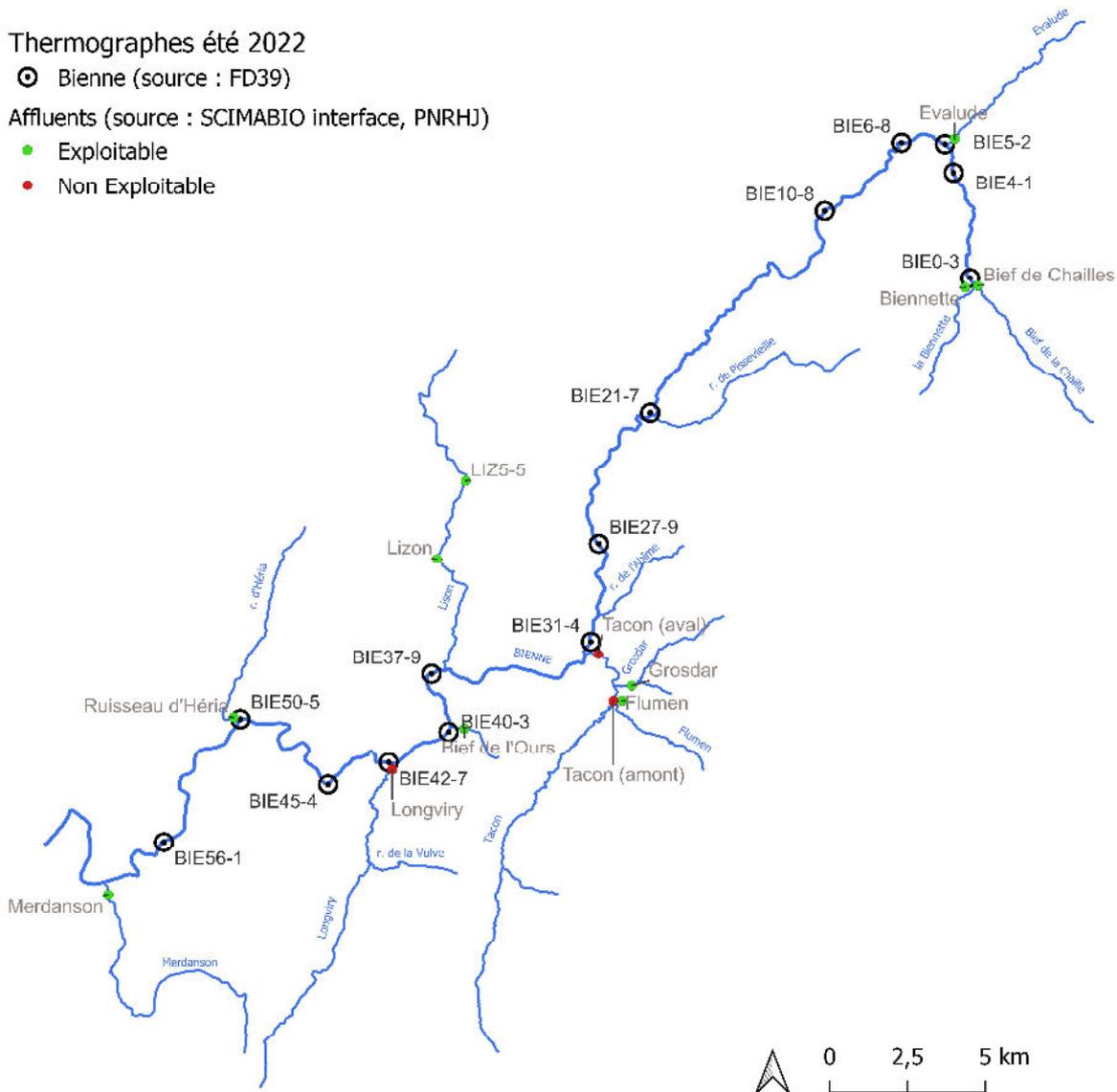


Figure 56 : Localisation des stations de suivi thermique sur les affluents et le cours principal de la Bienne mises en place pendant l'été 2022.

La majorité des stations (7/10) montre des températures moyennes journalières plutôt faibles qui restent dans le préférendum de la truite, en dessous de 19°C, voire dans l'optimum, en dessous de 17°C (figure 57).

Sur le Lison, les résultats montrent que les conditions deviennent défavorables aux salmonidés en aval des lacs de Ravilloles et Cuttura. En amont des lacs, les températures moyennes journalières sont entre 5°C à 7°C plus faibles qu'à l'aval des lacs où elles présentent des valeurs très élevées comprises entre 20 et 24°C. L'augmentation brutale et anormale de la température sur ce cours d'eau encaissé et boisé peut être imputée à la présence de ces plans d'eau formés par des barrages.

L'Héria et l'Evalude montrent des températures moyennes journalières plus élevées que sur les autres affluents, variant entre 16°C et 22 °C au cours de l'été.

Sur le système du Tacon, le Grosdar et le Flumen montrent tous les deux des températures estivales tamponnées avec des moyennes journalières variant entre 12°C et 15°C. Ces résultats montrent le potentiel de ces deux cours d'eau pour maintenir des conditions thermiques favorables à la truite. Malheureusement, l'absence de données sur le Tacon ne permet pas de connaître l'influence de ces affluents sur la température du Tacon.

Le cours aval du Merdanson, situé sur l'extrême aval du bassin de la Bienne, se caractérise par des valeurs tamponnées autour de 12-14°C, ce qui semble logique au vu de la résurgence karstique qui l'alimente (figure 50).

Sur l'amont du bassin, le Bief de Chailles présente des températures moyennes journalières de 2 à 3°C inférieures à celles de la Biennette.

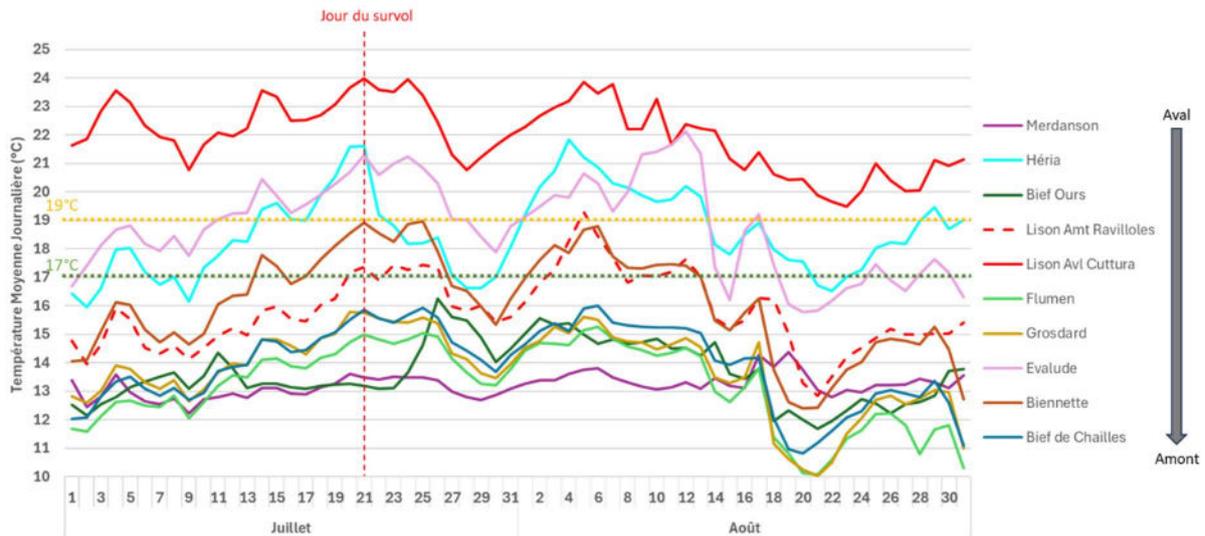


Figure 57 : Coubes des températures moyennes journalières du 01 juillet au 31 août 2022 sur les 10 affluents suivis.

3.8 Refuges thermiques et refuges climatiques potentiels pour les salmonidés

Pour notre travail qui s'inscrit dans le cadre de l'identification à l'échelle de la rivière des capacités de résilience et de diffusion de la biodiversité, il est important de distinguer les notions de refuge thermique et de refuge climatique.

Un refuge thermique constitue une zone où un nombre limité d'individus peut se concentrer pour échapper ponctuellement au stress physiologique provoqué par une élévation de température. Il intervient donc pour une utilisation à court terme et à une échelle spatiale limitée (Sullivan et al. 2021).

Un refuge climatique est considéré comme une zone où une population va être capable de se maintenir pendant une période durant laquelle les conditions de vie ne sont plus favorables ailleurs. Il intervient sur une échelle de temps de plusieurs générations et nécessite de disposer de l'ensemble des habitats nécessaires au maintien de populations entières (Isaak et Young, 2023). Ainsi sur la Bienne, les refuges climatiques peuvent être définis comme des linéaires de rivière qui seront moins impactés par les élévations de température liées au changement climatique et qui permettront à des populations de truites de se maintenir sur le long terme. Les données thermiques estivales disponibles concernent le cours principal de la Bienne plus quelques affluents. Sur les affluents, ces données ne sont pas suffisantes sur le plan spatial pour identifier précisément et exhaustivement les potentiels refuges climatiques.

3.8.1 Sur la Bienne

Toutes les poches d'eau froide recensées sur la Bienne par IRT-a ne peuvent être considérées comme des refuges thermiques pour les espèces de poissons thermosensibles comme la truite. En effet, pour être qualifié de refuge thermique, une poche froide nécessite de pouvoir exercer une fonction biologique de refuge pour les espèces considérées. Par exemple, pour la truite certaines exfiltrations de banc présentent une hauteur d'eau trop faible pour être accueillantes (figure 58). Également,

plusieurs poches froides consécutives peuvent ne créer qu'une seule zone de refuge thermique. Enfin, la notion de refuge s'entend lorsque la température ambiante d'un tronçon de vie dépasse les exigences de l'espèce considérée à telle point qu'elle oblige les individus à rechercher des zones moins chaudes pour s'y réfugier sur une durée limitée.

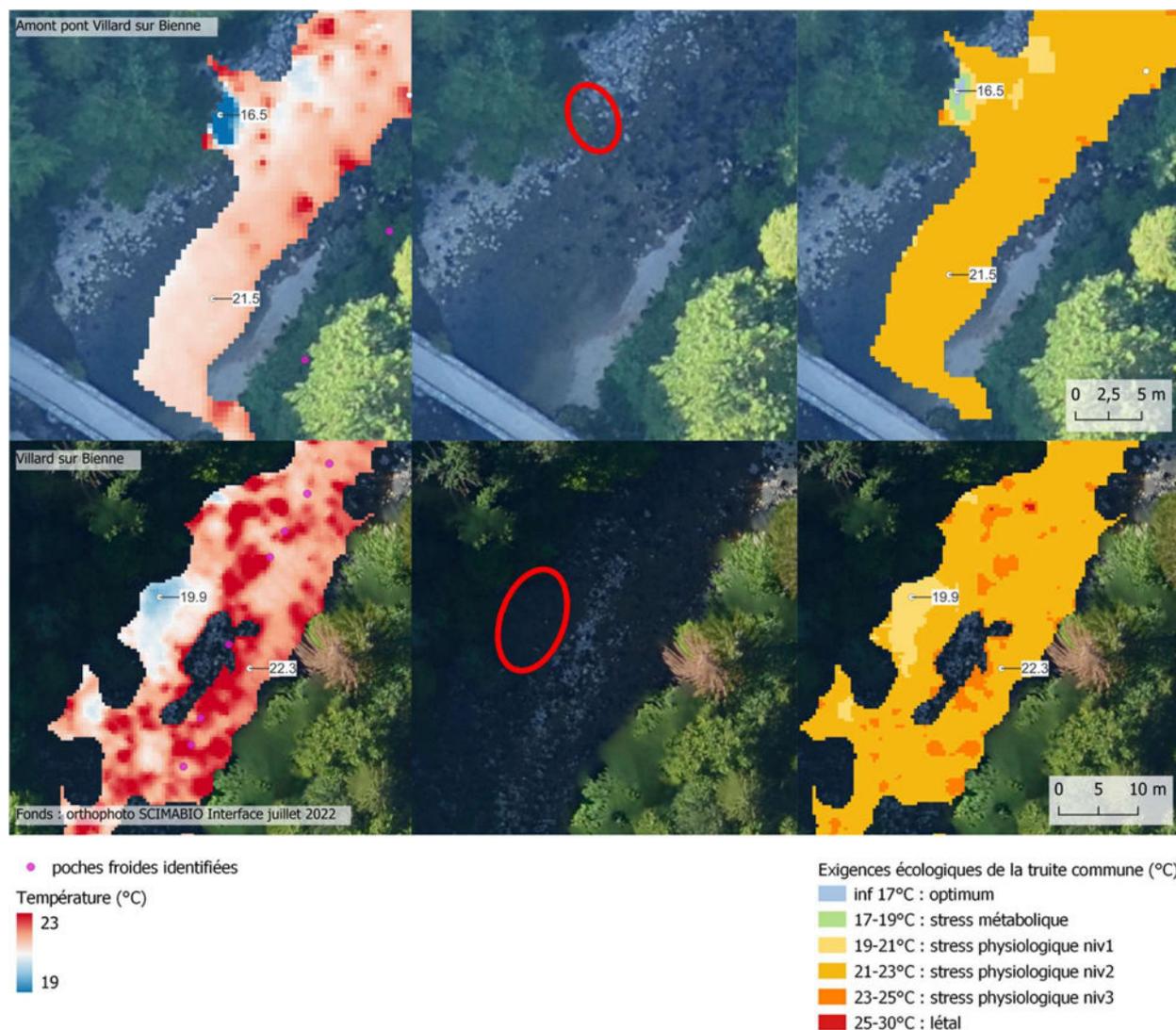


Figure 58 : Exemples de poches froides identifiées sur la Bienne qui n'ont pas été considérées comme des refuges thermiques potentiels en raison de leur faible qualité d'habitat (faciès-surface). A gauche : mosaïque thermique identifiant la poche froide. A droite : mosaïque thermique par rapport aux exigences de la truite montrant un potentiel intérêt écologique. Au centre : orthophoto montrant la faible qualité d'habitat pour la truite.

Dans notre cas, les refuges thermiques pour la truite peuvent donc être définis comme des zones accessibles et suffisamment accueillantes (hauteur d'eau, surface) qui présentent des températures moins élevées que celle de la rivière dans lesquelles les individus peuvent se réfugier et trouver des conditions thermiques plus favorables afin de réduire leur niveau de stress physiologique.

Ces zones refuges peuvent présenter soit un différentiel de température important avec la rivière dans le cas de résurgences d'eau souterraine (figure 59), soit juste quelques degrés de moins que la température ambiante de la rivière dans une gamme suffisante pour réduire le niveau de stress des individus pendant quelques temps (figure 60). Par exemple, des comportements de migration inhabituels de truites ont été observés au niveau du pont de Vaux-lès-Saint-Claude à partir de la fin d'après-midi au cours des mois de juillet 2022 et 2023 (Caudron *com. pers.*, Grillet *com.pers.*). Des groupes de plusieurs dizaines d'individus remontaient la rivière depuis l'aval du pont en rive droite

pour aller se regrouper dans le courant situé en amont immédiat du pont. L'analyse de la mosaïque thermique sur ce secteur a permis de montrer que la température dans le faciès courant, bien qu'élevée, autour de 24°C, présentait un différentiel thermique d'environ -1,5°C avec les autres faciès de la rivière en aval, représentant une zone thermiquement moins défavorable pour la truite. Ce comportement de migration peut être assimilé à une recherche active de refuge thermique au cours des heures les plus chaudes de la période estivale.



Fonds : orthophoto SCIMABIO Interface juillet 2022 ; photo aérienne géoportail IGN

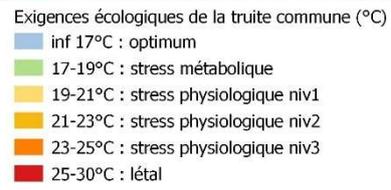
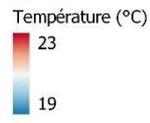


Figure 59 : Exemples de poches froides identifiées sur la Bienne et considérées comme des refuges thermiques potentiels. A gauche : mosaïque thermique identifiant la poche froide. A droite : mosaïque thermique par rapport aux exigences de la truite montrant un potentiel intérêt écologique. Au centre : orthophoto montrant l'intérêt en termes d'habitat pour la truite.

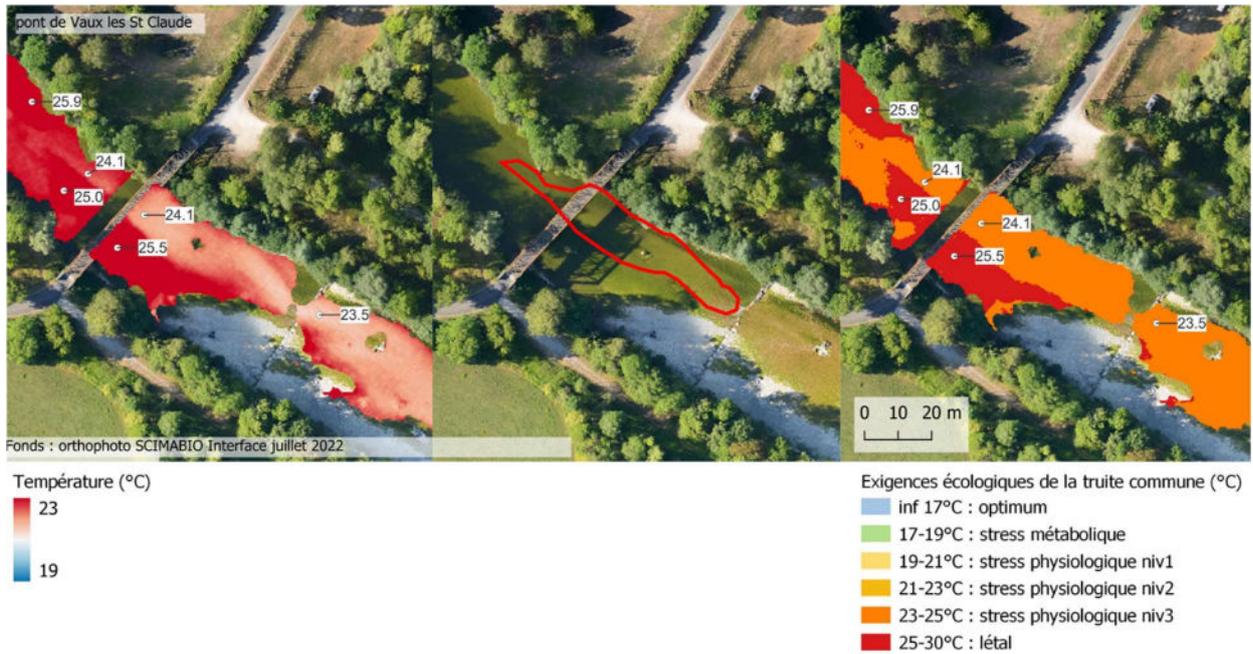


Figure 60 : Exemple d'une zone de poches froides identifiées sur la Bienne au niveau du pont de Vaux-lès-Saint-Claude utilisée comme refuge thermique. A gauche : mosaïque thermique identifiant le différentiel de température. A droite : mosaïque thermique par rapport aux exigences de la truite montrant des conditions générales de stress physiologique élevé. Au centre : orthophoto montrant l'habitat de refuge (ici courant) pour la truite et sa délimitation (en rouge).

Afin d'apporter des éléments sur les capacités de résilience et de diffusion de la biodiversité à l'échelle de la rivière, notre travail a consisté à renseigner la répartition spatiale des refuges thermiques potentiels sur le linéaire de la Bienne dans le but d'identifier les secteurs présentant, soit des capacités en termes de refuges thermiques qu'il convient de préserver, soit au contraire des lacunes en refuges qui nécessiteront des actions de restauration.

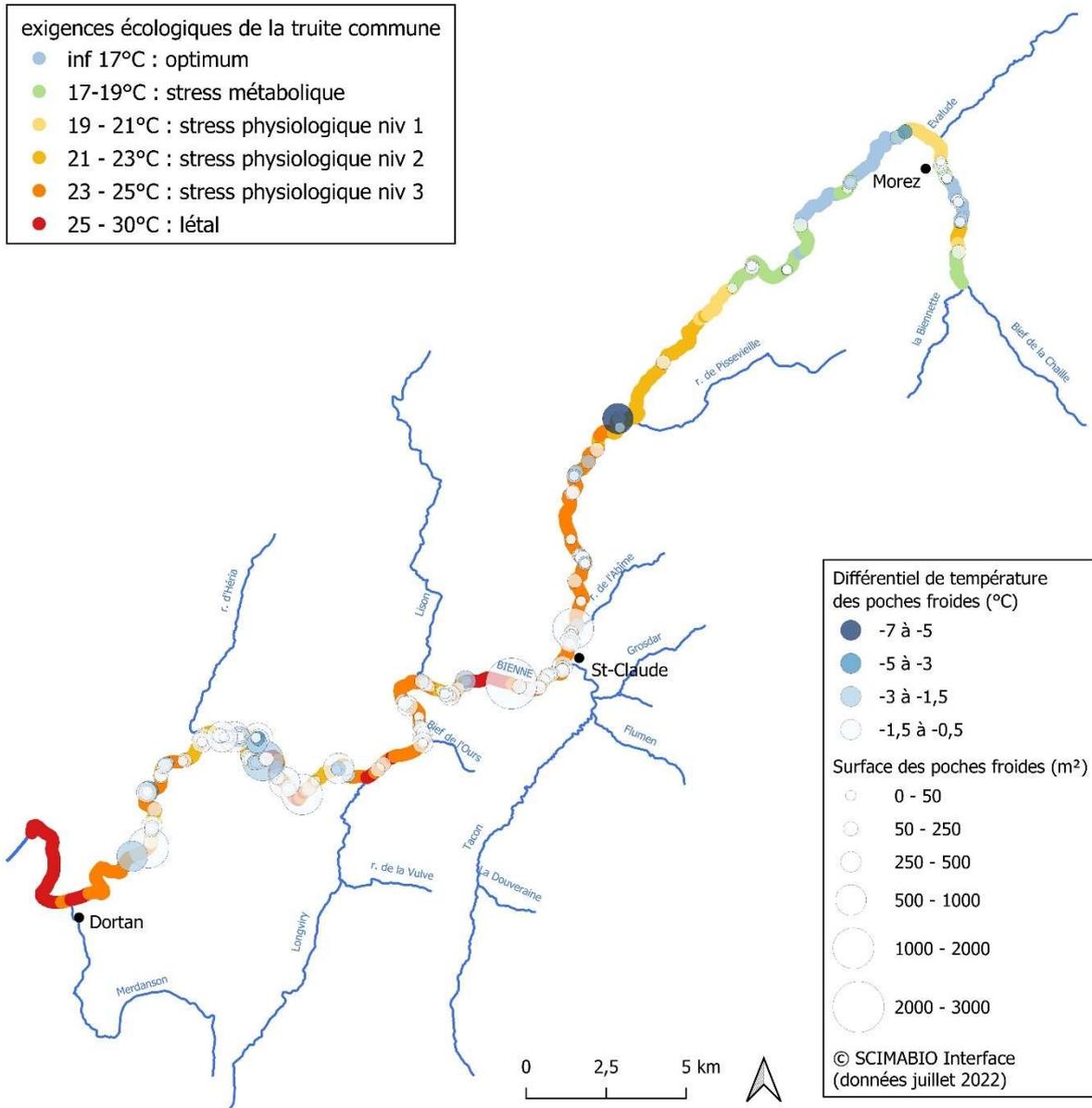


Figure 61 : Répartition et caractéristiques des poches froides présentant un intérêt potentiel comme refuges thermiques pour les salmonidés

Comme déjà expliqué plus haut, les 15km amont de la Bienne, des sources jusqu'à Lézat, présentent des conditions thermiques acceptables pour la truite grâce aux apports de la source de l'Arce et de la résurgence du Trou Bleu. Ces deux apports sont plus importants que des refuges thermiques puisqu'ils influencent fortement le profil thermique de la rivière sur plusieurs kilomètres. L'ensemble de ce linéaire pourrait constituer un refuge climatique essentiel à plus long terme pour les espèces poïkilothermes de la Bienne.

De Lézat au barrage de Roche Blanche, les poches froides pouvant servir de refuges thermiques potentiels sont quasiment inexistantes.

Entre les barrages de Roche Blanche et de Manzoni, les refuges potentiels sont peu nombreux, de petites dimensions et avec des différentiels thermiques faibles. La situation est similaire entre les barrages Manzoni et Brun.

A l'aval du barrage Brun jusqu'à la confluence du Tacon, une concentration plus importante de refuges thermiques potentiels est observée mais leur accessibilité est compromise par la succession des 4 obstacles suivants : le barrage Sésame (ROE 46675), le barrage Miflex (ROE 12028), le radier du pont

central (ROE 77304), le barrage Olivier (ROE 7531). La confluence du Tacon constitue un refuge potentiel important sur ce secteur isolé entre la retenue d'Etable et le barrage Sésame.

Sur le linéaire situé en aval du barrage d'Etable jusqu'au barrage de Molinges, les poches thermiquement plus favorables aux salmonidés sont peu nombreuses, on trouve la restitution de l'Enragé, le Longviry et les refroidissements identifiés dans le tronçon court circuité. Entre le barrage de Molinges et le Gour aux Moines, les refroidissements identifiés sont très relatifs car ils présentent des différentiels faibles, autour de -1 à -1,5°C, alors que la température de la rivière est élevée, entre 23 et 25°C.

Les zones de refuges thermiques montrant le plus de potentialité sur la Bienne aval se situent entre Vaux-lès-Saint-Claude et Jeurre puis à l'aval de Jeurre avant la retenue d'Etable. Ensuite, en aval du barrage d'Etable, la température de la rivière reste élevée, de 23°C à plus de 25°C et aucune poche froide ne représente un refuge potentiel. Seul le Merdanson qui possède une résurgence karstique en aval de son cours constitue refuge thermique possible sur ce secteur (différentiel à la confluence : -8°C). Cependant, son potentiel est difficile à évaluer puisque la confluence est noyée dans le remous de la retenue de Coiselet et ne forme pas de tache froide visible à la surface (figure 61). Des investigations supplémentaires permettraient d'évaluer le potentiel de ce refuge thermique en 3D, au sein de la colonne d'eau de la retenue.

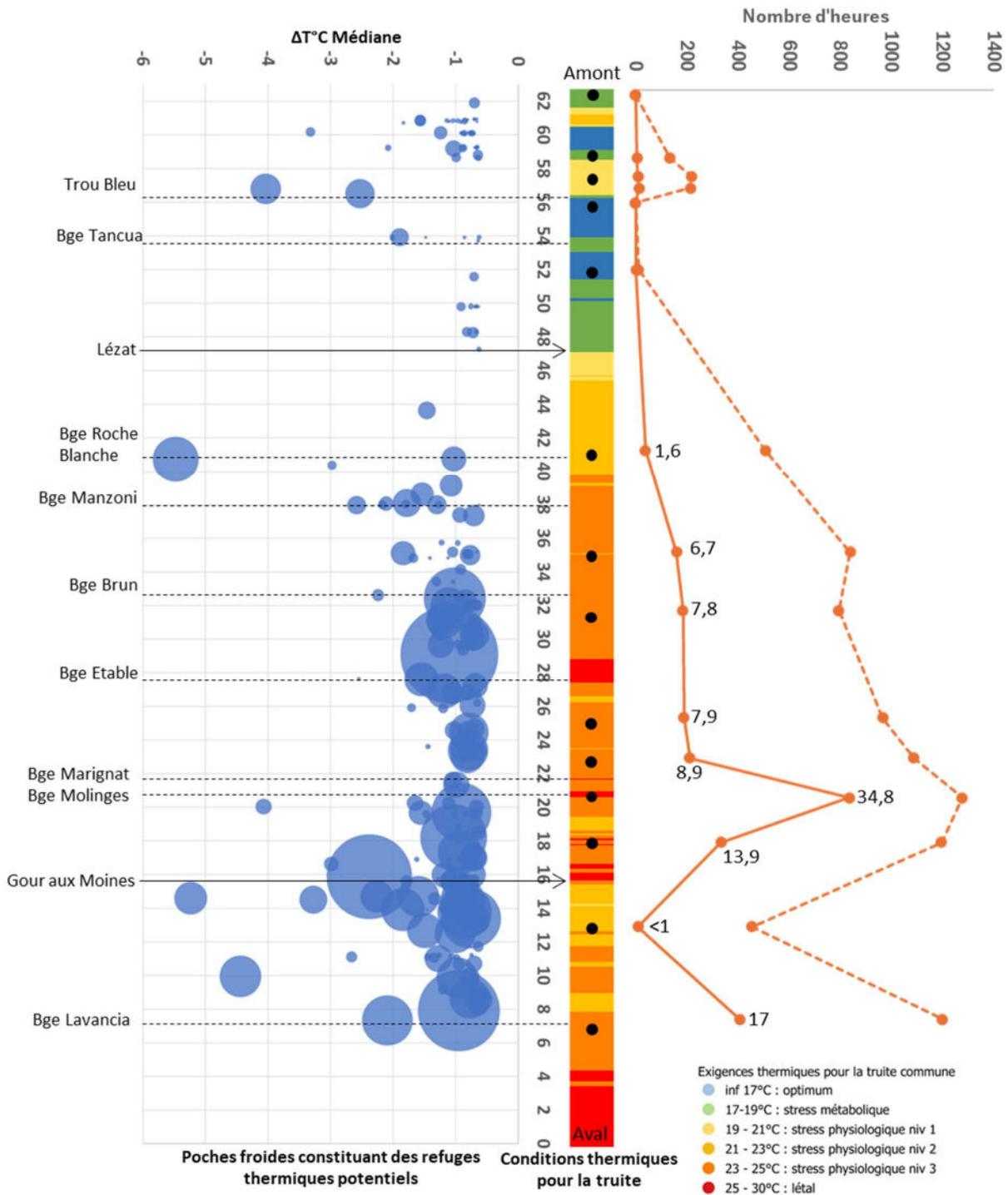


Figure 62 : Répartition le long du linéaire de la Bienne des poches froides présentant un intérêt potentiel comme refuges thermiques en lien avec les conditions thermiques observées vis-à-vis des exigences de la truite (voir figure 57 pour légende).

3.8.2 Sur les affluents

Bien que les données thermiques sur les affluents soient plus ponctuelles et moins exhaustives sur le plan spatial que celles obtenues sur le cours principal de la Bienne, elles permettent néanmoins, de révéler le rôle important que peuvent jouer certains affluents en termes de refuges thermiques ou climatiques.

La cartographie IRT-a a permis d'identifier quatre affluents qui présentent des conditions thermiques plus favorables que celles de la Bienne au droit de leur confluence, leur permettant de jouer un rôle

potentiel de refuges thermiques : le ruisseau de l'Abîme, le Tacon, le Longviry et le Merdanson (figure 63). Ces 4 cours d'eau sont des affluents rive gauche de la Bienne. Les eaux plus froides du Tacon, et du Longviry dans une moindre mesure, forment un panache à leur confluence avec la Bienne.

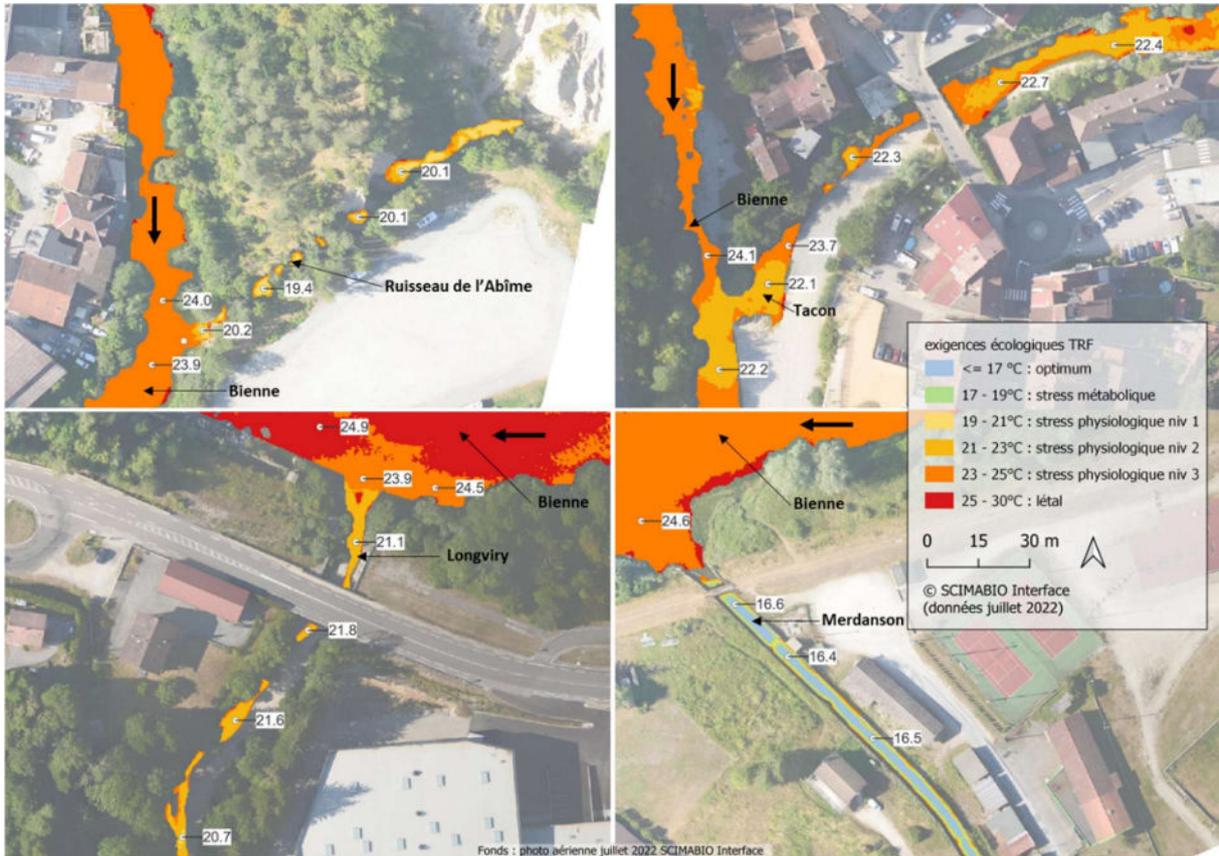


Figure 63 : Mosaïque thermique des exigences de la truite illustrant le rôle potentiel de refuge thermique que peuvent jouer quatre affluents (ruisseau de l'Abîme, Tacon, Longviry, Merdanson).

L'Enragé, résurgence karstique provenant du lac de l'Abbaye, et qui bénéficie à ce titre d'une température faible autour de 14°C, présente une situation particulière. Sa confluence naturelle est noyée dans la retenue du barrage de Molinges et ses eaux sont captées puis restituées en amont de sa confluence naturelle par le biais d'un ouvrage au niveau de l'usine Breuil. Au niveau de la restitution, l'imagerie thermique a permis d'identifier le potentiel de refuge thermique de cet affluent (figure 63). Là aussi, la structure en 3D de ce refuge thermique potentiel noyé dans la retenue du barrage pourrait être évaluée par des relevés complémentaires.

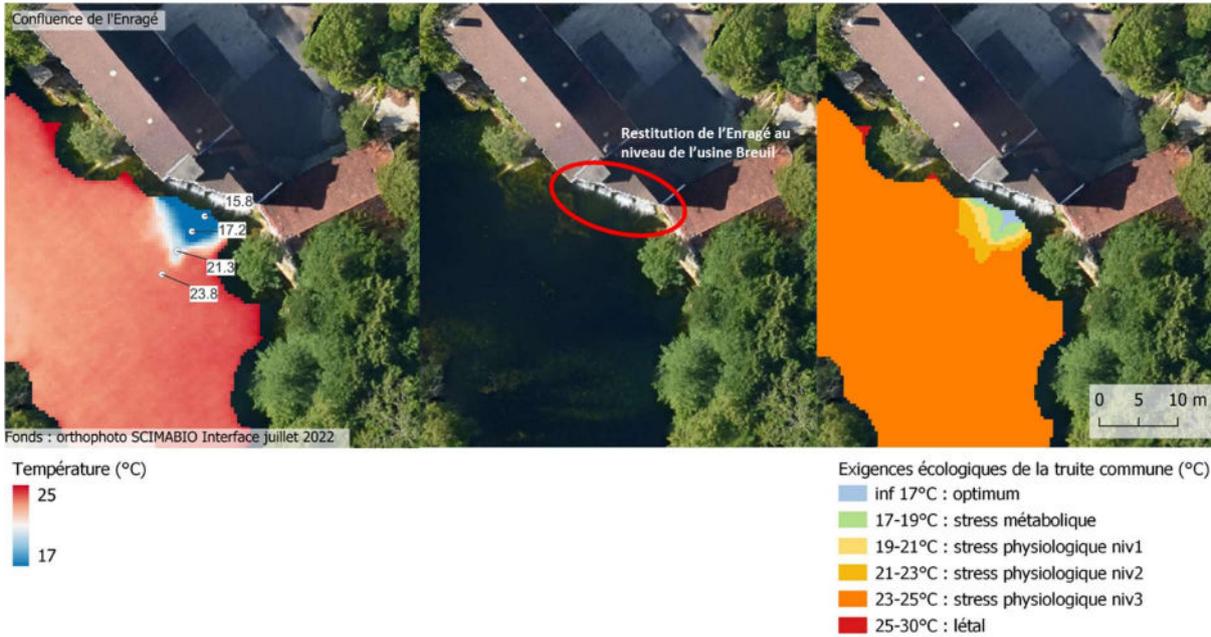


Figure 64 : Restitution des eaux de l'Enragé. A gauche : mosaïque thermique identifiant le différentiel de température. A droite : mosaïque thermique par rapport aux exigences de la truite.

Les températures d'eau de l'Héria et de la Bienne à proximité de la confluence de l'Héria (station BIE50-5) ne permettent pas d'identifier cet affluent comme un potentiel refuge thermique pour les poissons de la Bienne (figure 65) d'autant que son débit est très faible en été. En effet, les températures d'eau de l'Héria sont soit comparables soit plus élevées que celles de la Bienne qui bénéficie sur ce secteur d'un refroidissement majeur lié à des résurgences d'eaux souterraines.

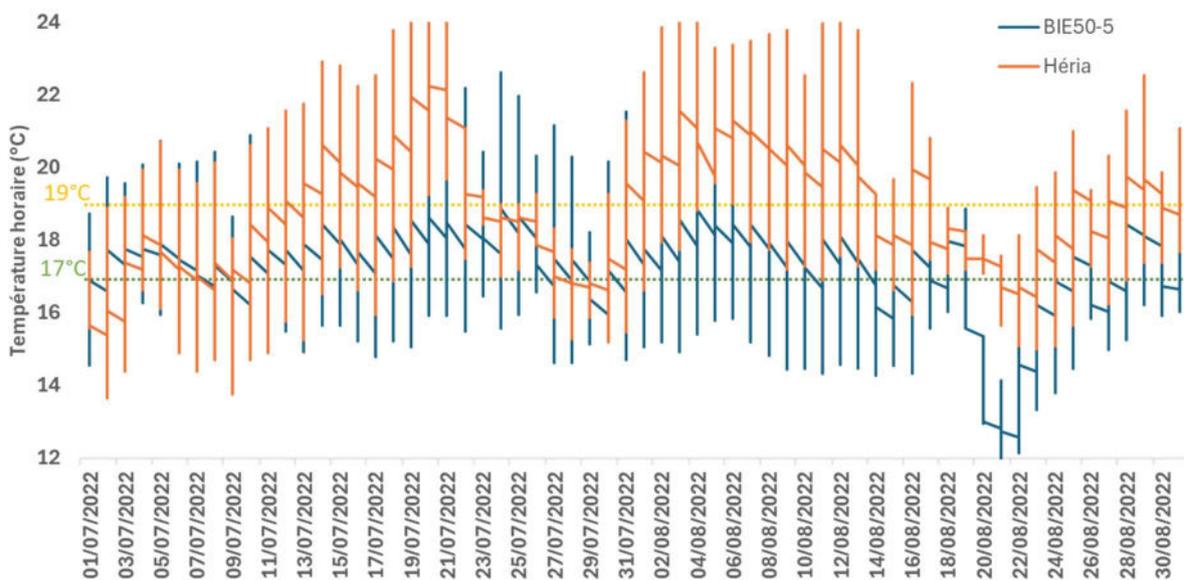


Figure 65 : Températures horaires du 01 juillet au 31 août 2022 sur l'aval de l'Héria et de la Bienne à proximité de la confluence de l'Héria.

Le Grosdar et le Flumen, affluents du Tacon présentent des températures favorables aux salmonidés durant tout l'été contrairement à la Bienne sur le secteur où conflue le Tacon (station BIE31-4) (figure 66). Ainsi, le système Tacon associé à ses deux principaux affluents représente un refuge thermique important et un potentiel refuge climatique sur le long terme pour la population de truites de la

Bienne. En outre, les débits de cet affluent en été sont toujours suffisamment soutenus pour jouer ce rôle de refuge thermique.

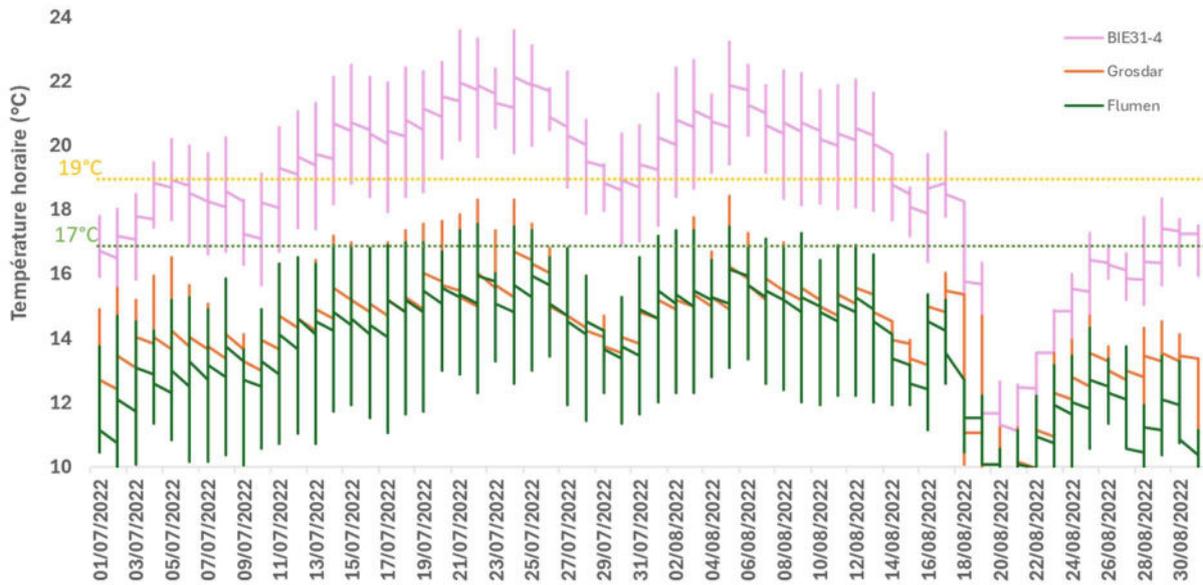


Figure 66 : Températures horaires du 01 juillet au 31 août 2022 du Flumen, du Grosdar et de la Bienne au niveau de la confluence du Tacon.

Sur la Bienne amont, le Bief de Chailles montre des températures d’eau plus favorables aux salmonidés que la Biennette. Le mélange des deux affluents de tête de bassin semble égal et consistant au cours de l’été, puisque la température de la Bienne au site BIE0-3 reflète la moyenne des deux cours d’eau (figure 67). Ainsi, toute dégradation des conditions de débits et/ou de température sur le Bief de Chailles aurait comme conséquence de modifier significativement l’habitabilité thermique du secteur amont de la Bienne, avec des répercussions en cascades qui pourraient se faire sentir sur tout ou partie du linéaire.

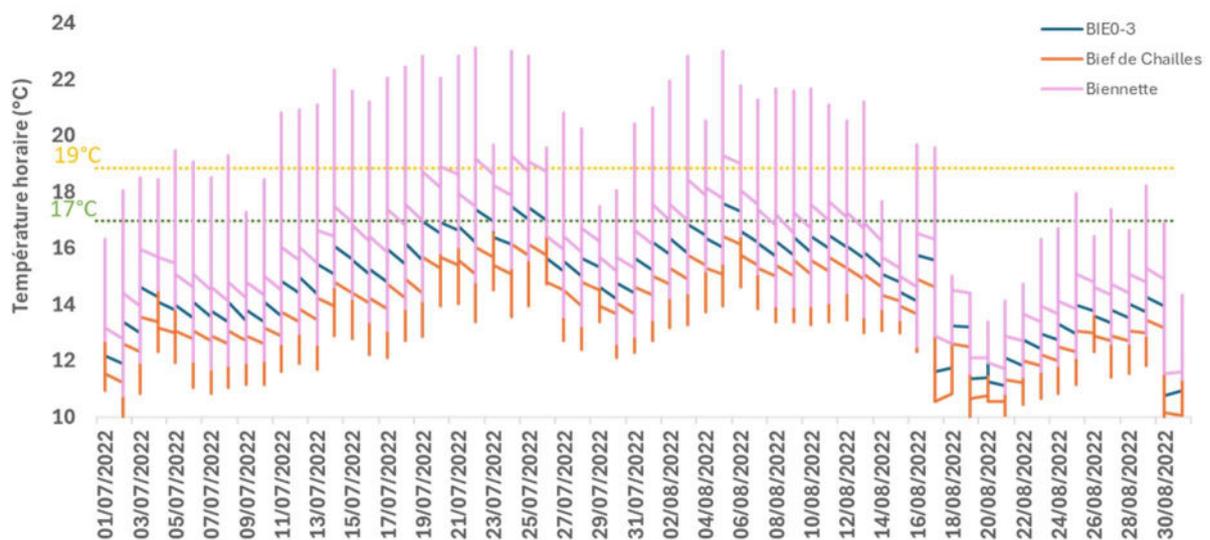


Figure 67 : Températures horaires du 01 juillet au 31 août 2022 sur la Bienne amont, le Bief de Chailles et la Bienne.

4. SYNTHÈSE DES PRINCIPAUX RÉSULTATS ET ENJEUX

Résultats obtenus	Enjeux et réflexions à intégrer dans les actions
La présence de poches froides sur l'ensemble du linéaire suggère une bonne fonctionnalité hydro-morphologique de la Bienne avec des échanges nappe-rivière plutôt fonctionnels.	La Bienne montre encore aujourd'hui un bon fonctionnement hydro-morphologique, ce qui est précieux et rare. En effet, les diagnostics hydro-morphologiques réalisés sur les rivières françaises révèlent plus souvent des dysfonctionnements importants que des bons fonctionnements. Des actions de préservation destinées à conserver le bon état actuel sont nécessaires.
10 zones majeures de réchauffements ont été identifiées dont 5 sont des remous thermiques liés à des barrages (Manzoni, Etable, Molinges, Lavancia, Coiselet).	Ces zones se révèlent être des anomalies thermiques chaudes suffisamment influentes sur le profil thermique pour venir perturber le bon état écologique de la rivière. Une réflexion sur les possibilités de réduction de ces impacts anthropiques directs semble nécessaire pour améliorer l'adaptation de la Bienne aux changements climatiques.
9 zones présentant des apports d'eau froide qui ont une influence majeure sur le régime thermique de la Bienne ont été identifiés.	La préservation de l'ensemble de ces zones représente un enjeu prioritaire pour limiter les effets du changement climatique sur les conditions de vie de la truite. En particulier une réflexion doit être menée sur la restitution du captage AEP de l'Arce et la conservation de la résurgence du Trou Bleu.
Les 15 km amont de la Bienne, de la source jusqu'à Lézat présentent des conditions thermiques optimales ou acceptables pour les salmonidés.	Sur ce linéaire, les apports de l'Arce et du Trou Bleu sont essentiels pour maintenir les conditions de vie pour la truite.
Sur 32 km de linéaire, entre Roche Blanche et le Gour aux Moines, les conditions thermiques estivales peuvent être considérées comme défavorables pour les salmonidés. Les températures élevées observées et leur répétition au cours de l'été induisent un niveau de stress physiologique important susceptible d'altérer la survie des individus.	L'enjeu sur ce linéaire est de réduire les sources de réchauffement et de protéger les refuges thermiques existants. L'accessibilité aux refuges peut être limitée par la présence des obstacles sur ce linéaire. Assurer la libre circulation des espèces pour leur permettre d'accéder à des zones refuge représente également un enjeu prioritaire pour aider à adapter la biodiversité aux changements climatiques.
Des résurgences majeures d'eau froide situées à l'aval de Vaux-lès-Saint-Claude permettent de retrouver des conditions thermiques globalement acceptables bien que pas optimales pour les salmonidés sur environ 8 km depuis le Gour aux Moines jusqu'au remous thermique de la retenue de Lavancia.	Ces apports d'eau froides probablement karstiques, dont les origines ne semblent pas encore connues, représentent un enjeu majeur. Leur origine doit être recherchée afin de préserver la ressource et les structures morphologiques de la rivière permettant leurs résurgences doivent être protégées.

<p>Les refuges thermiques potentiels restent relativement peu nombreux et inégalement répartis sur le linéaire avec en outre une accessibilité pouvant être limitée par les obstacles.</p>	<p>La préservation de ces poches froides locales voire la création de nouvelles poches froides sur des secteurs lacunaires représente un enjeu réel pour aider la biodiversité à se maintenir face aux changements climatiques. Les refuges thermiques locaux sont d'une importance capitale pour permettre aux salmonidés de survivre aux périodes estivales critiques. D'autant plus que la majorité du linéaire de la Bienne présentent des conditions thermiques peu favorables sur des durées pouvant être importantes.</p>
<p>A partir des données disponibles, deux refuges climatiques peuvent être pressentis à l'échelle du bassin : la Bienne à l'amont du barrage de Tancua et le système Tacon-Grosdar-Flumen.</p>	<p>Ces deux refuges représentent un enjeu important à prendre en compte sur le long terme pour aider la population de truites à faire face aux évolutions thermiques à venir dans le cadre du changement climatique.</p>

5. PROPOSITIONS D' ACTIONS

5.1 Action de conservation pour maintenir l'état actuel

La seule action de conservation consiste à protéger les résurgences majeures et les refuges thermiques locaux.

Trois apports majeurs essentiels au maintien de la biodiversité de truites sur la Bienne doivent faire l'objet de mesures conservatoires immédiates : la résurgence karstique du Trou Bleu, la source de l'Arce, et les résurgences en aval de Vaux-lès-Saint-Claude.

Ensuite les différentes zones identifiées qui présentent des poches froides pouvant jouer un rôle local essentiel de refuge thermique doivent également être préservées. Les mesures de conservation peuvent intervenir à deux niveaux.

D'une part, il s'agit de préserver la source de l'eau en évitant l'exploitation supplémentaire de ces ressources en eaux (agriculture ou AEP), aussi bien des ressources souterraines que de surface, afin de garantir leur restitution dans le milieu naturel. Notamment, la source de l'Arce, qui est déjà captée, et le Trou Bleu, doivent faire l'objet d'une attention particulière car ils sont tous deux identifiées comme des ressources majeures d'AEP dans le SDAGE (Agence de l'eau 2013).

D'autre part, les zones de résurgences et d'exfiltration de ces eaux au niveau de la Bienne doivent faire l'objet d'une protection en tant que structures hydromorphologiques particulières pour éviter tout aménagement ou destruction. Ainsi, les tronçons de cours d'eau présentant un habitat majeur en termes de refuge thermique pourraient faire l'objet d'une protection réglementaire en application de l'article L.432-3 du code de l'environnement.

5.2 Actions de restauration pour améliorer l'état actuel

Plusieurs actions peuvent être entreprises dans le but de limiter les risques d'échauffement et même diminuer la température de la rivière.

5.2.1 Réduire les réchauffements liés aux barrages et retenues

La cartographie IRT-a a mis en évidence des effets locaux ou plus importants des barrages de toutes tailles et des retenues hydro-électriques. Un travail progressif et sur le long terme doit être initié dès maintenant sur cette problématique. En effet, ces réchauffements souvent importants sont le résultat d'aménagements locaux et anthropiques et ne sont pas imputables au réchauffement climatique, ils représentent donc des opportunités de restauration locales qui permettraient de limiter les effets du changement climatique.

Trois catégories d'actions peuvent être envisagées :

- Prévoir et planifier le rachat de certains barrages importants lorsque les opportunités se présentent (mise en vente, renouvellement de concession) en vue de les démanteler (comme par exemple le projet d'acquisition actuel du barrage Marbrerie à Molinges). Cette démarche est également préconisée sur le Lison, où les barrages de Ravilloles et Cuttura provoquent une augmentation importante de sa température avec une influence qui se poursuit sur le cours principal de la Bienne.
- Etudier des actions de mise en transparence ou « débarrage » des barrages sur la Bienne pendant la période estivale critique pour éviter les effets « retenues hydrauliques » qui accélèrent le réchauffement de l'eau de la rivière.
- Démanteler les nombreux petits seuils successifs en zone urbaine comme à Morez qui, en provoquant un étagement du lit et en modifiant les faciès d'écoulement, conduisent à produire des effets cumulatifs non négligeables.

5.2.2 Réduire les effets de chaleur liés à l'artificialisation urbaine

Les rivières sont soumises à des réchauffements lors des traversées de zones urbaines qui présentent des berges fortement artificialisées (murs béton, absence de ripisylve). Dans la présente étude, un réchauffement urbain a été identifié par exemple au niveau de Morez. Des actions de restauration peuvent être envisagées pour réduire l'artificialisation des linéaires urbains et revégétaliser les abords de la Bienne dans Morez et Saint-Claude.

5.2.3 Restituer les ressources d'eau froide majeures au milieu naturel

Certaines résurgences ou sources qui constituent des apports d'eau froide majeurs pour la Bienne sont actuellement exploitées, comme par exemple le captage AEP de la source de l'Arce. Une réflexion doit être menée sur ces ressources actuellement exploitées pour essayer de trouver des solutions d'approvisionnement alternatives qui seraient moins impactantes pour le milieu dans le but de restituer le maximum de débit d'eau froide à la rivière en période estivale.

5.2.4 Optimiser l'attrait des refuges thermiques existants

Dans certaines configurations, l'étendue de la surface potentielle d'un refuge thermique créé par un panache d'eau plus froide dans la rivière peut être augmentée par le biais de déflecteurs qui vont retarder le mélange entre la plume et la rivière et ainsi permettre de prolonger le flux d'eau plus froide du panache. Ce principe proposé par Kurylyk et al. (2015) est présenté dans la figure 68. Bien qu'il n'existe que peu d'exemples en France de mise en place de ce type de structure, leur mise en œuvre peut être relativement simple (suivant les contextes et les accès) pour des gains potentiellement importants.

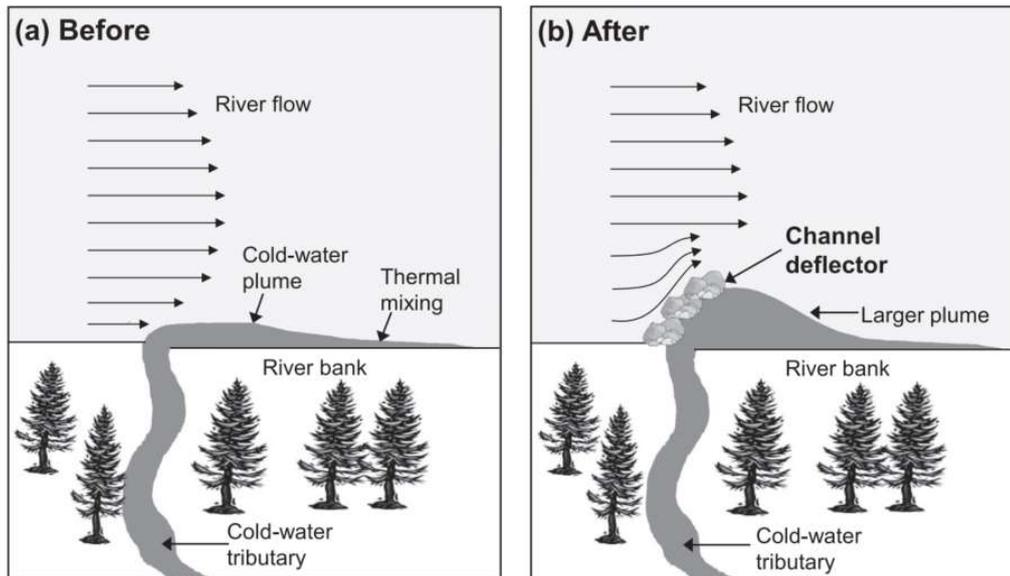


Figure 68 : Schéma de principe de l'optimisation d'un refuge thermique par la pose de déflecteurs (blocs, troncs) à la confluence d'un affluent pour augmenter la taille de la poche froide (source Kurylyk et al. 2015).

Dans le cas de la Bienne, des actions d'optimisation de refuges thermiques existants, comme par exemple la restitution de l'Enragé ou la confluence du Tacon, pourraient être mis en œuvre pour étendre la superficie des plumes d'eau plus froide et donc leur capacité d'accueil (ou du moins leur zone d'influence).

5.2.5 Décloisonner les accès aux refuges thermiques et climatiques pour les salmonidés

Plusieurs zones présentant des refuges thermiques ou pouvant constituer des refuges climatiques potentiels sont rendues difficiles d'accès en raison de la présence de nombreux barrages. C'est le cas notamment des poches froides situées à l'amont du barrage de Marignat et en amont des 5 obstacles situés au-dessus de Saint-Claude.

A plus long terme, l'accès pour les salmonidés aux refuges climatiques que constituent la Bienne en amont du barrage de Tancua et le système Tacon-Flumen-Grosdar doit être pris en compte. Une réflexion sur la continuité à l'échelle du bassin-versant de la Bienne semble donc indispensable.

5.2.6 Restaurer les processus hydro-morphologiques

Les apports d'eau issus de l'aquifère alluvial constituent la principale origine des échanges nappe/rivière. Ils jouent un rôle majeur, comme montré sur la Bienne, de catalyseur de la température de la rivière tout au long du linéaire en limitant, grâce à leurs apports réguliers, le réchauffement des eaux de surface. Or, comme synthétisé par Datry et al. (2008), ces échanges peuvent être perdus ou réduits par les aménagements anthropiques réalisés sur les rivières (chenalisation, recalibrage du profil, rectification, endiguement, protections de berge).

Une manière efficace de retrouver des apports hyporhéiques est de supprimer les altérations physiques qui ont conduit à leur disparition et de laisser se mettre en place une complexité géomorphologique qui est à l'origine des échanges.

Dans ce cadre, des actions ambitieuses de restauration hydro-morphologique du lit de la rivière, comme ceux initiés par exemple sur les sites des anciennes carrières de Jeurre et Lavancia, qui vont favoriser les processus d'échanges nappe/ri vière, sont préconisées.

5.2.7 Replanter une ripisylve efficace pour limiter l'ensoleillement direct

La plantation d'arbres en berge est une solution largement répandue pour limiter l'échauffement estival des secteurs ouverts (Seavy et al., 2009; Withrow-Robinson et al., 2011). Plusieurs secteurs sur l'amont dans la traversée de Morez puis sur l'aval à partir de Saint-Claude pourraient bénéficier de plantation pour limiter le réchauffement de l'eau provoqué par le rayonnement solaire direct. Ces actions de reboisement pourraient être prioritaires sur les zones les plus pertinentes grâce à une étude préalable de modélisation cartographique des ombrages (voir action d'amélioration des connaissances proposée plus bas) (figure 69).

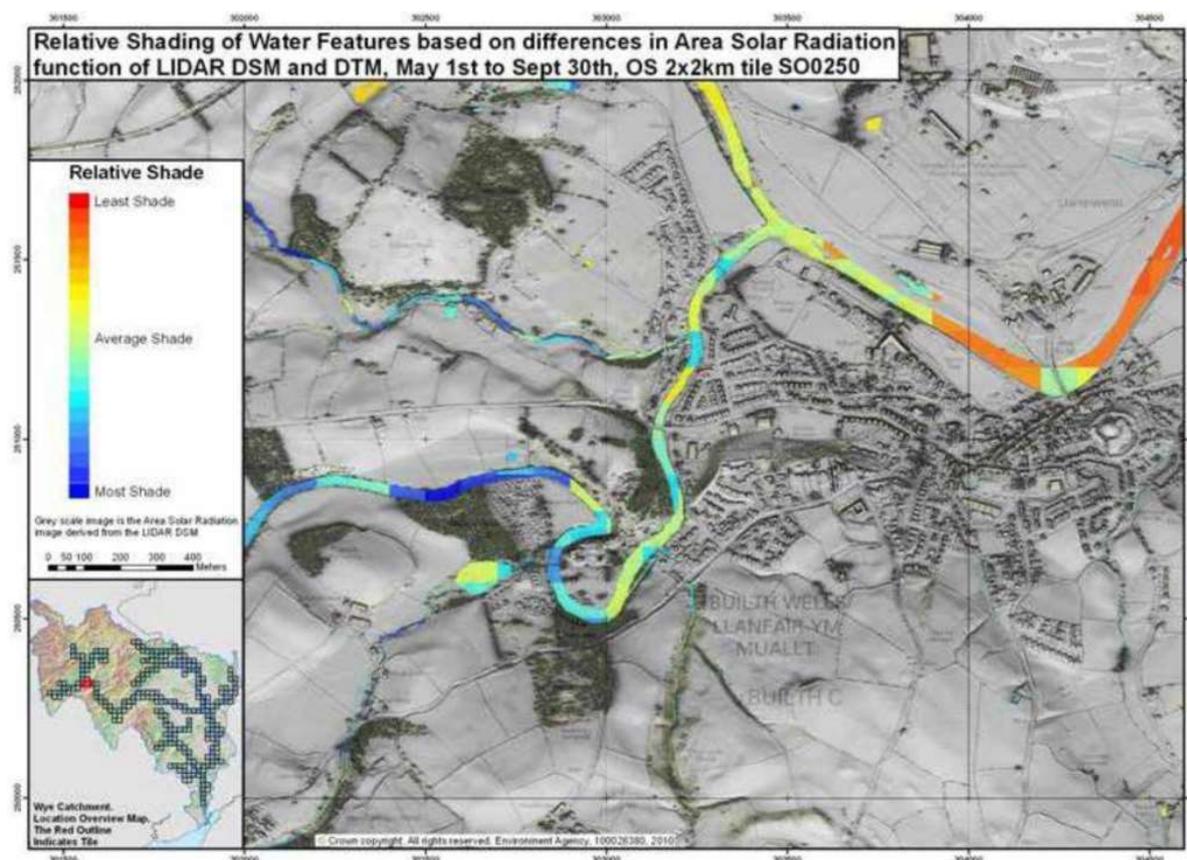


Figure 69 : Exemple d'une carte des ombrages générées par la ripisylve montrant les zones avec le plus d'ombrage (bleu) et celle avec le moins d'ombrage (rouge) (Source : Environment Agency Open Data, UK).

5.2.8 Création de refuges thermiques artificiels

La création de nouveaux refuges thermiques sur des secteurs lacunaires permettant de compenser la perte des apports naturels est actuellement en pleine réflexion dans la littérature scientifique et des premiers tests ont vu le jour très récemment sur des sites pilotes en Amérique du Nord (Kurylyk et al. 2015, K. Smith 2023 voir figure 70). Le principe consiste à réaliser un puit dans la nappe phréatique avec un pompage permettant ensuite de restituer en surface et de manière concentrée l'eau froide à la rivière afin de créer une plume servant de refuge thermique (figure 70 et 71). La fréquence et le débit du pompage sont adaptés pour être uniquement limités aux périodes estivales les plus critiques.

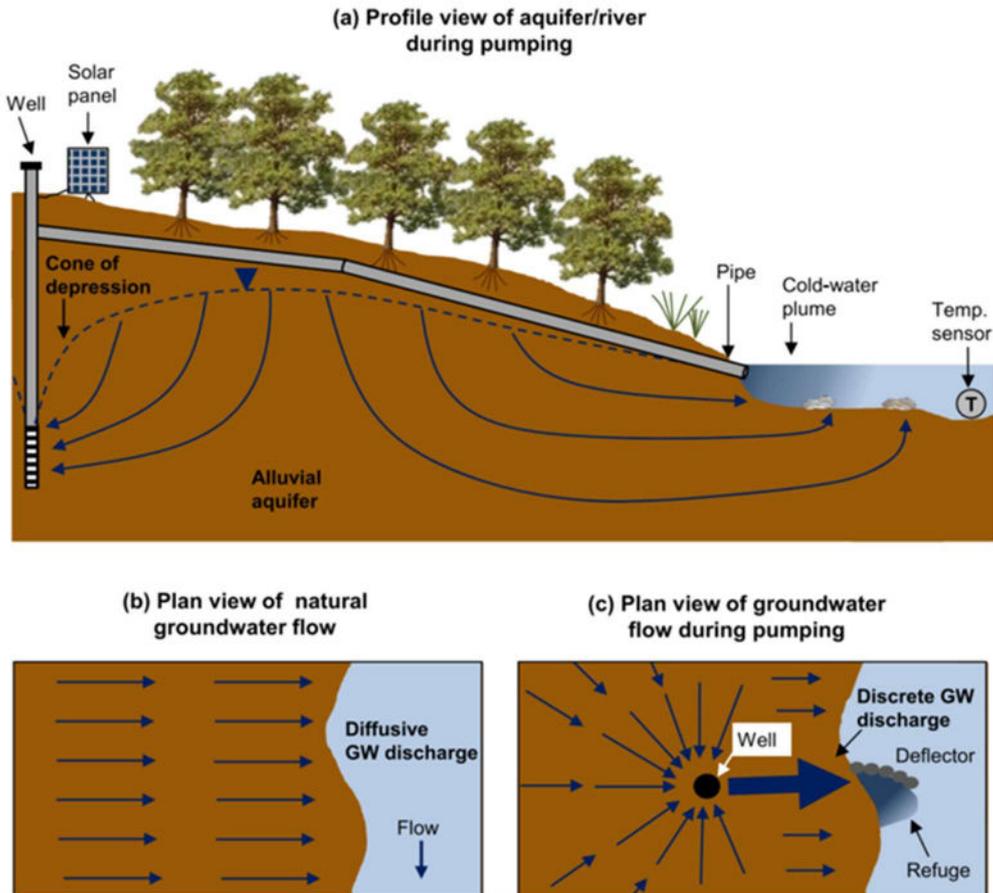


Figure 70 : Schéma de principe de la création d'un refuge thermique temporaire à partir d'un pompage dans la nappe alluviale (Kurylyk et al. 2015).



Figure 71 : Image d'une plume d'eau froide créée artificiellement sur la rivière Wrights (Nouvelle Ecosse, Canada) et qui a été utilisée comme refuge thermique par des salmonidés (truite commune et saumon atlantique) (source <https://www.sciencenews.org/article/cold-water-river-salmon-fish-climate>).

Un exemple de création non volontaire d'un apport d'eau froide majeur obtenu par le rejet d'un forage dans la nappe profonde a été observé sur le Guiers en Savoie au niveau de la restitution de la pisciculture de St-Christophe. Cette pisciculture, afin de compenser son manque d'eau et de pouvoir maintenir sa production, a été autorisée à réaliser un forage dans la nappe pour alimenter ses bassins en eau. La cartographie thermique du Guiers réalisée en juillet 2022 permet clairement de visualiser

l'eau froide dans les bassins (autour de 12°C) et la restitution autour de 14°C de l'eau dans la rivière qui présente elle une température autour de 21-22°C. L'apport d'eau froide constitué par la restitution de ce forage constitue non seulement un refuge thermique local mais influence également le profil thermique de la rivière en améliorant considérablement les conditions thermiques pour les salmonidés sur plusieurs centaines de mètres (figure 72).



Figure 72 : Mosaïque thermique illustrant l'effet de la restitution du forage de la pisciculture de St-Christophe sur la rivière Guiers (Savoie).

Dans cet esprit, une réflexion peut être initiée pour étudier la possibilité de créer des forages en nappe profonde et de restituer temporairement à la Bienne des eaux plus froides en période critique sur les secteurs identifiés comme prioritaires pour améliorer les conditions thermiques vis-à-vis des salmonidés. Un suivi approfondi des effets de ce type d'action sera indispensable afin de mesurer l'impact qu'ils pourraient avoir sur le fonctionnement local de la nappe, et de quantifier les gains (dans le temps et dans l'espace) en termes de refuge thermique. Enfin, un retour d'expérience précis d'un projet « pilote » comme celui-ci permettrait de mieux calibrer ce type d'intervention sur d'autres sites d'intérêt.

5.3 Actions d'amélioration des connaissances

Six actions d'amélioration des connaissances peuvent être programmées pour compléter les informations recueillies au cours de cette étude :

- **Etablir le profil longitudinal de la nappe alluviale sur l'ensemble du linéaire de la Bienne** afin de connaître pendant la période estivale les différences de profondeur entre la nappe et la rivière et d'identifier précisément les zones d'infiltrations et d'exfiltrations. Ces données seront complémentaires des données de répartition des poches froides obtenues dans la présente étude. Le couplage de ces deux sources de données permettrait d'établir des actions de restauration plus efficaces en intégrant mieux le fonctionnement hydro-géologique et hydro-morphologique de la rivière. Ensuite, comme recommandé par Smith et al. (2023), un monitoring piézométrique à long terme du niveau et de la température de la nappe alluviale pourra être réalisé à certains points clés. Le choix de ces points clés pourrait être appuyé par les résultats de cette étude.
- **Acquérir des données thermiques estivales, actuellement lacunaires, sur les affluents** par la pose d'enregistreurs et en réalisant une campagne IRT-a sur le système Tacon-Flumen. Ces données essentielles, complémentaires à la cartographie thermique du cours principal de la Bienne, permettra de travailler sur l'identification des refuges climatiques à l'échelle du bassin versant.
- **Cartographier le rôle de l'ombrage créé par la ripisylve** pour limiter l'échauffement thermique de la Bienne. La présence et l'absence de ripisylve joue un rôle essentiel sur la température de surface des rivières en permettant de limiter l'élévation de température voire de diminuer la température de la rivière (Dugdale et al. 2019, Marteau et al. 2020). Des nouvelles méthodes de cartographie des effets d'ombrage de la végétation rivulaire sur la température de l'eau permettent aujourd'hui de mieux prioriser les actions de gestion et de reboisement de la ripisylve (Jackson et al. 2020, Hyatt 2022, Rusnak et al. 2022). La réalisation d'un tel diagnostic sur la Bienne permettrait de définir un plan de gestion de la ripisylve efficace afin de réduire sur certain secteur actuellement exposé les élévations de température.
- **Rechercher une éventuelle stratification thermique sur les retenues problématiques.** Les données IRT-a ont mis en évidence l'existence de remous thermiques importants sur les retenues de Manzoni, Etable, Molinges, Lavancia et Coiselet. Bien que les hauteurs d'eau soient faibles dans certaines de ces retenues, il serait pertinent de compléter le diagnostic IRT-a, qui donne une température de surface, par la pose d'enregistreurs au sein de ces retenues et par la réalisation de profils thermiques pour rechercher une éventuelle stratification thermique qui pourrait engendrer des meilleures conditions thermiques pour les salmonidés que celles observées en surface.
- **Maintenir le réseau de suivi thermique sur la Bienne et compléter par un réseau sur les affluents d'intérêt.** Les 14 stations de suivi de thermiques présentes sur la Bienne doivent être maintenues pour servir d'observatoire de l'évolution du régime thermique de la rivière. En complément, un réseau d'une vingtaine de stations réparties sur les principaux affluents serait utile pour étendre cet observatoire à l'échelle du bassin versant.

6. RÉFÉRENCES CITÉES

- Agence de l'eau Rhône-Méditerranée et Corse, 2013. Identification des ressources karstiques majeures pour l'alimentation en eau potable en vue de leur protection sur une partie du massif du Jura. 165 pages + annexes.
- Crisp D.T., 1996. Environmental requirements of common riverine European salmonid fish species in freshwater with particular reference to physical and chemical aspects. *Hydrobiologia* 323, 201-221.
- Datry, T., Dole-Olivier, M.J., Marmonier, P., Claret, C., Perrin, J.F., Lafont, M. and Breil, P., 2008. La zone hyporhéique, une composante à ne pas négliger dans l'état des lieux et la restauration des cours d'eau. *Ingénieries eau-agriculture-territoires*, (54), pp.p-3.
- Dugdale SJ, Bergeron NE, St-Hilaire A. 2015. Spatial distribution of thermal refuges analysed in relation to riverscape hydromorphology using airborne thermal infrared imagery. *Remote Sensing of Environment* 160 : 43–55. DOI: 10.1016/j.rse.2014.12.021
- Dugdale, S.J., Kelleher, C.A., Malcolm, I.A., Caldwell, S. and Hannah, D.M., 2019. Assessing the potential of drone-based thermal infrared imagery for quantifying river temperature heterogeneity. *Hydrological Processes*, 33(7), pp.1152-1163.
- Elliott J.M., Hurley M.A, 2001. Modelling growth of brown trout, *Salmo trutta*, in terms of weight and energy units. *Freshwater Biology* 46, 679-692.
- Hyatt, T., 2023. A lidar-based assessment of riparian shade and large wood potential in the Skagit River watershed, WA. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 59(4), pp.743-761
- Isaak, D.J. and Young, M.K., 2023. Cold-water habitats, climate refugia, and their utility for conserving salmonid fishes. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 80(7), pp.1187-1206.
- Jackson, F. L., Hannah, D. M., Ouellet, V., & Malcolm, I. A. 2021. A deterministic river temperature model to prioritize management of riparian woodlands to reduce summer maximum river temperatures. *Hydrological Processes*, 35(8), e14314.
- Kurylyk BL, Macquarrie KTB, Linnansaari T, Cunjak RA, Curry RA. 2015. Preserving, augmenting, and creating cold-water thermal refugia in rivers: Concepts derived from research on the Miramichi River, New Brunswick (Canada). *Ecohydrology* 8 : 1095–1108. DOI: 10.1002/eco.1566
- Marteau B., Piégay H., Chandesris A. & Cernesson F., 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). Rapport de projet Zone-Atelier Bassin du Rhône, Action 62, 66p.
- Marteau B, Michel K, Piégay H. 2022. Can gravel augmentation restore thermal functions in gravel-bed rivers? A need to assess success within a trajectory-based before–after control–impact framework. *Hydrological Processes* 36 : 1–21. DOI: 10.1002/hyp.14480
- Rusnák, M., Goga, T., Michaleje, L., Šulc Michalková, M., Máčka, Z., Bertalan, L., & Kidová, A. 2022. Remote sensing of riparian ecosystems. *Remote Sensing*, 14(11), 2645
- Seavy NE, Gardali T, Golet GH, Griggs FT, Howell CA, Kelsey R, Small SL, Viers JH, Weigand JF. 2009. Why climate change makes riparian restoration more important than ever: Recommendations for practice and research. *Ecological Restoration* 27 : 330–338. DOI: 10.3368/er.27.3.330
- Smith, K. A., O'Sullivan, A. M., Kennedy, G., Benz, S. A., Somers, L. D., & Kurylyk, B. L. 2023. Shallow groundwater temperature patterns revealed through a regional monitoring well network. *Hydrological Processes*, 37(9), e14975.
- Sullivan CJ, Vokoun JC, Helton AM, Briggs MA, Kurylyk BL. 2021. An ecohydrological typology for thermal refuges in streams and rivers. *Ecohydrology* 14 : 1–15. DOI: 10.1002/eco.2295
- Torgersen CE, Ebersole JL, Keenan DM. 2012. Primer for identifying cold-water refuges to protect and restore thermal diversity in riverine landscapes. EPA scientific guidance handbook : 91p. DOI: EPA 910-c-12-001
- Vollmer M, Möllmann K-P. 2018. Infrared Thermal Imaging - Fundamentals, Research and Applications . 2nd Edition. Vollmer M and Möllmann K-P (eds). Wiley-VCH, Weinheim, Germany : 769p.
- Withrow-Robinson B, Bennett M, Ahrens G. 2011. A Guide to Riparian Tree and Shrub Planting in the Willamette Valley: Steps to Success. Oregon State University, Corvallis, USA : 28p.