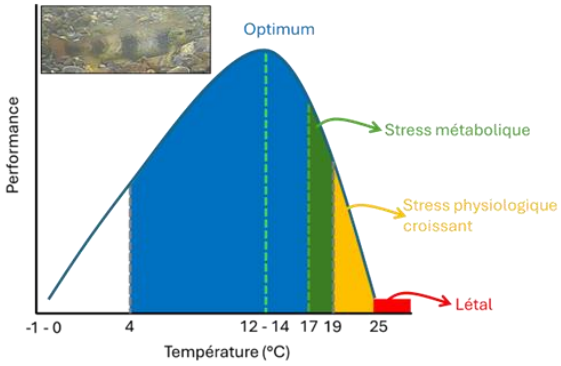
www.scimabio-interface.fr
5B, rue des Quatre Vents
74200 Thonon-les-Bains
Tel : +33 663 71 34 93

Utilisation de l'infra-rouge thermique aéroporté (IRTa) pour identifier les habitats thermiques et les refuges thermiques pour les salmonidés
Guide synthétique et exemples d'application

AAP Eau & Biodiversité AERMC 2020







Décembre 2024

Crédits Photos page de garde : ULM en vol : S. Blanchon – Jura ULM© et images thermiques SCIMABIO Interface*©.*

Citation : Caudron A. & Marteau B., 2024. Utilisation de l'infra-rouge thermique aéroporté (IRTa) pour identifier les habitats thermiques et les refuges thermiques pour les salmonidés - Guide synthétique et exemples d'application. *Rapport final AAP Eau et Biodiversité AERMC 2020.* 57p.

TABLE DES MATIERES

1. Contexte général de l'étude 4
2. Préambule sur le contenu du guide 5
3. Notions d'habitats thermiques, de refuge thermique et de refuge climatique 7
3.1 Importance des habitats thermiques 7
3.2 Refuge thermique et refuge climatique 8
3.3 Utilisation des refuges thermiques par les salmonidés 11
4. Les étapes d'analyses de données appliquées aux habitats thermiques des salmonides 16
4.1 Etape 1 : conditions hydro-climatiques et thermiques de l'eau au moment du survol 16
4.2 Etape 2 : diversité thermique de la rivière vis-à-vis des seuils de tolérance des salmonidés 18
4.3 Etape 3 : profil thermique longitudinal et tolérances thermiques 19
4.4 Etape 4 : variation spatio-temporelle des habitats thermiques au cours de l'été 22
4.5 Etape 5 : cartographie des refuges thermiques et climatiques 25
4.5.1 Inventaire et localisation 25
4.5.2 Typologie et origine hydrologique des refuges 27
4.5.3 Cartographie des mosaïques thermiques au sein des refuges thermiques 28
5. Adaptation aux effets du changement climatique : actions de conservation et de restauration des habitats thermiques favorables 33
5.1 Comment conserver les habitats thermiques et refuges thermiques identifiés 33
5.1.1 Protéger les apports d'eau froide en application de l'article L.432-3 du code de l'environnement 34
5.1.2 Prendre en compte les habitats thermiques dans la définition des débits biologiques d'étiage 34
5.1.3 Protéger les ressources en eau encore non-exploitées 36
5.1.4 Restituer les ressources d'eau froide majeures au milieu naturel 37
5.1.5 Réduire l'exploitation et la consommation d'eau à l'échelle du bassin versant 38
5.2 Comment restaurer, optimiser et créer des habitats thermiques favorables et des refuges thermiques 39
5.2.1 Réduire les échauffements liés aux barrages et retenues 39
5.2.2 Restaurer les échanges nappe/rivière et les apports hyporhéiques 39
5.2.3 Réduire l'artificialisation urbaine 41
5.2.4 Optimiser l'attrait des refuges thermiques existants 43
5.2.5 Décloisonner les accès aux refuges thermiques et climatiques pour les salmonidés 45
5.2.6 Reboiser les berges pour créer de l'ombrage 45
5.2.7 Créer des refuges thermiques artificiels 48
6. Conclusion / perspective 53
7. Références bibliographiques 54

1. CONTEXTE GENERAL DE L'ETUDE

Le présent guide a été rédigé dans le cadre d'un projet Eau & Biodiversité 2020 de l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse porté par les deux PNR du massif des Bauges et de Chartreuse intitulé « le rôle de la trame turquoise dans la sauvegarde et la restauration des refuges thermiques pour les salmonidés - Programme conjoint sur le Guiers et le Chéran ».

Il est également le fruit d'une collaboration avec un collectif d'acteurs de l'eau du territoire recouvrant les deux rivières concernées :

- Pour le Chéran : le SMIAC, les AAPPMA du Haut-Chéran et de l'Albanais ;
- Pour le Guiers : le SIAGA, l'association Réciprocité Guiers (regroupant les 7 AAPPMA du bassin).

Ce programme visait d'une part à inventorier et qualifier les refuges thermiques sur les deux bassins versants, et d'autre part à produire sur chacun d'entre eux des propositions d'actions opérationnelles visant à :

- Introduire la question de la préservation des refuges thermiques dans les choix d'aménagement du territoire ;
- Motiver et prioriser des programmes de restauration des continuités écologiques des cours d'eau en améliorant la possibilité d'accès aux refuges thermiques ;
- Restaurer ou créer des refuges thermiques afin d'assurer la pérennité des populations animales (piscicoles mais aussi amphibiennes, invertébrées…) lorsqu'ils sont déficitaires sur certains tronçons de cours d'eau.

Le travail avait pour but de produire plusieurs livrables opérationnels dont :

- Une note technique de synthèse faisant le bilan des suivis thermiques dits « classiques », c'est-à-dire réalisés à l'aide de thermographes, sur la base des données existantes et disponibles sur chacun des réseaux hydrographiques ;
- Une cartographie des mosaïques thermiques observées sur les deux rivières en période estivale permettant d'établir des profils thermiques longitudinaux, un inventaire des anomalies thermiques chaudes, un inventaire et une caractérisation des apports d'eau froide, un inventaire des refuges thermiques disponibles et la répartition des habitats thermiques pour les salmonidés ;
- Des recommandations de programme d'actions et de principes d'intervention ambitieux destinés à atténuer et anticiper les effets du changement climatique ;
- Un guide technique destiné à vulgariser l'utilisation de la technologie IRT-a pour identifier les refuges thermiques et les habitats thermiques pour les salmonidés.

2. PREAMBULE SUR LE CONTENU DU GUIDE

Le présent guide ne décrit pas les aspects technologiques ni méthodologiques à respecter pour mettre en œuvre une campagne d'acquisition d'images IRT sur une rivière, ni de la chaine de traitements nécessaire à l'obtention des données thermiques élaborées. De même, ce document ne traite pas des applications de l'IRT-a destinées à diagnostiquer la fonctionnalité des processus hydromorphologiques et hydrogéologiques des milieux aquatiques. L'ensemble de ces éléments est déjà précisément abordé dans deux guides techniques édités précédemment (Dugdale 2016 ; Marteau et al. 2023).

L'objectif du guide est de présenter comment les données obtenues à partir de campagnes d'acquisition IRT-a peuvent être appliquées au domaine de l'écologie thermique des poissons en prenant l'exemple des salmonidés.

Ainsi, le guide débute directement à partir des livrables élaborés et des données traitées obtenues à l'issue des campagnes IRT-a à savoir (figure 1) :

- La distribution des pixels en eau au sein de la gamme de températures observées ;
- Le profil thermique longitudinal et les données de températures médianes par tronçon de 100m ;
- La localisation et les caractéristiques des apports d'eau froide (poches froides) ;
- La cartographie des mosaïques thermiques au sein de la rivière.

Le contenu du guide se focalise, dans un premier temps, sur la manière dont ces données peuvent être utilisées pour être confrontées aux tolérances thermiques des salmonidés afin de décrire la variabilité spatiale et temporelle des habitats thermiques et d'identifier les refuges thermiques et climatiques potentiels. Cette partie est principalement illustrée à partir des données obtenues sur le Guiers et le Chéran (Caudron et Marteau 2024a) mais aussi provenant d'autres rivières comme la Bienne (Caudron et al. 2024) et le Doubs (Caudron et Marteau 2024b).

Dans un deuxième temps, le guide liste, à partir de la bibliographie existante et des retours d'expérience, les actions ou solutions envisageables pour atténuer les effets du changement climatique sur la température de l'eau et permettre aux populations de salmonidés de mieux s'adapter.

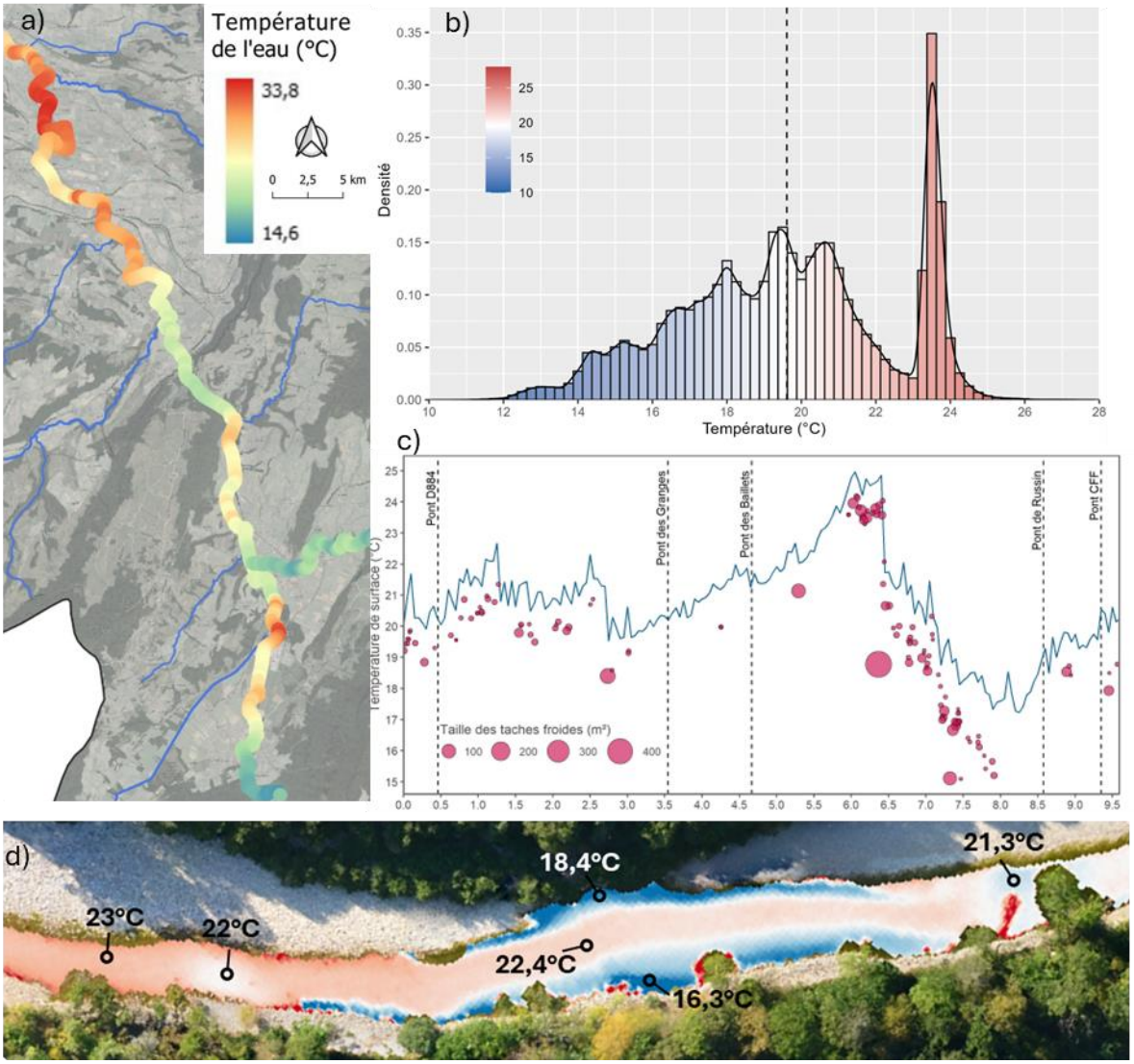


Figure 1 : Exemple des livrables élaborés obtenus après traitement des données IRT-a qui servent de base à l'analyse des habitats thermiques et des refuges thermiques pour les salmonidés (les illustrations utilisées proviennent de projets réalisés sur des rivières différentes. a) cartographie des températures médianes par tronçon de 100 m ; b) distribution de la température des pixels en eau ; c) profil thermique longitudinal et répartition des poches froides ; d) carte de la mosaïque thermique découpée selon les pixels en eau.

3. NOTIONS D'HABITATS THERMIQUES, DE REFUGE THERMIQUE ET DE REFUGE CLIMATIQUE

3.1 IMPORTANCE DES HABITATS THERMIQUES

La distribution de la température de l'eau sur une rivière montre de fortes variations à la fois spatiales, tant longitudinalement que transversalement, et temporelles, au cours de la journée, des saisons ou des années. Ainsi, les conditions thermiques auxquelles sont confrontées les espèces piscicoles au sein de leur aire de vie en rivière sont loin d'être homogènes. En fait, l'ensemble des conditions thermiques forment, au sein des milieux, une mosaïque **d'habitats thermiques** dont les paramètres vont varier spatialement et temporellement. Le milieu est comme « découpé » en patchs présentant des conditions thermiques différentes, plus ou moins favorables aux espèces présentes. Ce découpage, c'est à dire la forme, la superficie des patchs et leurs paramètres thermiques, va varier sous l'influence de plusieurs facteurs anthropiques (aménagements du lit, gestion des boisements de berge, barrages, rejets, prélèvements, …) et environnementaux (débits, température de l'air, …). Du point de vue écologique, plus les ambiances thermiques seront diversifiées, plus la biodiversité sera riche et plus il y aura d'ambiances avec des conditions thermiques favorables aux espèces présentes, plus la capacité d'accueil du milieu et donc l'abondance des populations pourra être importante.

Pour les poissons, cette notion d'habitats thermiques peut être mise en parallèle avec celle, plus connue, des habitats physiques qui qualifient une rivière à partir de la diversité des faciès d'écoulements rencontrés (radier, plat, rapide, fosse, …) ou, à une échelle plus petite, des micro-habitats qui déterminent des ambiances de vie à partir des combinaisons de hauteurs d'eau, de vitesses d'écoulement et de substrats.

Ainsi, décrire et prendre en compte la répartition spatiale et temporelle des habitats thermiques est aussi important que les habitats physiques pour appréhender la qualité et la fonctionnalité d'un milieu vis-à-vis des espèces qu'il abrite. En effet, toute modification négative des conditions thermiques peut être considérée comme une dégradation d'habitats thermiques qui entraînera une répercussion directe sur les populations en place au même titre qu'une dégradation de l'habitat physique ou de la qualité chimique de l'eau.

Comme pour toutes les espèces de poissons, les tolérances thermiques des salmonidés varient selon les stades (œufs, alevins vésiculés, juvéniles et adultes). De même, les fonctions biologiques essentielles au cycle de vie (reproduction, développement embryo-larvaire, alimentation-croissance) vont présenter des préférendums thermiques différents (Elliot & Elliot 2010). Etant donné que ce guide s'intéresse uniquement à la distribution des habitats thermiques estivaux et à la caractérisation des refuges thermiques et climatiques, nous nous bornerons à n'utiliser que les tolérances thermiques qui concernent les stades nageant au cours de l'été (juvénile à adulte) et la fonction d'alimentation-croissance.

La truite commune, *Salmo trutta*, est l'espèce native la plus abondante dans les rivières pré-alpines et alpines concernées par les effets du changement climatique. C'est également l'espèce cible dont l'abondance des populations est suivie et utilisée comme indicateur de la qualité des milieux par les gestionnaires. Enfin, il s'agit probablement de l'espèce dont les tolérances thermiques ont été parmi les plus étudiées et documentées ; c'est donc naturellement, que la truite commune a été choisie comme espèce référente pour travailler sur les habitats thermiques estivaux dans le présent guide (figure 2).

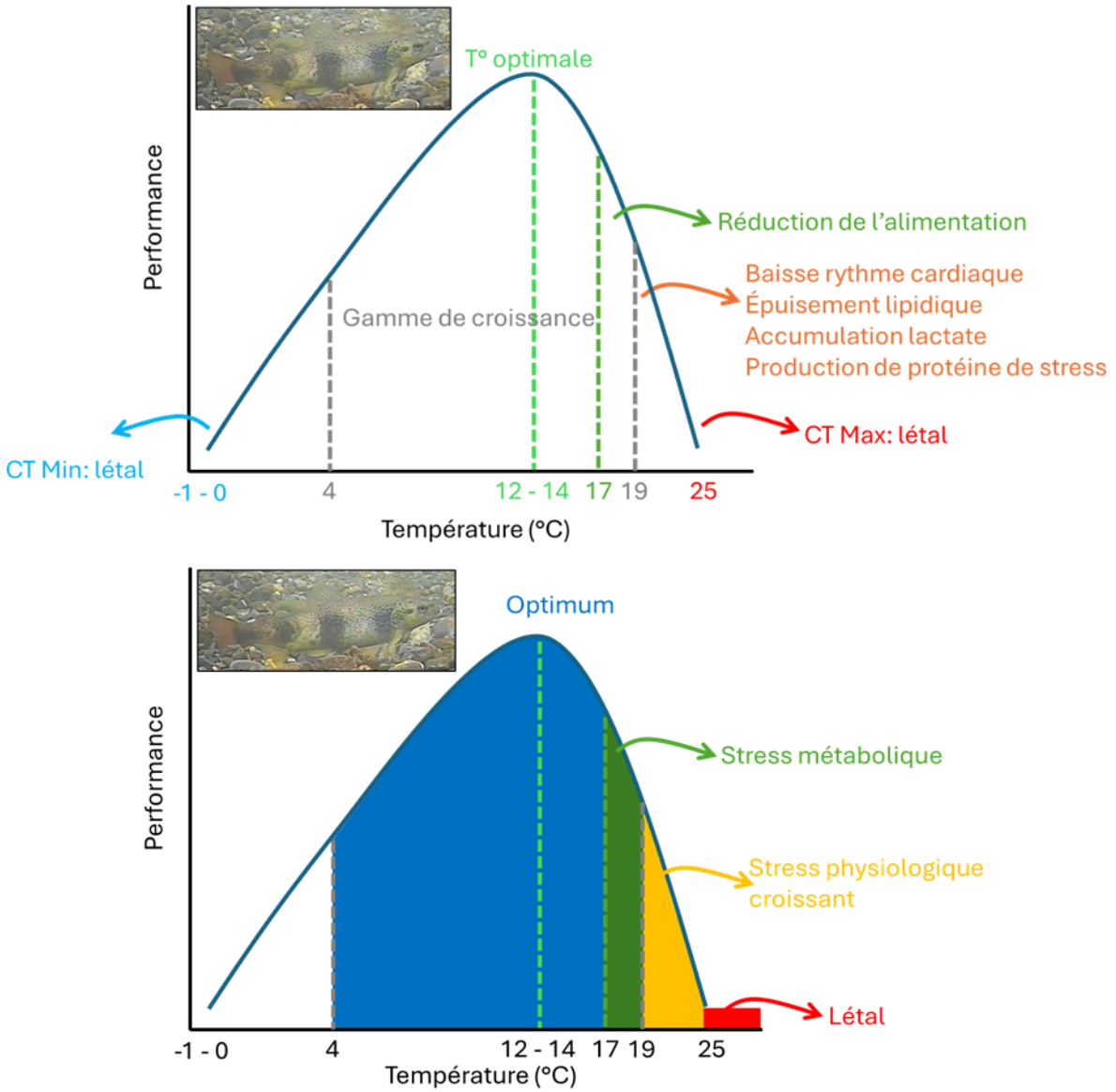


Figure 2 : Présentation des tolérances thermiques des juvéniles nageant et adultes pour l'espèce Salmo trutta (haut) et déclinaison en 5 catégories d'habitats thermiques traduisant des conditions thermiques plus ou moins favorables (d'après Alabaster & Lloyd 1980, Bell 2006, Crisp 1996, Elliot 1981, Elliott & Hurley 2001, Elliot & Elliot 2010, Varley 1967, Vornanen et al. 2014)

3.2 Refuge thermique et 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). La notion de refuge s'entend lorsque la température ambiante d'un tronçon de vie dépasse les tolérances 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.

Toutes les zones d'eau plus froide de la rivière recensées par IRT-a ne peuvent être considérées comme des refuges thermiques pour les salmonidés. En effet, pour être qualifiée de refuge thermique, une poche froide nécessite également de présenter un habitat physique utilisable pour les espèces considérées. Par exemple, certaines exfiltrations de banc de faible surface ou présentant une hauteur

d'eau trop faible pour jouer un rôle de refuge thermique et ne peuvent donc pas être considérées comme tels. (figure 3).

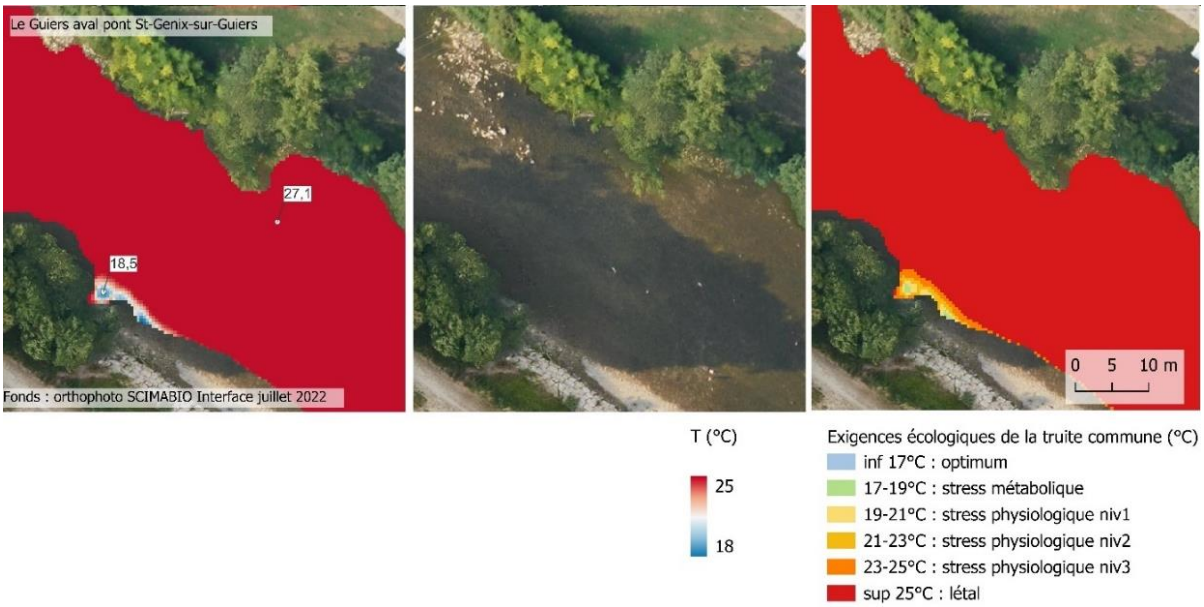


Figure 3 : Exemple d'une poche froide qui ne peut pas être considérée comme un refuge thermique potentiel en raison de sa faible qualité d'habitat (faciès-surface). A gauche : mosaïque thermique identifiant la poche froide. A droite : mosaïque thermique par rapport aux exigences de la truite montrant un potentiel intérêt écologique. Au centre : orthophoto montrant la faible qualité d'habitat pour les poissons.

Les refuges thermiques pour les salmonidés 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 comme dans le cas de résurgences d'eau souterraine (figure 4), 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 5).



Figure 4 : Exemples de poches froides 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.

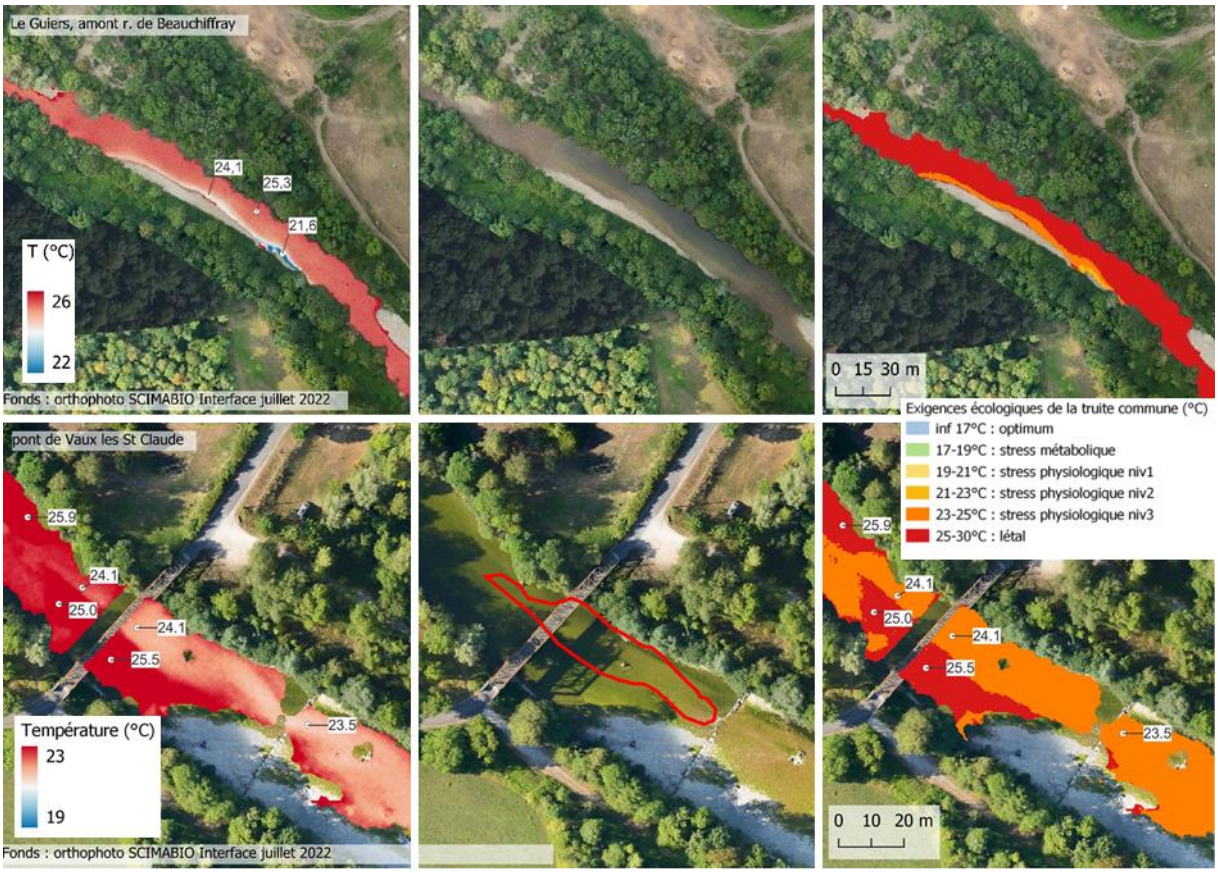


Figure 5 : Exemple de secteurs pouvant servir de refuge thermique temporaire avec des apports d'eau légèrement plus froids que la température de la rivière qui présentes des températures létales pour la truite. A gauche : mosaïque thermique identifiant le différentiel de température. A droite : mosaïque thermique par rapport aux exigences de la truite. Au centre : orthophoto.

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 (figure 8). 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, pour les salmonidés, 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 salmonidés de se maintenir sur le long terme.

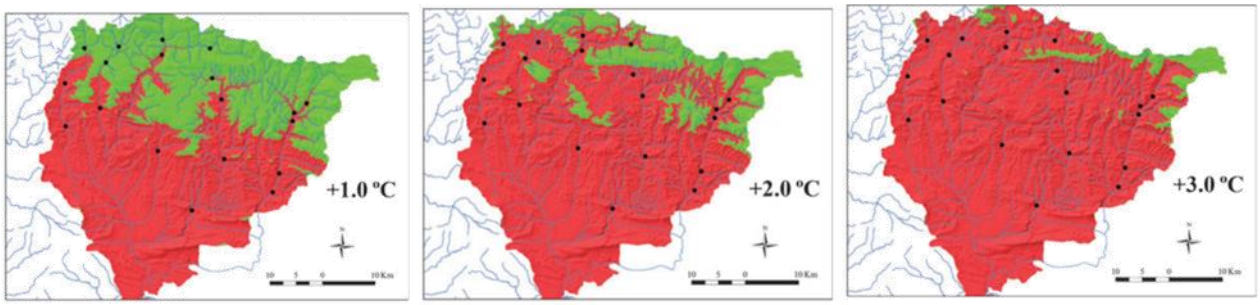


Figure 8 : Exemple d'évolution de l'habitat thermique favorable à la truite commune sous trois scénarii d'augmentation de la température moyenne de l'air montrant les refuges climatiques possibles (en vert) sur le bassin de la rivière Aragon en Espagne (modifié d'après Almodóvar et al. 2012).

3.3 UTILISATION DES REFUGES THERMIQUES PAR LES SALMONIDÉS

Les termes de **thermorégulation comportementale** ou de **comportement de thermorégulation** sont utilisés pour désigner tout comportement de mobilité des individus qui a pour objectif de fuir des conditions thermiques devenues inadéquates afin de rechercher des habitats thermiques plus favorables.

L'utilisation temporaire par les salmonidés, au cours de la période estivale, de refuges thermiques c'est-à-dire d'habitats présentant localement des conditions thermiquement plus favorables que celles de la rivière, est un comportement de thermorégulation typique qui est initié par un stress thermique.

La description dans la littérature scientifique des comportements de thermorégulation estivale des salmonidés permet de proposer un modèle conceptuel de comportement qui distingue plusieurs catégories ou phases (Linnansaari et al. 2023) :

- **Absence comportement de thermorégulation** lorsque les températures d'eau restent favorables ou acceptables ;
- **Thermorégulation dite facultative** à partir d'un certain seuil de température appelé *pejus* (littéralement « basculement vers le pire »), qui correspond à des valeurs de température qui dépassent la limite supérieure des températures optimales pour l'espèce/le stade concerné. Cette phase ne concerne pas forcément tous les individus d'une population, elle dépend de la capacité des individus à supporter l'augmentation de température. Cette thermorégulation facultative peut être observée jusqu'à des valeurs de températures qui dépassent légèrement le seuil de température critique, qui correspond à des conditions trop anaérobies qui ne permettent plus d'assurer un approvisionnement énergétique pour maintenir certaines fonctions vitales du cycle de vie (la nage, l'alimentation, la croissance). Dans cette gamme de températures, les conditions thermiques ambiantes de la rivière deviennent physiologiquement plus tolérables pour les individus qui vont chercher des habitats thermiques plus froids, dits de refuges ;
- **Thermorégulation dite obligatoire** quand le métabolisme anaérobie produit une concentration de protéines de stress et de lactate qui n'est plus acceptable, obligeant les individus à trouver un habitat thermique plus favorable pour éviter la mort.

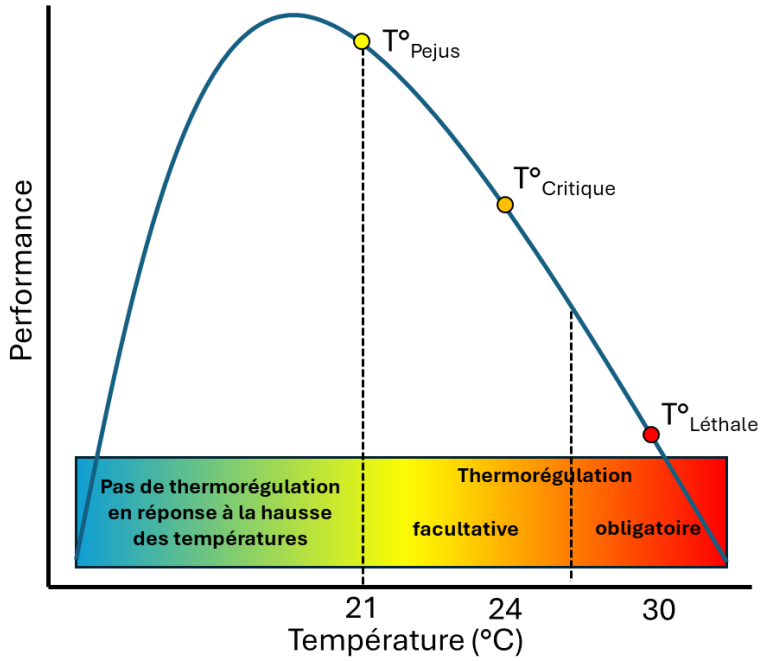


Figure 9 : exemple de modèle conceptuel de comportement de régulation chez le saumon Atlantique (modifié d'après Linnansaari et al. 2023).

Des exemples de comportements de thermorégulation estivale chez les salmonidés ont été décrits par plusieurs auteurs (Ebersole et al. 2001, Strange 2011, Dugdale et al. 2016, Frechette et al. 2018, Wang et al. 2020, Sullivan et al. 2021, O'Sullivan 2022, Corey 2022, Linnansaari et al. 2023, Morgan et O'Sullivan 2023).

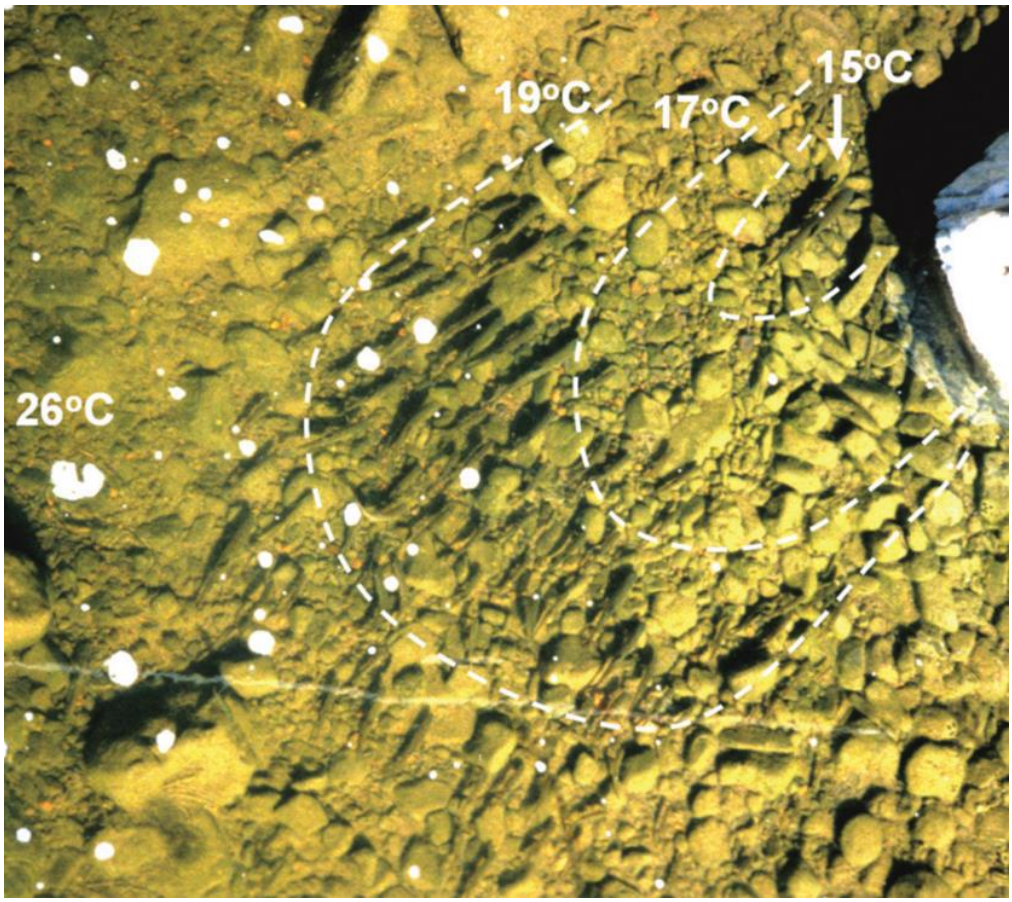


Figure 10 : Exemple d'un rassemblement de truites arc en ciel observé au niveau d'un refuge thermique sur la rivière Joseph Creek (USA) (Ebersole et al. 2001).

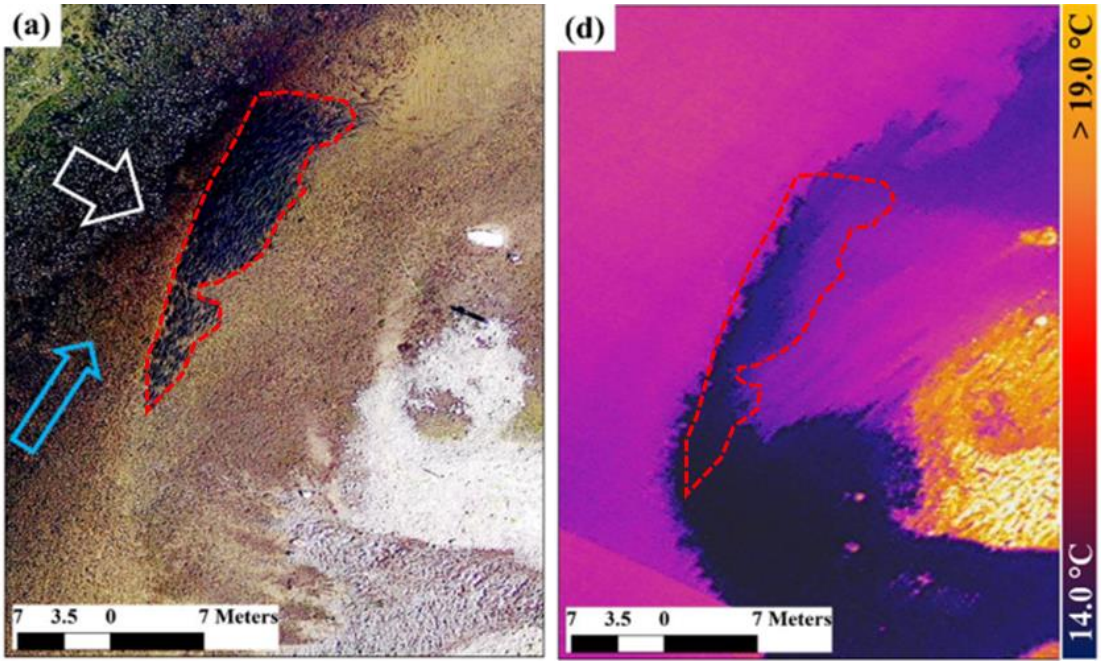


Figure 11 : Exemple de rassemblement de saumon Atlantique (pointillés rouges) au sein d'un refuge thermique formée par le panache d'un affluent sur la rivière Miramichi (Canada) (modifié d'après O'Sullivan et al. 2022).

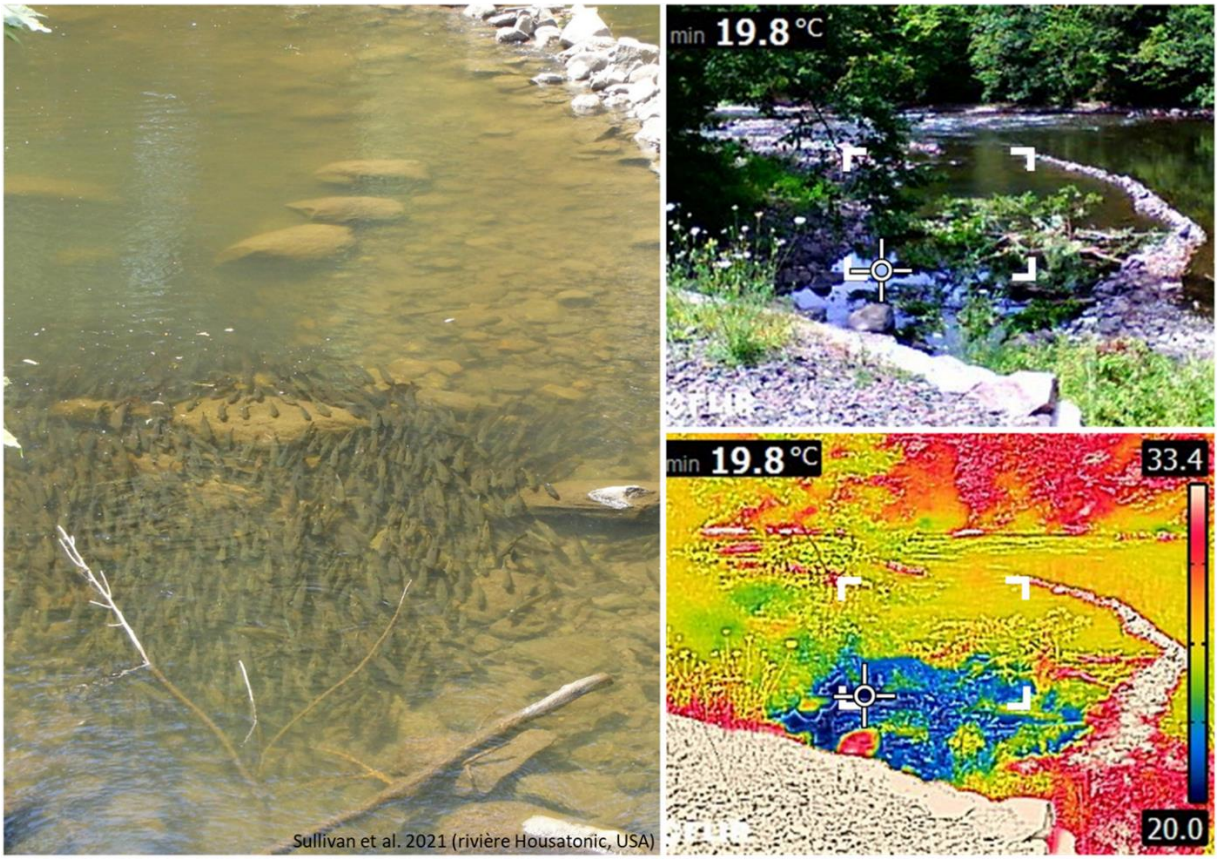


Figure 12 : Exemple d'un rassemblement de différentes espèces de salmonidés (truite arc en ciel, truite fario et saumon de fontaine) au sein d'un refuge thermique sur la rivière Housatonic (USA) (modifié d'après Sullivan et al. 2021).

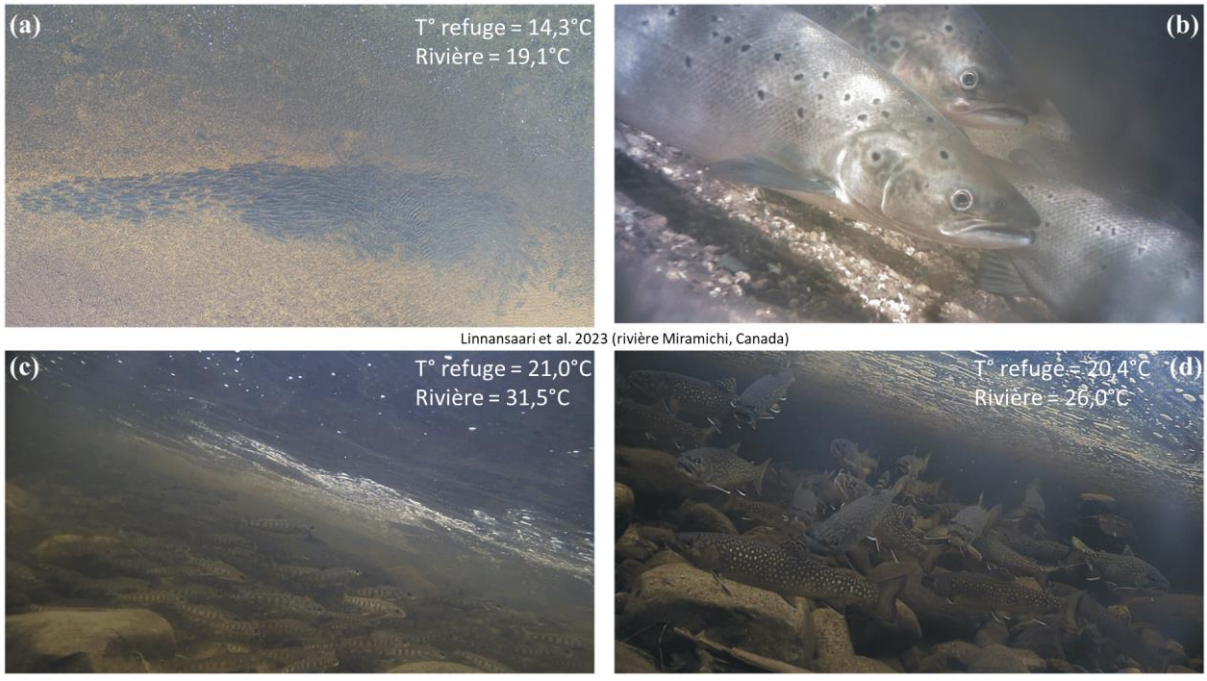


Figure 13 : Exemples de rassemblement de saumons Atlantique adultes (a et b) et juvéniles (c) et de saumons de fontaine (d) au sein de refuges thermiques identifiés sur la rivière Miramichi (Canada) (modifié d'après Linnansaari et al. 2023).

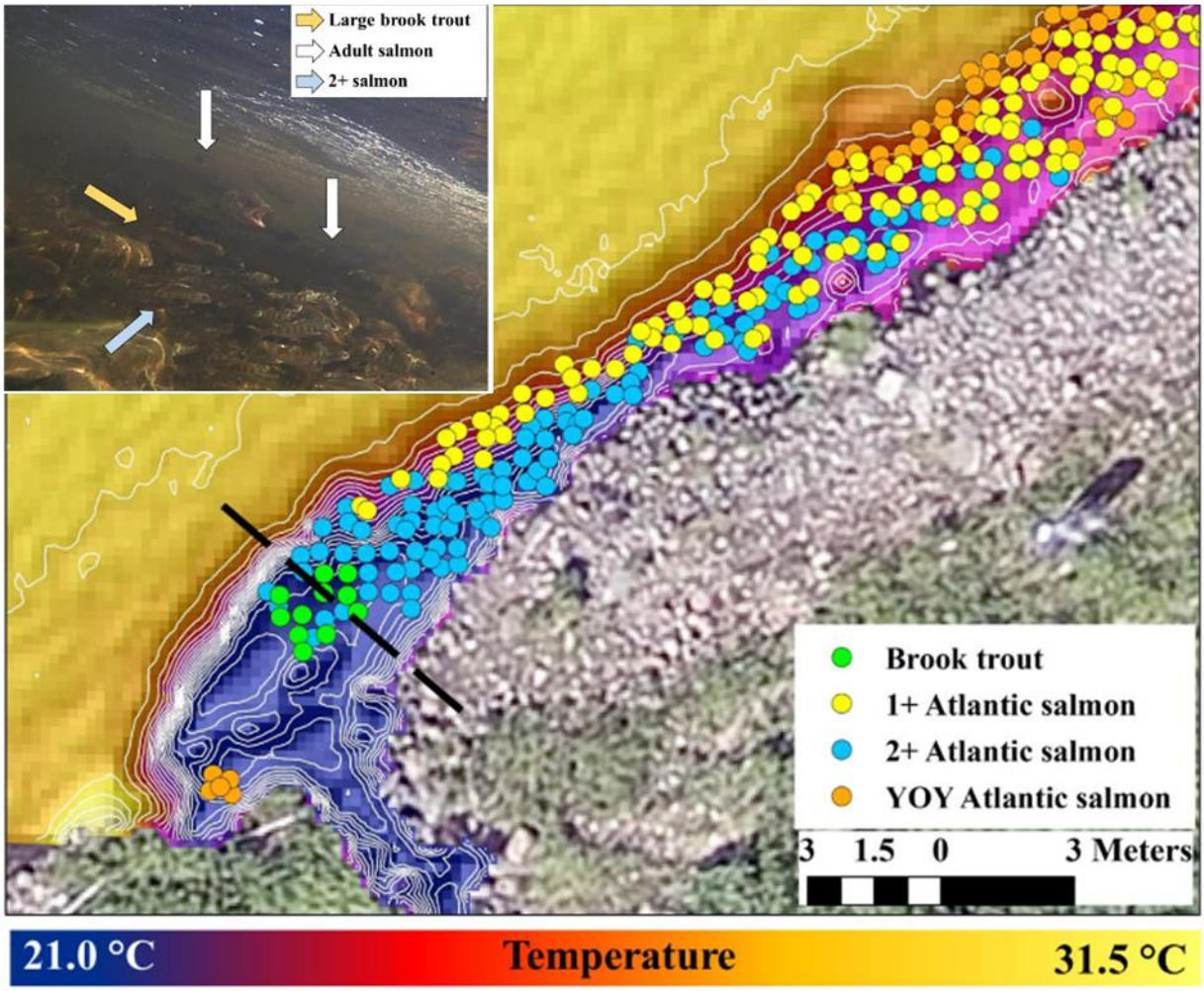


Figure 14 : Exemples de rassemblement de saumons Atlantique et de saumons de fontaine au sein d'un refuge thermique formé par le panache d'un affluent sur la rivière Miramichi (Canada) (modifié d'après Morgan et O'Sullivan. 2023). Les points de couleur correspondent à la localisation des individus au sein du refuge thermique.

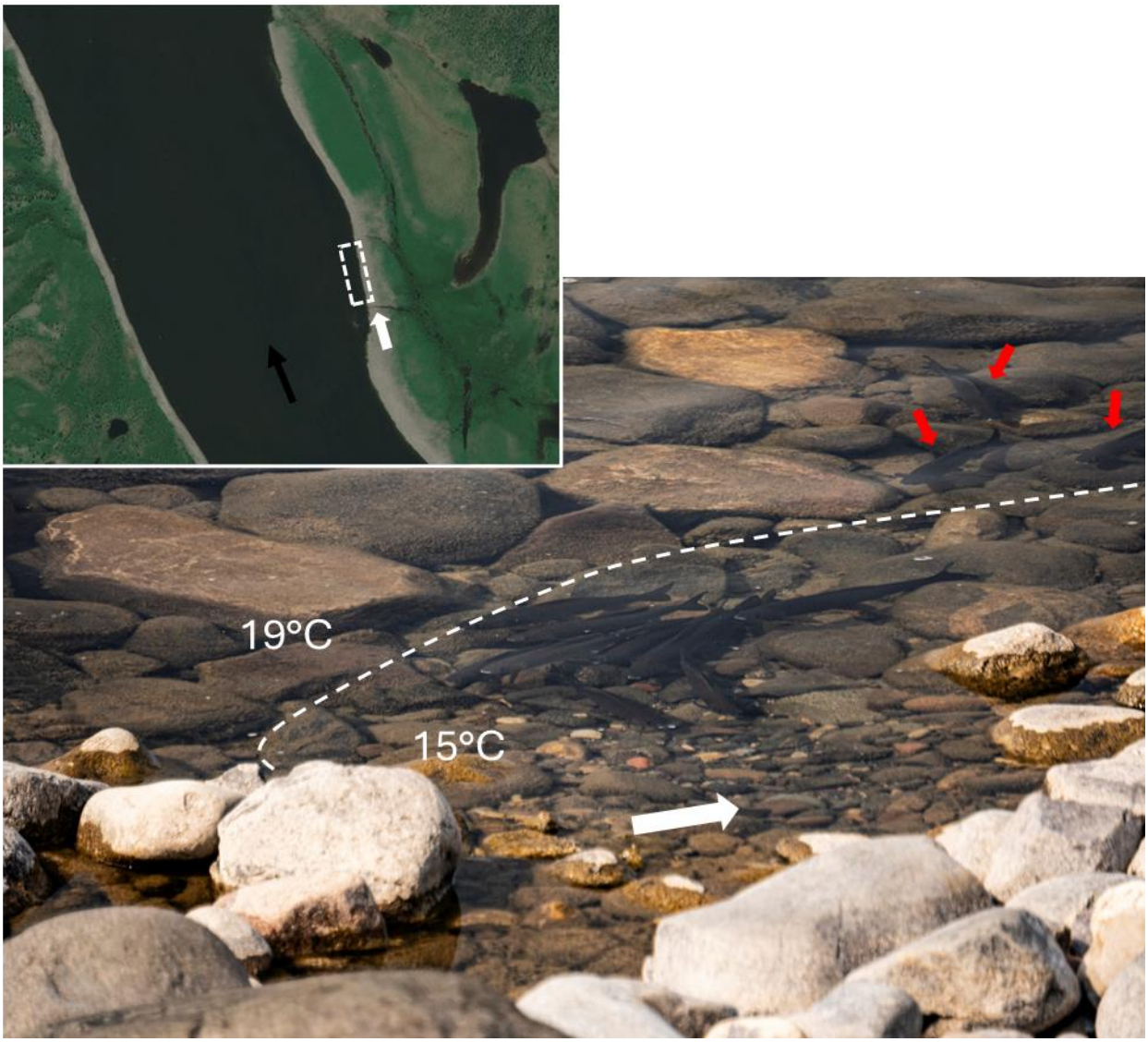


Figure 15 : Exemple de rassemblement d'ombres Arctique au sein d'un refuge thermique formé par un suintement latéral sur la rivière Coppermine (Canada) (Caudron com. pers) (Crédit photo : Zarn). La flèche blanche localise l'arrivée du suintement. Les flèches rouges localisent des individus qui s'approchent de la zone refuge.

4. LES ÉTAPES D'ANALYSES DE DONNÉES APPLIQUÉES AUX HABITATS THERMIQUES DES SALMONIDES

La cartographie thermique par IRT-a fournit une carte de température de surface des rivières avec une information de température par pixel. Une suite de traitements SIG et géostatistiques permet notamment d'obtenir un profil longitudinal de température, ainsi qu'une carte de la distribution des poches froides et/ou chaudes le long de ce profil. Les étapes d'analyse proposées ci-dessous permettent d'interpréter ces résultats, avec pour objectif d'illustrer les conditions d'habitats thermiques pour des individus thermosensibles comme les salmonidés.

4.1 ETAPE 1 : CONDITIONS HYDRO-CLIMATIQUES ET THERMIQUES DE L'EAU AU MOMENT DU SURVOL

La distribution et les caractéristiques des refuges thermiques (abondance, taille, type de refuge) le long d'un cours d'eau sont fortement influencées par l'hydrologie, la température de l'air et la pluviométrie (Dugdale et al. 2013). Dans la majorité des cas d'étude, les données IRT-a sont acquises lors d'une seule campagne réalisée au cours des journées les plus chaudes de l'été et durant les heures les plus chaudes de la journée (entre 17h et 19h). Aussi, avant d'entreprendre les interprétations d'un jeu de données, il est nécessaire d'informer sur la représentativité des conditions lors du survol vis-à-vis de l'ensemble de la période estivale.

Pour ce faire, il suffit de décrire les conditions hydro-climatiques (débits et amplitudes des température d'air) le jour du survol et sur l'ensemble de la période estivale la plus chaude, par exemple du 15 juin au 31 août (figure 16).

La figure 16 ci-dessous présente deux situations différentes obtenues sur le Guiers en 2022 et le Dessoubre en 2023 :

- Sur le Guiers, des conditions similaires à celles du survol ont été observées pendant 24 jours entre le 15 juin et le 31 août, soit 31% du temps. La situation d'habitats thermiques et de refuges thermiques obtenue le jour du survol peut être considérée comme ayant une chance non négligeable de s'être reproduit pendant ces 23 autres jours au cours de l'été.
- Sur le Dessoubre, l'acquisition IRT-a a été réalisée en pleine canicule sur une fenêtre correspondante aux 3 jours les plus chauds de l'été et lors d'un débit d'étiage parmi les plus sévères. Aussi, la cartographie thermique obtenue sera représentative des conditions hydro-climatiques les plus critiques.

Il est particulièrement difficile de définir les conditions parfaites pour réaliser ce genre d'acquisition, et aucune de ces deux situations n'entrave l'analyse et l'interprétation des résultats. En revanche, il est indispensable que cette mise en contexte préalable soit faite afin d'avoir en permanence à l'esprit les conditions dans lesquelles les résultats peuvent/doivent être interprétés.

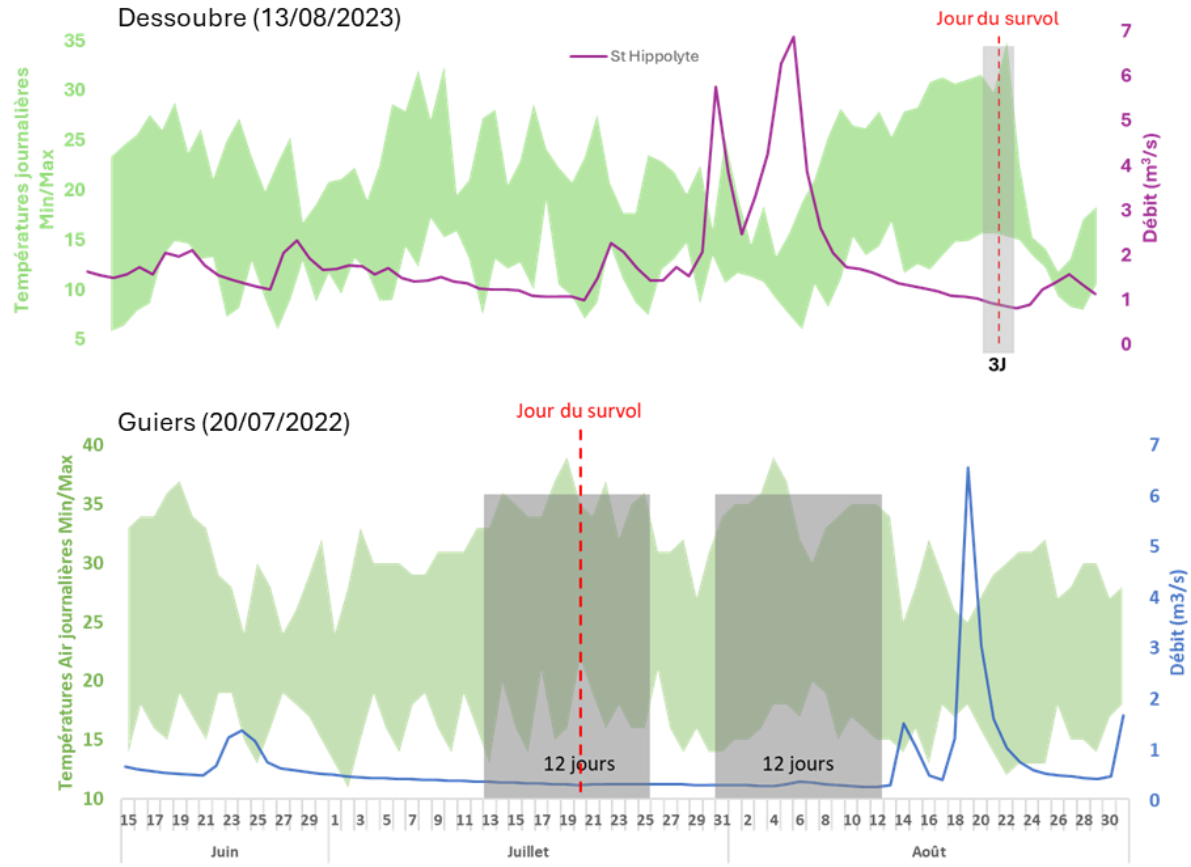


Figure 16 : Conditions hydro-climatiques observées sur le Dessoubre en 2023 et le Guiers en 2022 du 15 juin au 31 août. La date du survol est repérée. En gris : les plages journalières où les conditions hydro-climatiques sont comparables à celles observées le jour du survol.

De la même manière, à partir des sondes thermiques disposées par les gestionnaires, il est possible de caractériser les températures d'eau de la rivière au moment du survol et de les comparer par rapport à celles observées sur l'ensemble de la période estivale. Les températures moyennes journalières observées sur le Guiers en été 2022 indiquent que l'acquisition IRT-a a été conduite lorsque les températures d'eau étaient parmi les plus chaudes de l'été (figure 17).

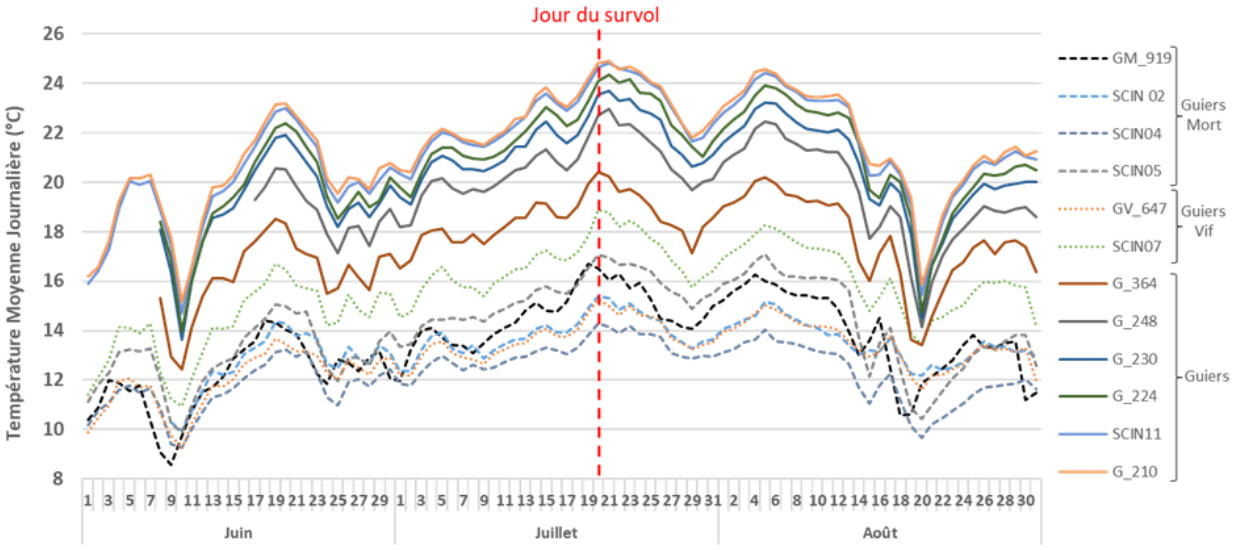


Figure 17 : Températures moyennes journalières du 1er juin au 31 août 2022 sur 12 stations de suivi thermique réparties sur le linéaire du Guiers et matérialisation du jour du survol.

4.2 ETAPE 2 : DIVERSITÉ THERMIQUE DE LA RIVIÈRE VIS-À-VIS DES SEUILS DE TOLÉRANCE DES SALMONIDÉS

Un premier niveau d'information générale qui renseigne sur les conditions thermiques à l'échelle de la rivière peut être obtenue en confrontant la répartition des températures des pixels en eau au moment du survol avec les exigences thermiques des salmonidés. Ces informations permettent d'obtenir des données quantitatives sur les surfaces en eau des différents habitats thermiques observés au moment du survol. La figure 18 ci-dessous illustre trois cas contrastés obtenus sur le Guiers et le Chéran en 2022 et sur le Cusancin (affluent du Doubs) en 2023. Ainsi par exemple, ces données permettent de montrer que sur le Guiers, au moment du survol, 50% de la surface en eau étudiée dépassait le seuil létal de 25°C et que la quasi-totalité des températures présentait des valeurs au-dessus du seuil de stress de 19°C. Le seuil de 25°C concernait 25% de la surface en eau sur le Chéran alors qu'il était quasi nul sur le Cusancin.

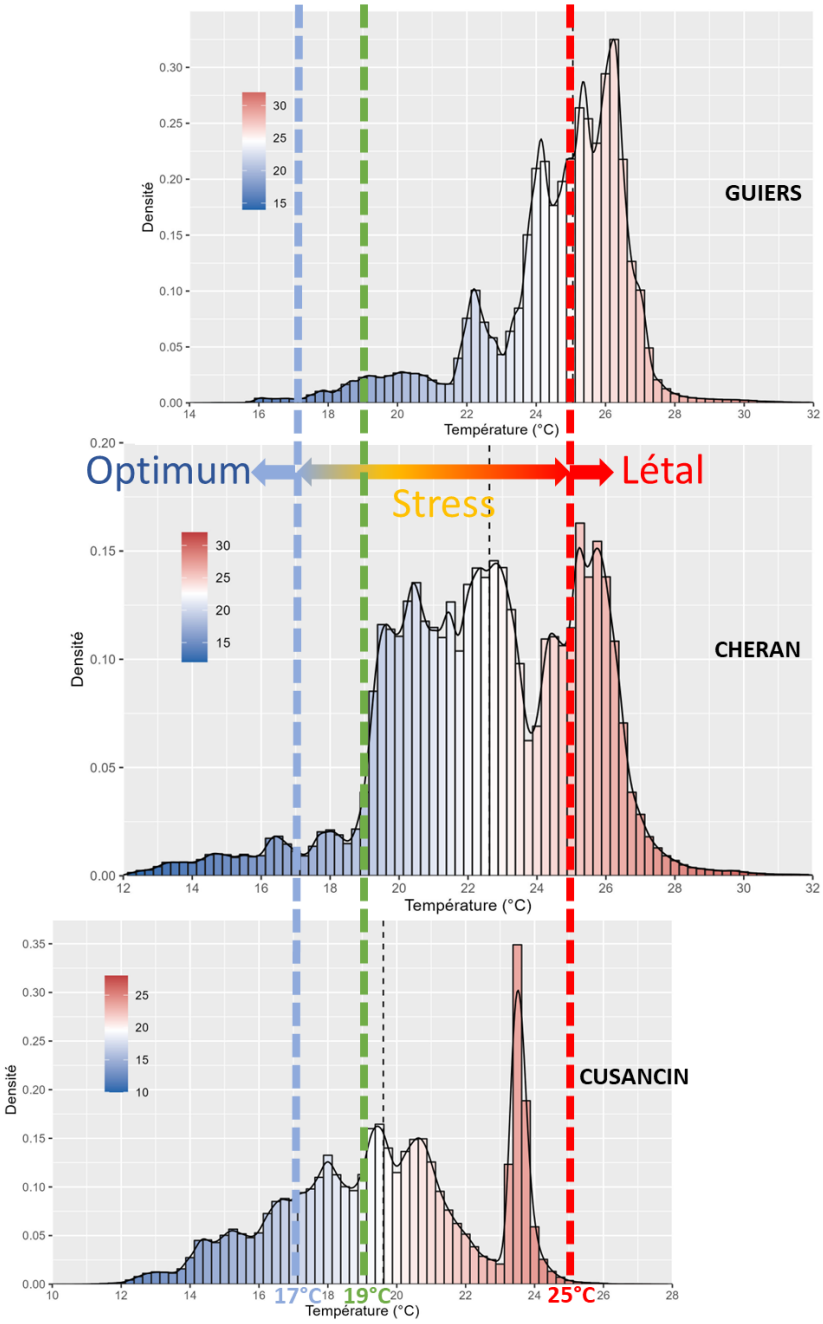


Figure 18 : Distribution des températures des pixels en eau obtenues au moment du survol sur le Guiers, le Chéran et le Cusancin en relation avec les différents seuils des tolérances thermiques de la truite commune.

Pour autant, les conditions hydrométéorologiques lors de l'acquisition réalisée sur le Cusansin étaient nettement plus défavorables que celles observées pour le Chéran et le Guiers (figure 16, le Cusansin a été imagé le même jour que le Dessoubre). Ce contraste illustre l'importance de la première étape de mise en contexte de la campagne afin d'assurer une interprétation précise des résultats.

4.3 ETAPE 3 : PROFIL THERMIQUE LONGITUDINAL ET TOLÉRANCES THERMIQUES

La mise en relation du profil thermique longitudinal avec les tolérances connues pour la truite commune permet de partitionner le profil en différents habitats thermiques et d'obtenir une autre information quantitative. Celle-ci renseigne sur la répartition des conditions thermiques le long du linéaire de la rivière étudiée et permet de connaitre la variabilité spatiale des habitats thermiques, c'est-à-dire la manière dont se distribuent ces habitats sur le linéaire, et de quantifier les kilomètres de rivière de chaque habitat. La figure 19 illustre un exemple d'application sur le Chéran. La projection, sur ce même profil thermique, des poches froides recensées par IRT-a apporte également une information complémentaire intéressante vis-vis des poissons. En effet, elle permet d'identifier si des poches froides permettent d'offrir localement des habitats thermiques plus favorables que la température ambiante de la rivière.

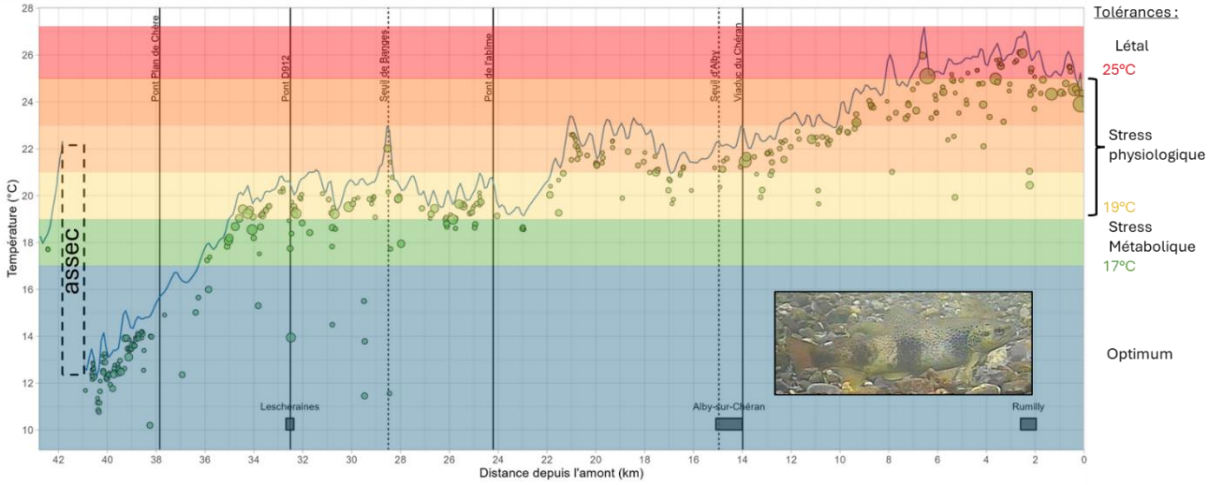


Figure 19 : Exemple sur le Chéran d'une mise en relation du profil thermique longitudinal obtenue par IRT-a avec les différentes catégories d'habitats thermiques définis pour la truite commune à partir de ses tolérances. Les poches froides recensées par IRT-a sont également projetées sur le profil en long.

Ensuite, tous les patchs d'habitat thermique observés sur le profil sont projetés sous la forme d'un graphique en code barre (Figure 20).

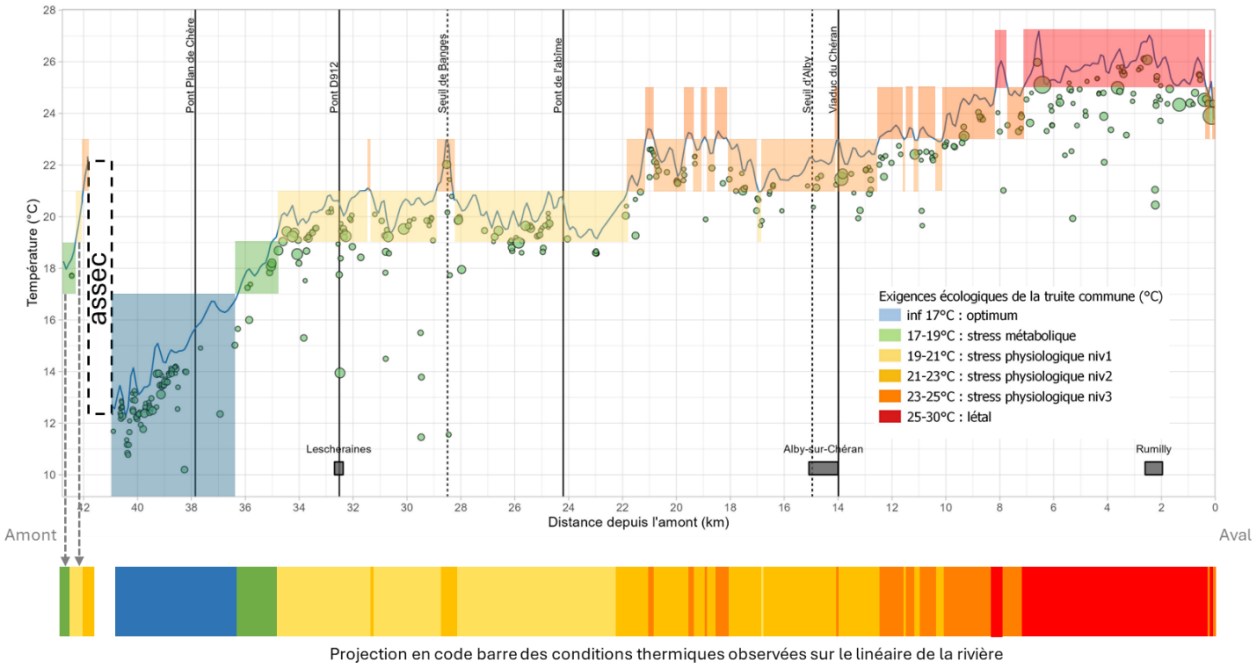


Figure 20 : Illustration sur le Chéran de la projection des différents patchs d'habitats thermiques observés sur le linéaire permettant d'obtenir une représentation de type « code-barre ».

Cette représentation permet de mieux visualiser la variation spatiale des différents habitats thermiques sur le linéaire et de réaliser des comparaisons inter-rivières (figure 21).

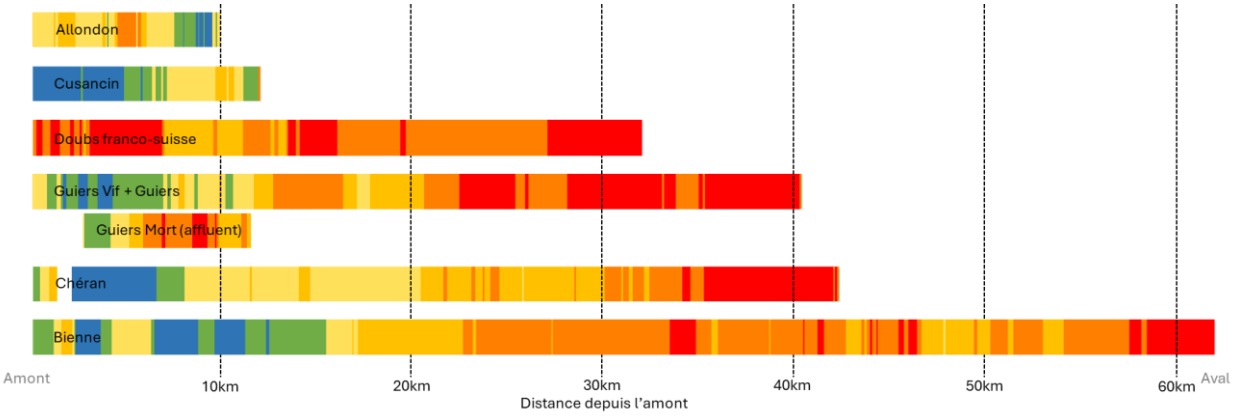


Figure 21 : Exemples de répartition linéaire des différents habitats thermiques pour la truite obtenue sur différents cours d'eau à partir des données IRT-a.

A partir de ces données, il est possible de calculer les pourcentages en linéaire de cours d'eau des différents habitats thermiques auxquelles étaient confrontés les salmonidés au moment du survol (tableau 1).

Tolérances thermiques		Guiers (20/07/2022)		Chéran (19/07/2022)		Bienne (21/07/2022)		Cusancin (23/08/2023)	
≤17°C	Optimum	2,8%		10,6%		8,6%		40,2%	
17-19°C	Stress métabolique	13,3%		4,5%		11,1%		23,0%	
19-21°C	Stress physiologique	12,9%	53,2%	29,6%	68,2%	6,8%	69,2%	28,7%	36,9%
21-23°C		14,4%		24,4%		20,4%		7,4%	
23-25°C		25,9%		14,2%		42,0%		0,8%	
>25°C	Létal	30,7%		16,7%		11,1%		0,0%	

Tableau 1 : Exemples sur quatre rivières de la répartition relative des différents habitats thermiques définis pour la truite commune obtenue au moment du survol IRT en pourcentage du linéaire.

En intégrant ces données dans un système d'information géographique (ici projet QGIS), la répartition spatiale des habitats thermiques pour la truite commune peut également être représentée sous format cartographique pour permettre d'illustrer d'autres éléments de compréhension (figure 22).

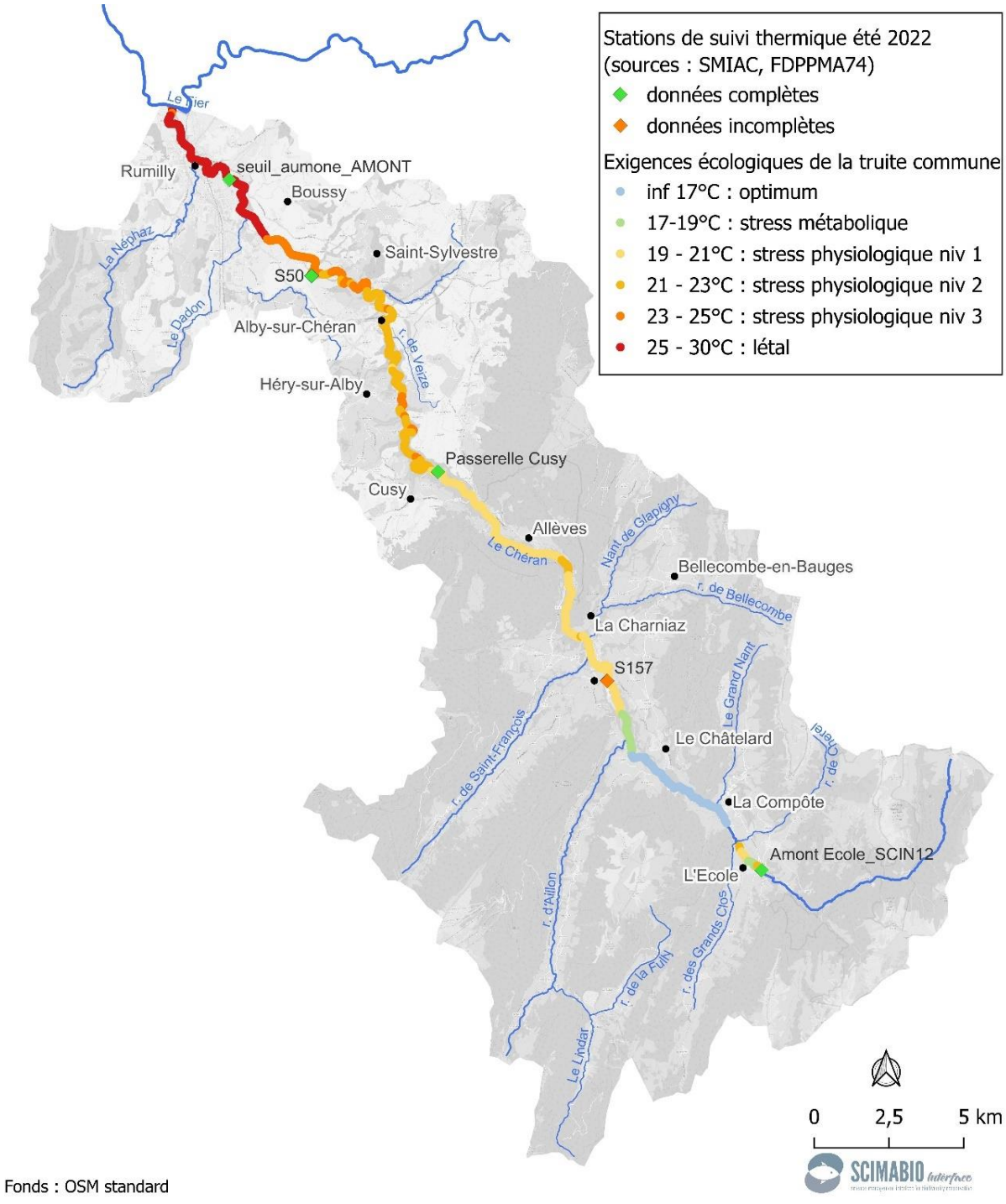


Figure 22 : Exemple de représentation cartographique de la répartition des habitats thermiques pour la truite commune sur le linéaire du Chéran imagé par IRT-a. Les cinq stations de suivi thermique sont également repérées pour visualiser les sites où des données de température horaire sont disponibles afin de compléter l'information spatiale obtenue par IRT-a.

4.4 ETAPE 4 : VARIATION SPATIO-TEMPORELLE DES HABITATS THERMIQUES AU COURS DE L'ÉTÉ

Les données obtenues lors d'une campagne IRT-a informent uniquement sur la répartition spatiale des habitats thermiques au moment du survol. Ainsi, pour appréhender la variation spatio-temporelle de ces habitats au cours de l'été, il est nécessaire de coupler les données spatiales IRT-a et les données temporelles des stations de suivi de la température d'eau obtenus à l'aide de sondes enregistreuses.

Au niveau spatial, les données IRT-a permettent de représenter précisément (au niveau de chaque pixel) les mosaïques d'habitats thermiques sur l'ensemble du linéaire observable depuis les airs. Cette cartographie permet de mieux visualiser certains résultats clés comme des variations importantes des habitats ou-micro-habitats thermiques sur un tronçon de rivière (figure 23) ou des points de basculement d'habitat thermiques correspondants à des linéaires qui montrent un passage définitif au-dessus de températures représentant des seuils de tolérances vis-à-vis des salmonidés (figure 24).

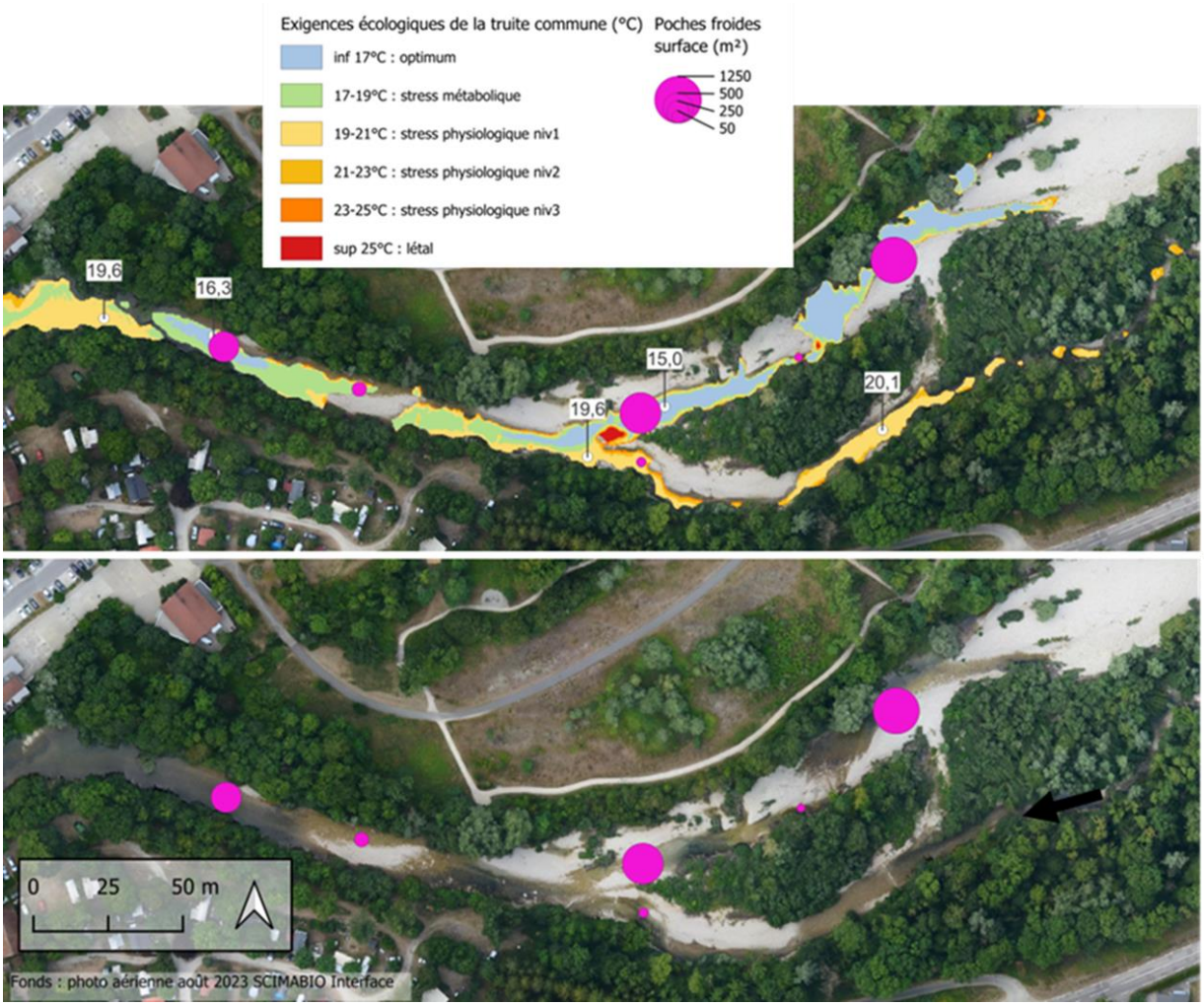


Figure 23 : exemple de cartographie des mosaïques d'habitats thermiques pour la truite commune qui illustre la forte variabilité et diversité d'habitats obtenue sur un tronçon du Guiers.

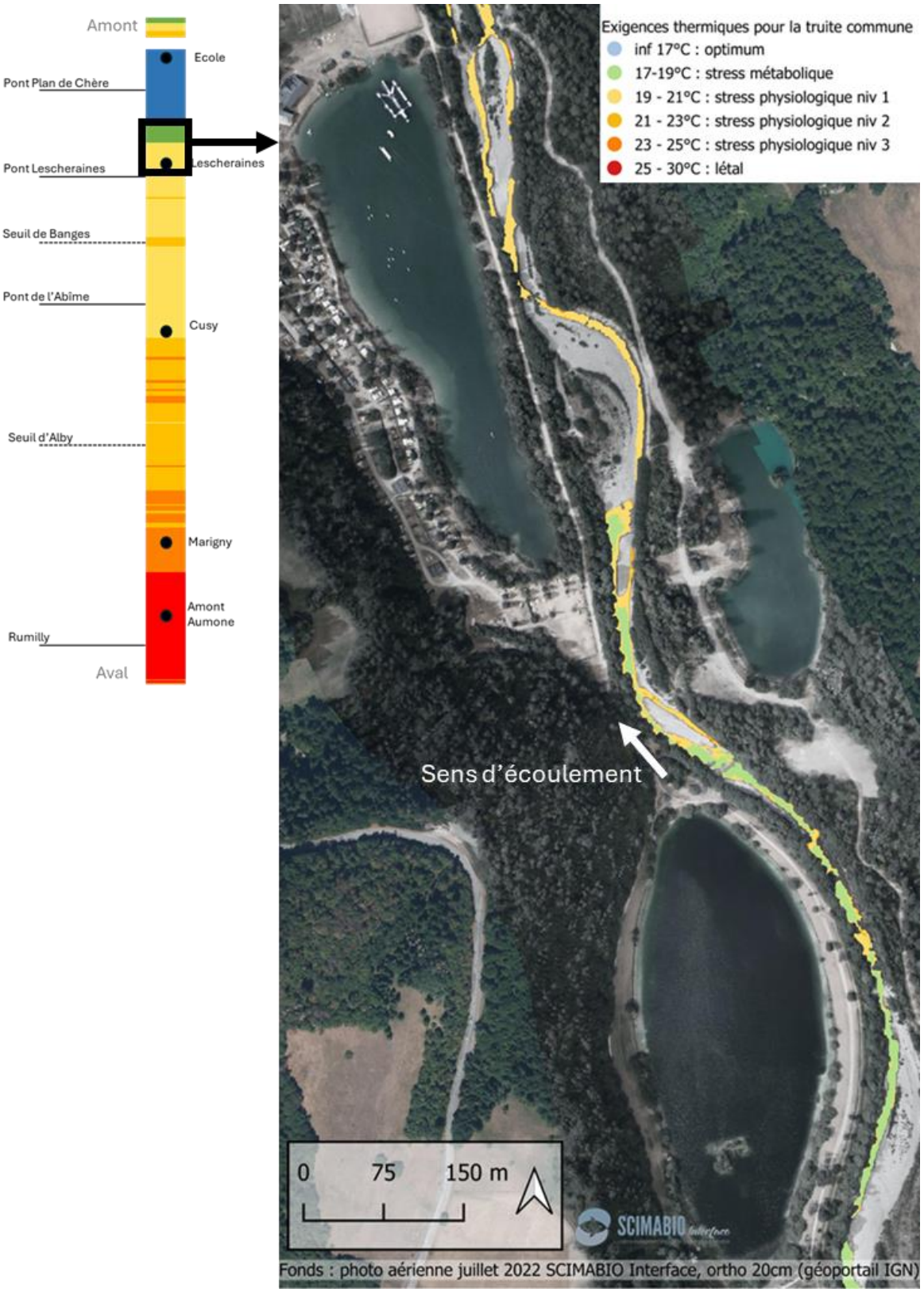


Figure 24 : Exemple de cartographie des mosaïques d'habitat thermiques illustrant une zone de basculement (passage définitif au-dessus du seuil de 19°C) observée sur le Chéran.

Enfin, le couplage des données spatiales et des données temporelles permet de décrire la variation spatio-temporelle des habitats thermiques (figure 25). L'analyse temporelle permet de calculer des indicateurs de durées consécutives et totales des différents habitats thermiques au cours de l'été. Elle permet également d'intégrer les variations thermiques au cours de chaque journée pour évaluer l'existence ou non de conditions d'habitat thermiques plus favorables certaines heures de la journée et décrire la durée et la répétabilité des cycles de stress journaliers.

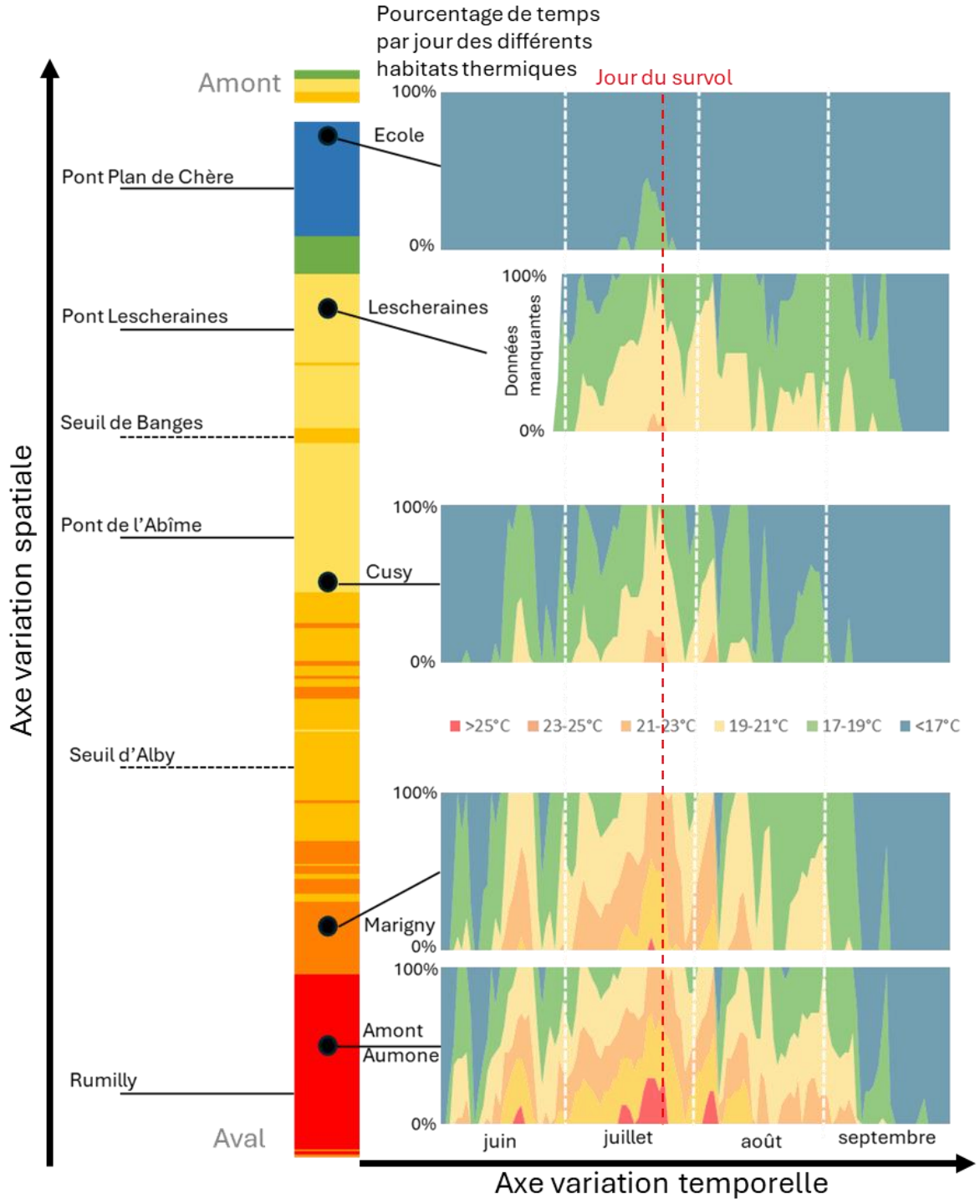


Figure 25 : Exemple d'analyse spatio-temporelle représentant les conditions d'habitats thermiques pour la truite commune sur le Chéran pour l'été 2022. Les points noirs sur la représentation en « code-barre » des patchs d'habitat thermique sur le linéaire indique la localisation des sondes thermiques enregistreuses.

4.5 ETAPE 5 : CARTOGRAPHIE DES REFUGES THERMIQUES ET CLIMATIQUES

4.5.1 INVENTAIRE ET LOCALISATION

La localisation des principaux refuges thermiques et des tronçons de rivière clés qui présentent des concentrations d'apports d'eau plus froide que la rivière permettant d'offrir des habitats thermiques plus favorables aux salmonidés est une étape essentielle. Une fois les zones refuges inventoriées, il s'agira de déterminer leur origine et leur caractéristique afin de pouvoir proposer des mesures de conservation et restauration efficaces.

Les rôles que peuvent jouer les différentes poches froides recensées en termes d'habitats thermiques peut-être visualisées en juxtaposant leur localisation et leur caractéristiques (surface et delta thermique par rapport à la rivière) avec les conditions d'habitats thermiques pour la truite (figure 26).

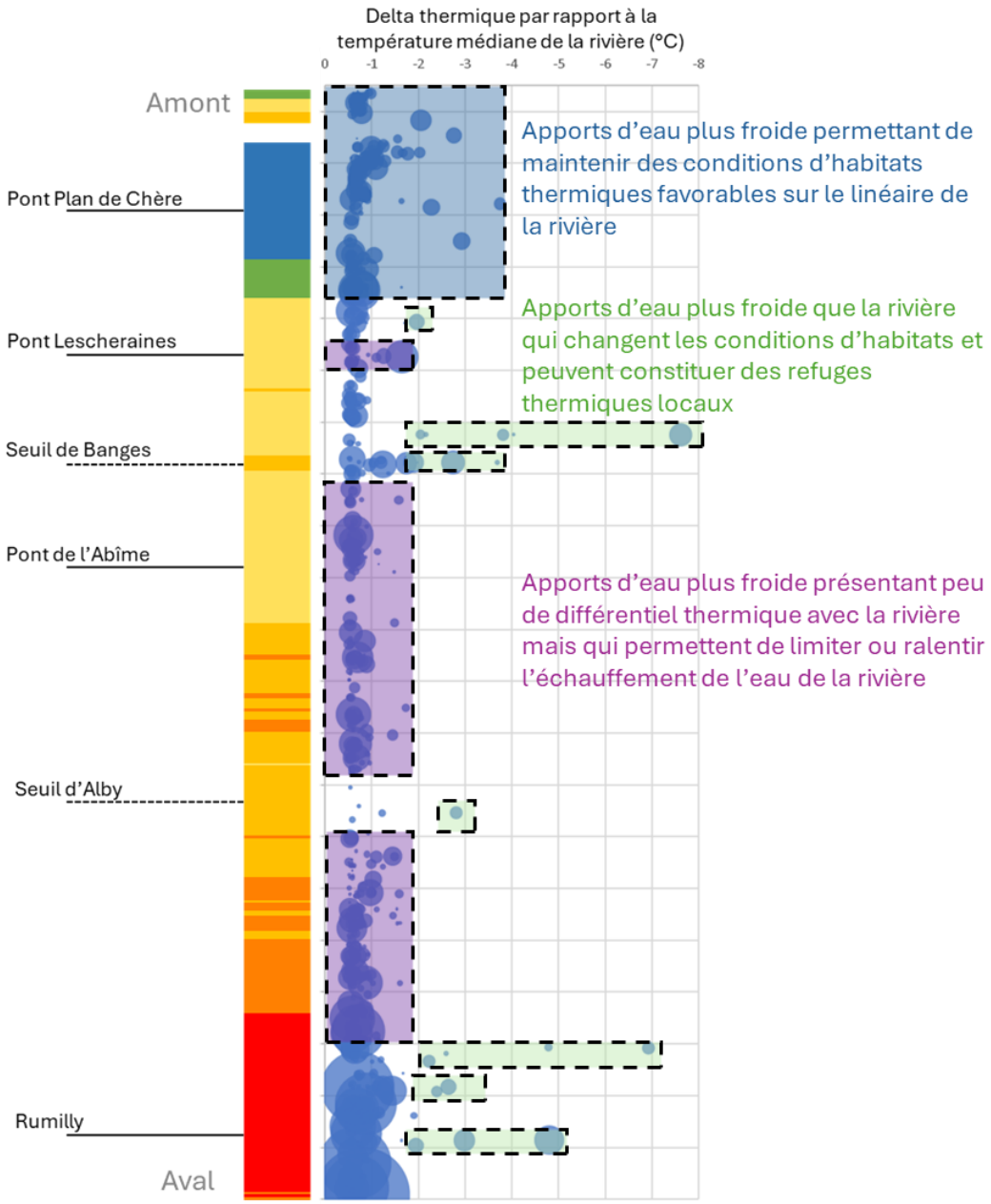


Figure 26 : Projection de la localisation et des caractéristiques des poches froides recensées sur le Chéran par rapport aux habitats thermiques observés au moment du survol IRT-a.

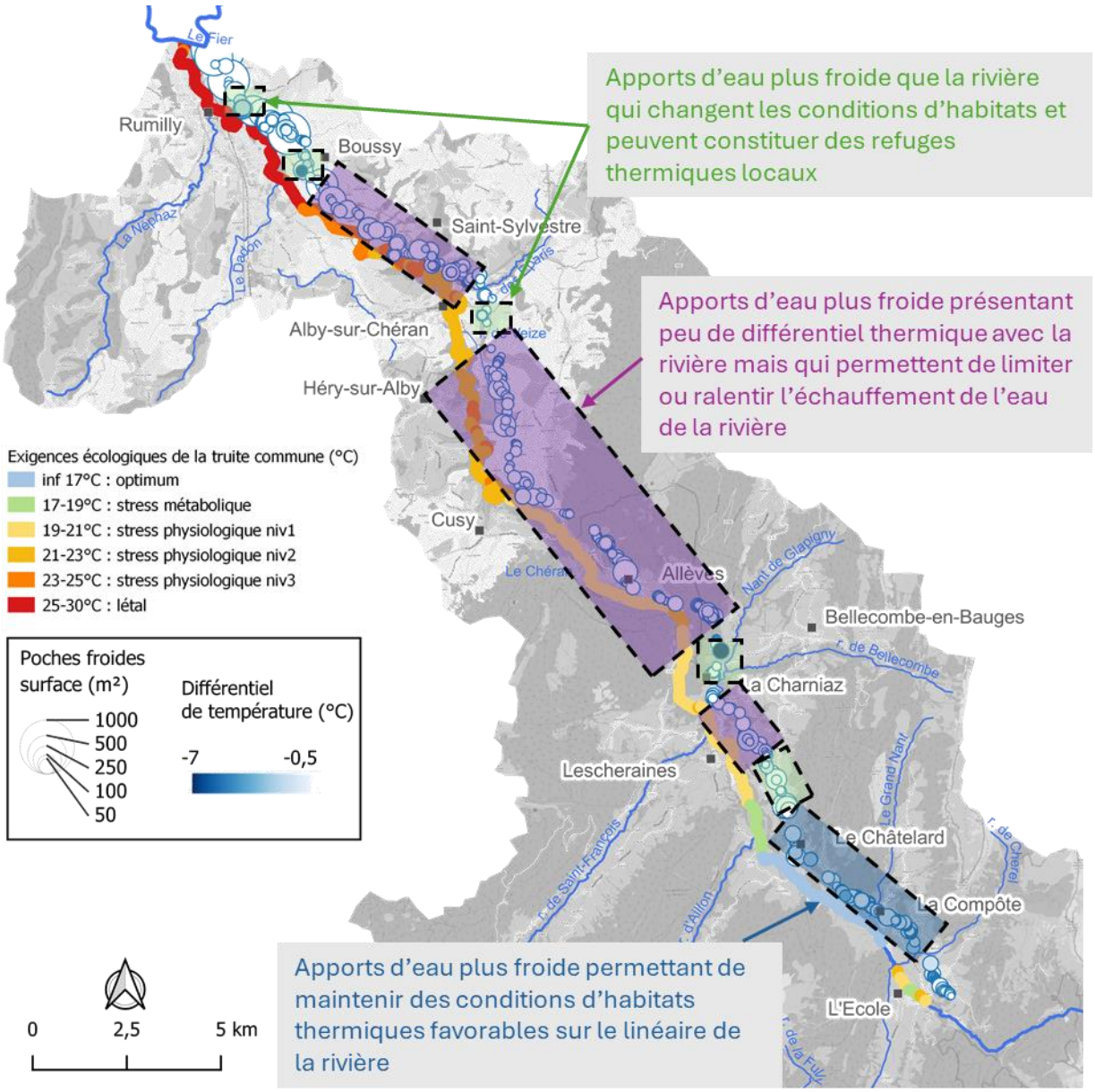


Figure 27 : exemple de carte présentant la répartition des habitats thermiques recensés par IRT-a au moment du survol et la localisation des poches froides recensées sur le linéaire du Chéran.

4.5.2 TYPOLOGIE ET ORIGINE HYDROLOGIQUE DES REFUGES

Il est important de distinguer la classification géomorphologique des refuges, qui informe sur la forme que prend le refuge et son positionnement au sein du chenal (exfiltration de banc, suintement latéral, chenal latéral, alcôve, …) et la classification hydrologique qui renseigne sur l'origine de l'eau plus froide qui arrivent dans la rivière (affluent, résurgence karstique, exfiltration de la nappe phréatique, …). A noter que ces typologies ne sont pas contradictoires, et sont même fortement liées pour certaines classes. Ces deux renseignements sont essentiels pour permettre de formuler des recommandations de protection différenciées adéquates qui permettront de **conserver à la fois la structure morphologique** qui permet l'apport d'eau froide **et la source hydrologique** qui alimente en eau le refuge thermique.

Concernant la classification géomorphologique, entre les années 1980 et 2010, de nombreux auteurs ont décrit les structures morphologiques permettant des échanges nappe/rivière qu'ils rencontraient dans leur cas d'étude. Plus récemment, avec le développement de la technologie IRT-a qui a permis d'augmenter le nombre de descriptions, de nouveaux travaux sont venus enrichir cette réflexion en proposant des typologies de structures morphologiques en lien avec leur potentiel rôle en tant que refuges thermiques (Torgersen et al. 2012, Dugdale et al. 2015, Sullivan et al. 2021, Marteau et al. 2022a) (tableau 2).

Concernant l'origine hydrologique, nous pouvons différencier :

- Les eaux de surface qui concernent essentiellement les panaches d'affluents qui confluent avec une température plus froide que celle de la rivière principale.
- Les apports ou résurgences hyporhéiques qui proviennent simplement d'un refroidissement limité des eaux de surface lors de leur passage au sein de la zone hyporhéique.
- Les exfiltrations de la nappe phréatique qui correspondent à des remontées en surface d'eau profonde souvent induit par les caractéristiques géologiques du bassin versant et de la vallée.
- Les résurgences karstiques qui correspondent à des eaux de surface situées plus en altitude sur le bassin versant qui se sont infiltrées et refroidit au sein d'un système karstique souterrain avant de réapparaitre à l'air libre.

Le tableau 2 présente une synthèse typologique des différentes formes et origines hydrologiques des refuges thermiques potentiels.

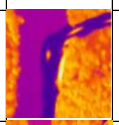
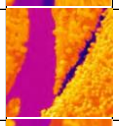
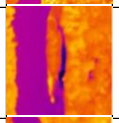
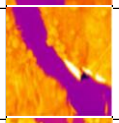
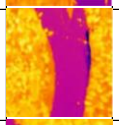
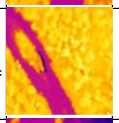
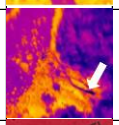
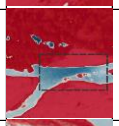
Type de poche froide	Image thermique	Torgersen et al. 2012	Dugdale et al. 2015	Sullivan et al. 2021	Marteau et al. 2022	Caudron et al. 2024	Origine hydrologique				Description
							Eau de surface	Hyporhéique	Phréatique	Karstique	
Panache d'affluent		**X**	X	X	X	X	**X**		**X**	**X**	Panache d'eau froide créé par l'arrivée d'un affluent
Chenal issu de résurgence		**X**	X	X	X	X			**X**	**X**	Petit ruisseau d'eau froide permanent de faible énergie provenant d'une résurgence phréatique ou karstique dans le lit majeur
Chenal alluvial (latéral)		**X**	X	X	X	X		**X**	**X**		Chenal latéral secondaire d'eau froide pouvant être intermittent ou permanent alimenté par des apports hyporhéiques ou phréatiques
Alcôve		**X**	X	X	X	X		**X**	**X**		Petite poche d'eau froide localisée en aval d'un dépôt alluvionaire (banc de graviers) souvent lié à la présence d'un chenal abandonné
Suintement latéral		**X**	X	X	X	X			**X**		Petite poche d'eau froide de forme allongée située en berge où le chenal principal vient intercepter une résurgence phréatique
Résurgence hyporhéique de banc			**X**	X	X	X		**X**			Résurgence hyporhéique située en aval d'un dépôt alluvionnaire (banc de graviers/galet)
Effluent de versant			**X**	X		X			**X**	**X**	Petit chenal d'eau froide situé dans la pente du versant qui ruisselle jusqu'à la rivière
Résurgence hyporhéique de radier					**X**	X		**X**			Résurgence hyporhéique située en aval d'un faciès de type radier
Fosse profonde					**X**	X			**X**		Poche d'eau froide localisée au niveau d'un faciès de type profond
Chenal ou mare déconnecté					**X**	X			**X**	**X**	Poche d'eau froide située dans le lit majeur de la rivière mais déconnectée du chenal principal alimentée par une résurgence phréatique ou karstique Ne constitue pas un refuge thermique potentiel
Résurgence karstique dans le lit						**X**				**X**	Arrivée d'une résurgence karstique d'eau froide permanente et de volume important qui influence le profil thermique longitudinal de la rivière
Rejet d'eau anthropique						**X**			**X**	**X**	Panache d'eau froide provoqué par un rejet d'eau d'origine anthropique (trop plein de captage)

Tableau 2 : Typologie des poches froides décrits dans la littérature et de leur origine hydrologique. Les croix noires précisent la 1ère référence bibliographique qui a décrit le type de refuge thermique.

4.5.3 CARTOGRAPHIE DES MOSAÏQUES THERMIQUES AU SEIN DES REFUGES THERMIQUES

Ci-dessous, quelques exemples de cartographie des mosaïques thermiques qui permettent d'illustrer les changements d'habitats thermiques engendrés par diverses origines d'eau froide.

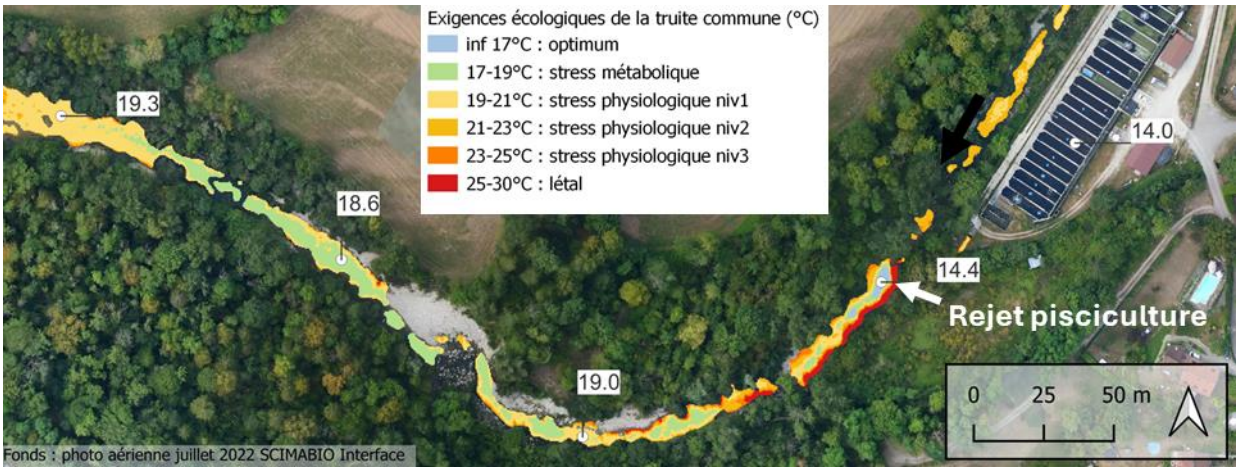


Figure 28 : Exemple d'une modification de l'habitat thermique engendrée par le rejet d'eau froide provenant d'un pompage dans la nappe utilisé pour alimenter la pisciculture de St-Christophe sur le Guiers Vif.

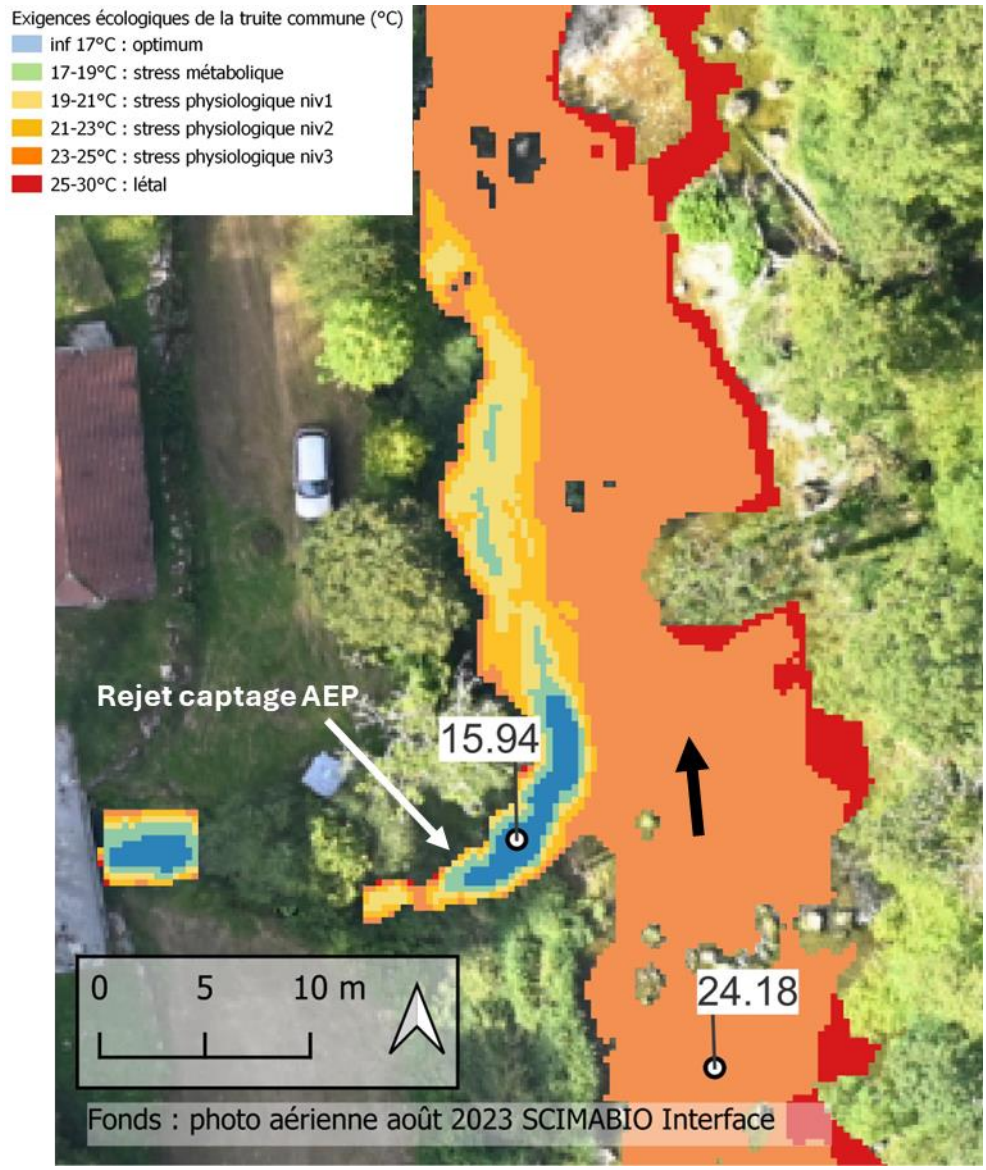


Figure 29 : Exemple d'un panache d'eau froide modifiant l'habitat thermique au niveau d'un rejet de captage d'AEP sur le Dessoubre (Doubs).

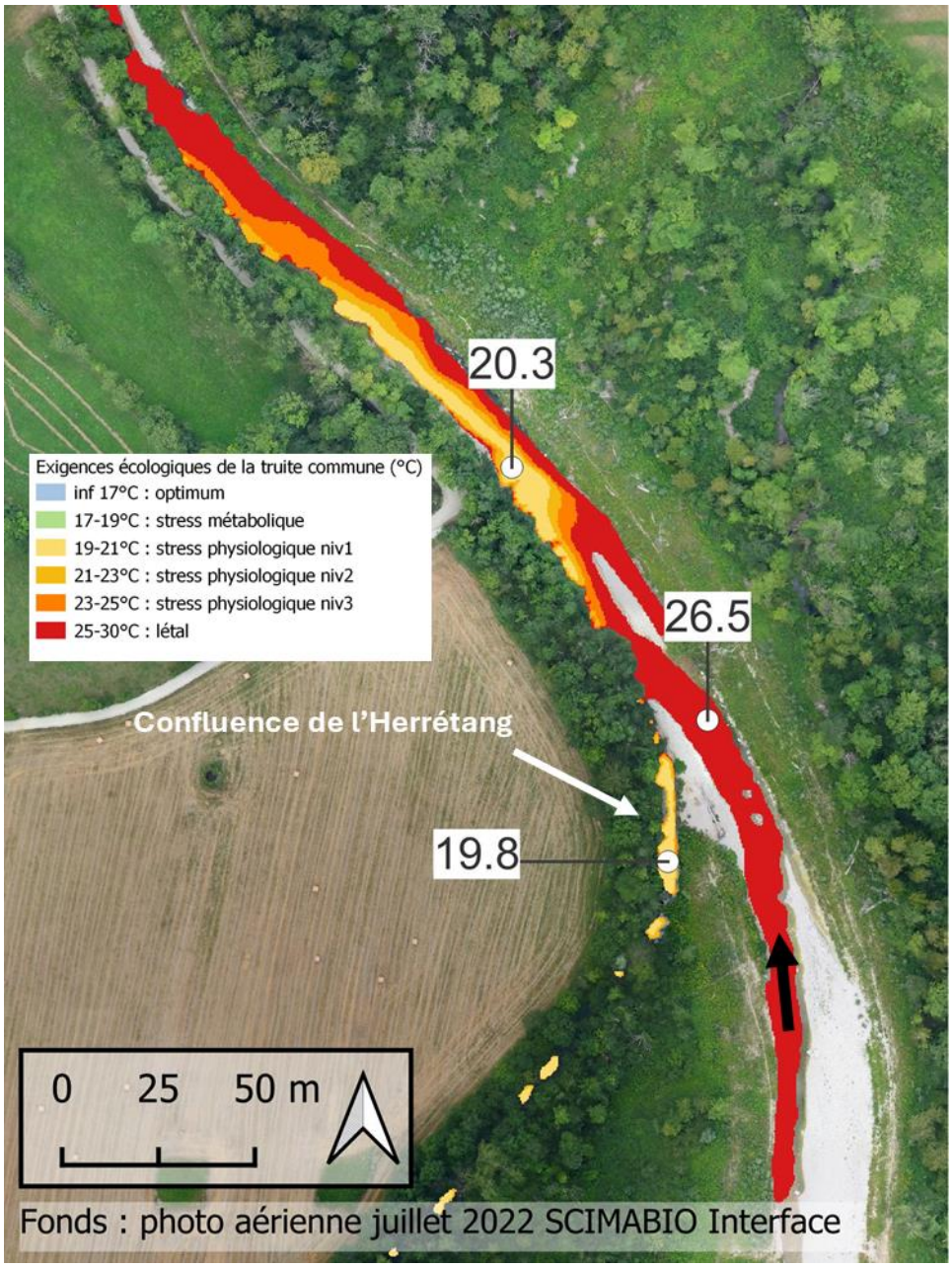


Figure 30 : Exemple d'un panache d'eau plus froide que la rivière au niveau de la confluence de l'Herrétang sur le Guiers Mort.

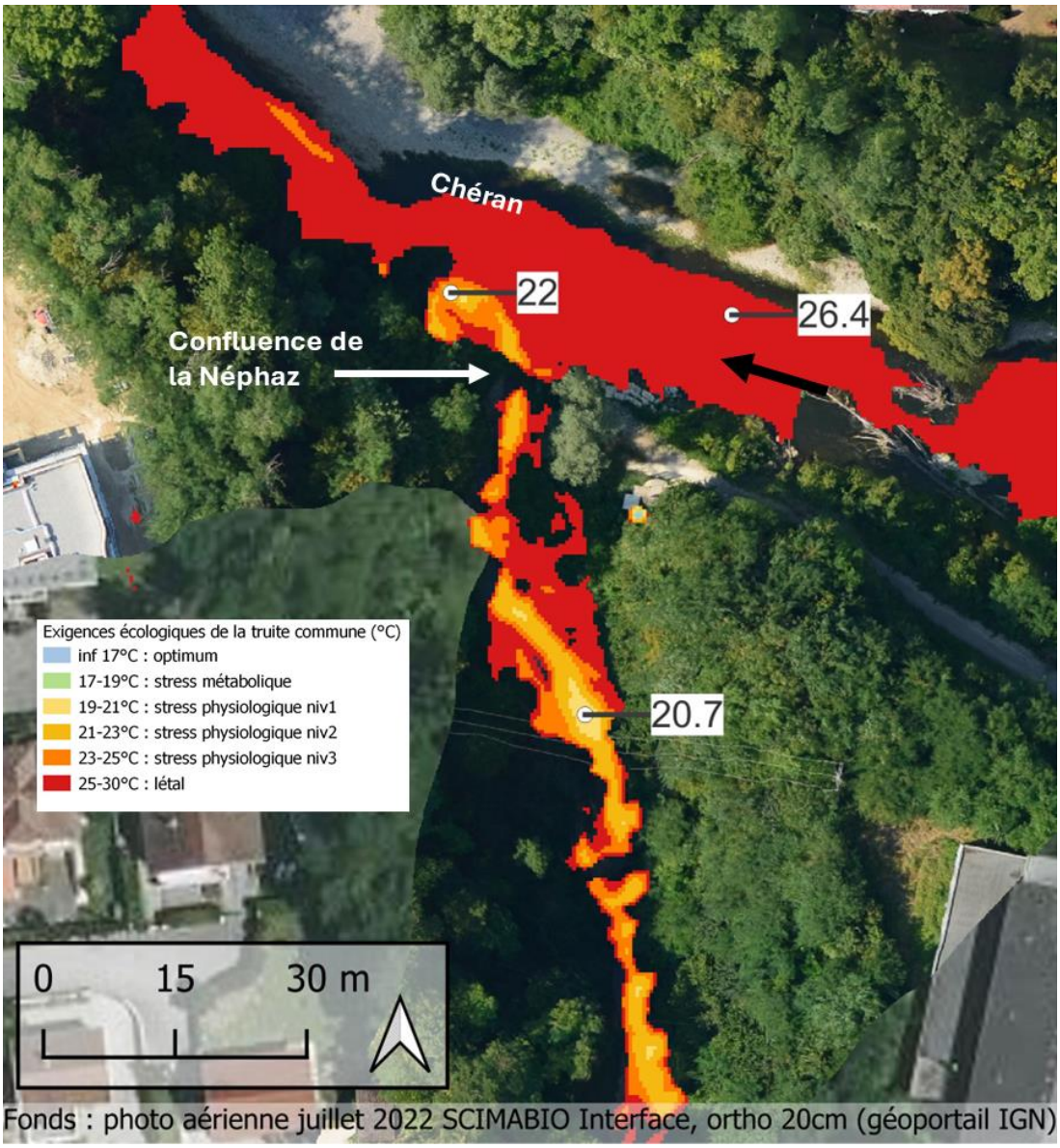


Figure 31 : Exemple de la Néphaz et de sa confluence sur le Chéran qui offre des habitats thermiques plus favorables pouvant servir de refuge thermique.

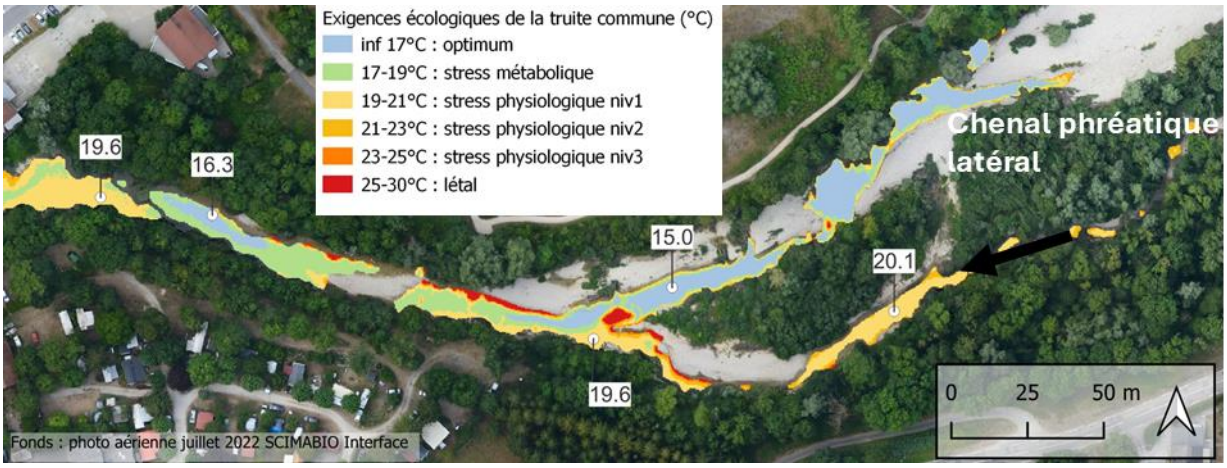


Figure 32 : Exemple d'une modification des habitats thermiques sur le Guiers Vif provoquée par une résurgence phréatique au niveau d'un chenal latéral.

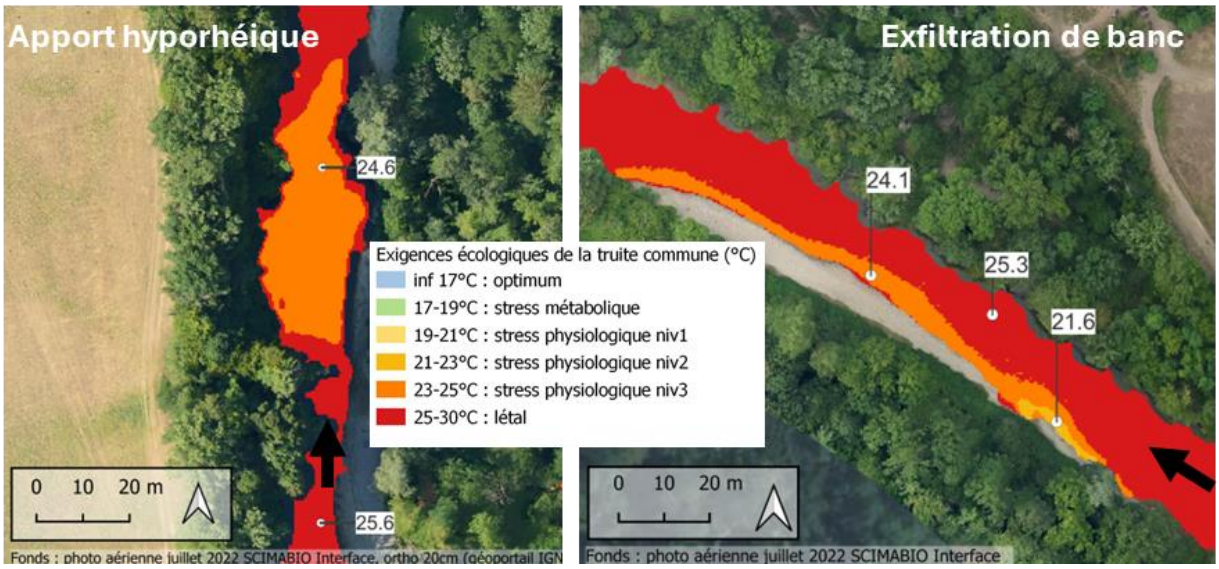


Figure 33 : Exemple d'apports hyporhéiques locaux qui modifient les habitats thermiques ; A gauche : le Chéran. A droite : le Guiers.

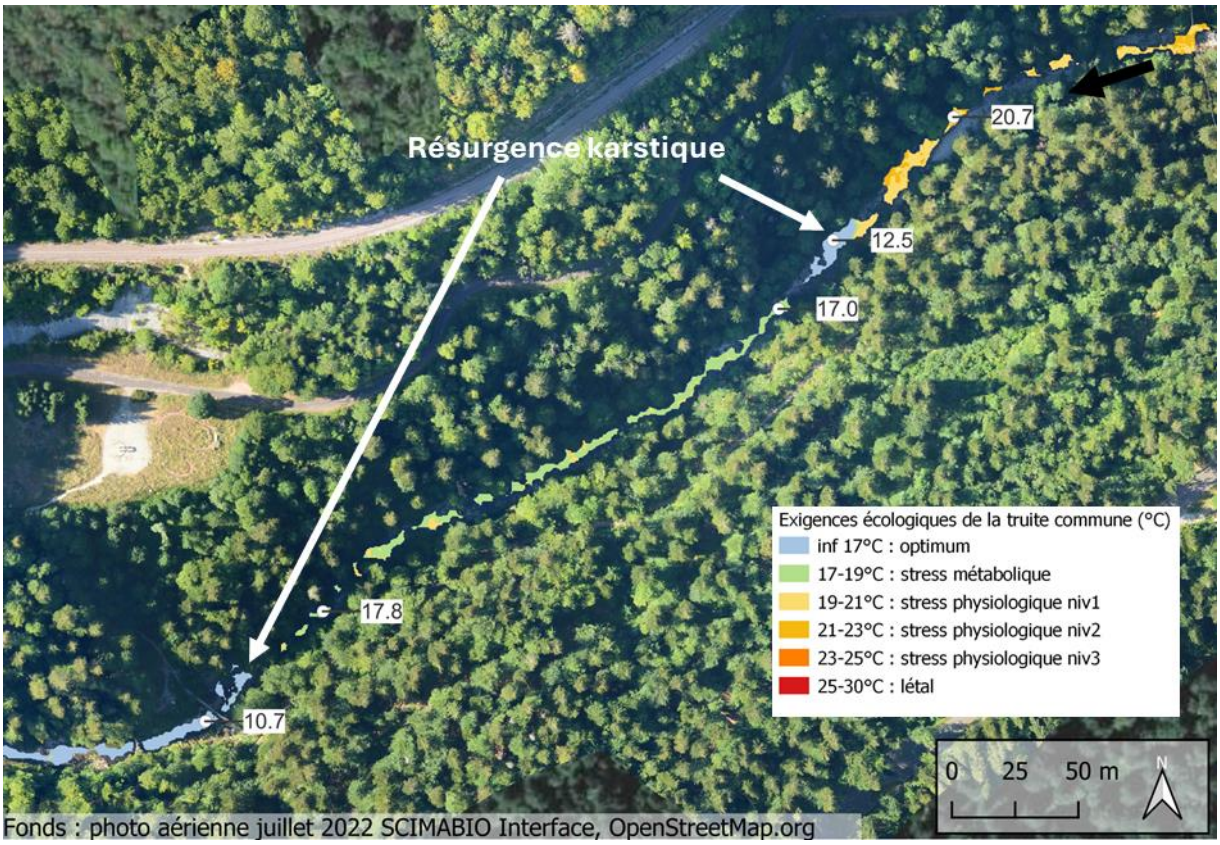


Figure 34 : Exemple de la modification des habitats thermiques provoquée par la résurgence karstique du Trou Bleu sur la Bienne.

5. ADAPTATION AUX EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE : ACTIONS DE CONSERVATION ET DE RESTAURATION DES HABITATS THERMIQUES FAVORABLES

La majorité des anomalies thermiques chaudes identifiées sur les rivières au cours des campagnes IRT-a est le résultat d'impacts locaux et anthropiques qui ne sont pas imputables au réchauffement climatique. Parmi les causes les plus fréquentes, on peut noter :

- Les aménagements passés des cours d'eau (extraction de graviers, rectification du lit, endiguement, …) qui ont abaissé le niveau des nappes et donc réduit les échanges nappe-rivière ;
- Les captages des sources et les prélèvements d'eau dans les nappes alluviales (AEP, agriculture, industrie) qui réduisent également le niveau des nappes, limitant ainsi les apports d'eau froide et les échanges nappe-rivière ;
- L'artificialisation du lit et des berges en zone urbaine qui déstructure les berges et les imperméabilise ;
- Les retenues hydrauliques provoquées par les barrages, avec pour conséquence de supprimer la perméabilité de et vers la nappe (la structure étant généralement construite sur la roche mère), de noyer et donc réduire les échanges dans la zone d'influence, tout en augmentant la surface exposée au soleil (remous thermique) ;
- L'absence de ripisylve qui facilite l'échauffement par rayonnement solaire direct ;
- La création de petits plans d'eau en dérivation ou directement dans les lits qui chauffent les petites rivières et ruisseaux qui eux-mêmes constituent ensuite une pollution thermique lorsqu'ils y confluent ;
- La modification des débits par dérivation de l'eau (tronçon court-circuité de prise d'eau hydroélectrique) puisqu'une lame d'eau moins importante est plus sensible à l'échauffement.

Par contre, les effets du changement climatique vont se ressentir davantage sur les secteurs qui sont déjà dégradés par des impacts locaux. Cette situation indique que les actions locales de prévention et de restauration ne sont pas vaines et représentent même un levier important pour atténuer les effets du changement climatique.

Ce chapitre présente, à partir de la bibliographie existante et des retours d'expérience connus, un état des connaissances actuelles sur les différentes solutions permettant de conserver et restaurer les refuges thermiques et plus globalement les habitats thermiques favorables aux salmonidés.

5.1 COMMENT CONSERVER LES HABITATS THERMIQUES ET REFUGES THERMIQUES IDENTIFIÉS

Diverses mesures conservatoires réglementaires ou volontaires peuvent être mises en œuvre pour agir à deux niveaux :

- D'une part sur l'origine hydrologique des apports d'eau froide (résurgences karstiques, nappes alluviales ou phréatiques, échanges hyporhéiques) afin de préserver la source d'eau qui est à l'origine des apports d'eau froides et des refuges thermiques identifiés.
- D'autre part sur la structure hydromorphologique (chenal latéral, alcôve, panache d'affluent, dépôt alluvionnaire, …) pour protéger la forme qui crée l'apport d'eau froide et permet le refuge thermique.

5.1.1 PROTÉGER LES APPORTS D'EAU FROIDE EN APPLICATION DE L'ARTICLE L.432-3 DU CODE DE L'ENVIRONNEMENT

La cartographie par IRT-a permet de délimiter précisément les tronçons de rivières sur lesquels ont été identifiés des apports d'eau froide majeurs qui influencent le profil thermique de la rivière ou constituent de potentiels refuges thermiques ou climatiques.

Ces tronçons représentent donc un habitat essentiel pour la vie salmonicole et doivent faire l'objet, à ce titre, d'une protection réglementaire en application de l'article L.432-3 du code de l'environnement en tant que structures hydromorphologiques particulières, afin d'y éviter tout aménagement ou destruction.

5.1.2 PRENDRE EN COMPTE LES HABITATS THERMIQUES DANS LA DÉFINITION DES DÉBITS BIOLOGIQUES D'ÉTIAGE

Malgré toutes les connaissances scientifiques produites ces dernières décennies sur l'importance des habitats thermiques estivaux pour la conservation des salmonidés et l'adaptation des populations aux effets du changement climatique, les notions d'habitats thermiques et de refuges thermiques/climatiques sont encore totalement absentes des textes réglementaires et des documents de planification actuels (LEMA, SAGE, SDAGE, PLUI, PGRE, PTGE…).

Les guides méthodologiques qui précisent les démarches et méthodes à utiliser dans les études sur les volumes prélevables ou dans les analyses HMUC (Hydrologie – Milieux – Usages – Climat) pour définir les Débit d'Objectif d'Etiage (DOE) et les Débits minimums biologiques (DMB) (AE RMC 2008, 2013, 2019, Anonyme 2022, Lamouroux et al. 2018) ne prennent pas en compte le paramètre température qui pourtant, en période d'étiage, va se traduire par une forte limitation des habitats effectivement favorables.

Comme exprimé par Olden et Naiman (2010), le problème n'est pas que les écologues ne reconnaissent pas le rôle primordial que joue la température pour les écosystèmes aquatiques, mais plutôt qu'ils ne l'ont pas intégré dans la définition des débits minimum biologiques. Ces auteurs appelaient déjà en 2010 à la mise en place de nouvelles stratégies pour prendre en compte la dynamique thermique dans la détermination des débits biologiques.

Il est donc aujourd'hui essentiel de prendre en compte la disponibilité des habitats thermiques favorables et des refuges thermiques dans les études dites de volumes prélevables pour définir les débits biologiques d'étiage à l'échelle des rivières et dans les études de définition des débits minimums biologiques sur les tronçons soumis à des prélèvements de débits. Des approches de modélisation hydrodynamique et thermique couplant l'utilisation de l'IRT-a avec des données thermiques temporelles, l'hydrologie et d'autres variables environnementales (températures d'air, précipitations) peuvent être utilisées pour répondre à ce besoin (Vatland et al. 2015, Dugdale et al. 2017, Dzara et al. 2019, Lee et al. 2020, Ouellet et al. 2021, White et al. 2023, Pander et al. 2024).

En termes de méthodologie, nous pouvons considérer deux situations, selon qu'il s'agisse de déterminer un Débit Minimum Biologique (DMB), appelé aussi débit réservé, sur un tronçon court-circuité, ou un Débit d'Objectif d'Etiage (DOE) à l'échelle d'une rivière entière, pour lesquelles les protocoles et les échelles spatiales de travail seront différentes :

- **Dans le cadre de la proposition d'un débit réservé (DMB)**, nous préconisons de réaliser des acquisitions IRT-a à différentes valeurs de débit test pour renseigner sur la variabilité spatiale des habitats thermiques en fonction de l'hydrologie et de collecter également des données thermiques stationnelles (pas de temps horaire minimum) par le biais de sondes enregistreuses qui vont renseigner sur la variabilité temporelle.

La figure 35 ci-dessous présente le principe méthodologique d'une modélisation thermo-hydraulique des habitats thermiques pour les salmonidés à partir de l'acquisition de 4 catégories de variables (habitat thermique spatial, débit, climatique, température d'eau temporelle) sur 3 modalités de débit réservé.

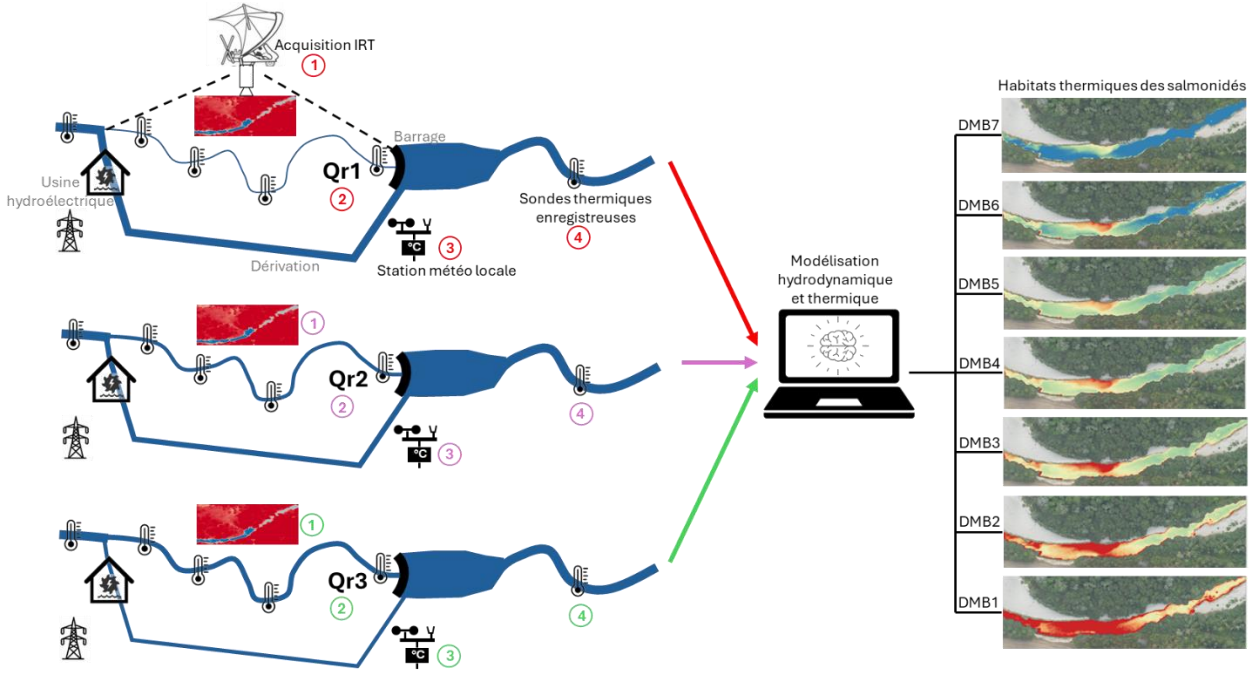


Figure 35 : Présentation du principe méthodologique de définition d'un Débit Minimum Biologique associant relevés IRT-a à différents débits et d'autres données thermiques et hydro-climatiques dans une démarche de modélisation thermo-hydraulique.

- **Dans le cas d'une proposition de débit d'objectif d'étiage (DOE) à l'échelle d'une rivière**, nous préconisons des acquisitions IRT-a à deux échelles spatiales différentes :
  - Sur la totalité du linéaire concerné, au cours de la période la plus chaude de l'été et dans des conditions d'étiage sévère, deux campagnes réalisées le même jour en ULM, une lorsque les températures d'eau sont les plus fraiches (créneau 8h-10h) et une lorsque les températures d'eau sont les plus chaudes (créneau 17h-19h).
  - Sur deux ou trois tronçons d'environ 1 km, des campagnes répétées toutes les 2 heures réalisées en drone entre 8h à 19h répétées plusieurs fois pendant l'été dans des conditions climatiques et hydrologiques différentes.

La figure 36 ci-dessous, présente le principe méthodologique d'une modélisation thermo-hydraulique des habitats thermiques pour les salmonidés à partir de l'acquisition de 5 catégories de variables (habitat thermique spatial sur l'ensemble de la rivière, habitat thermique spatial sur des tronçons dans différentes conditions hydro-climatiques, débit, température d'eau temporelle).

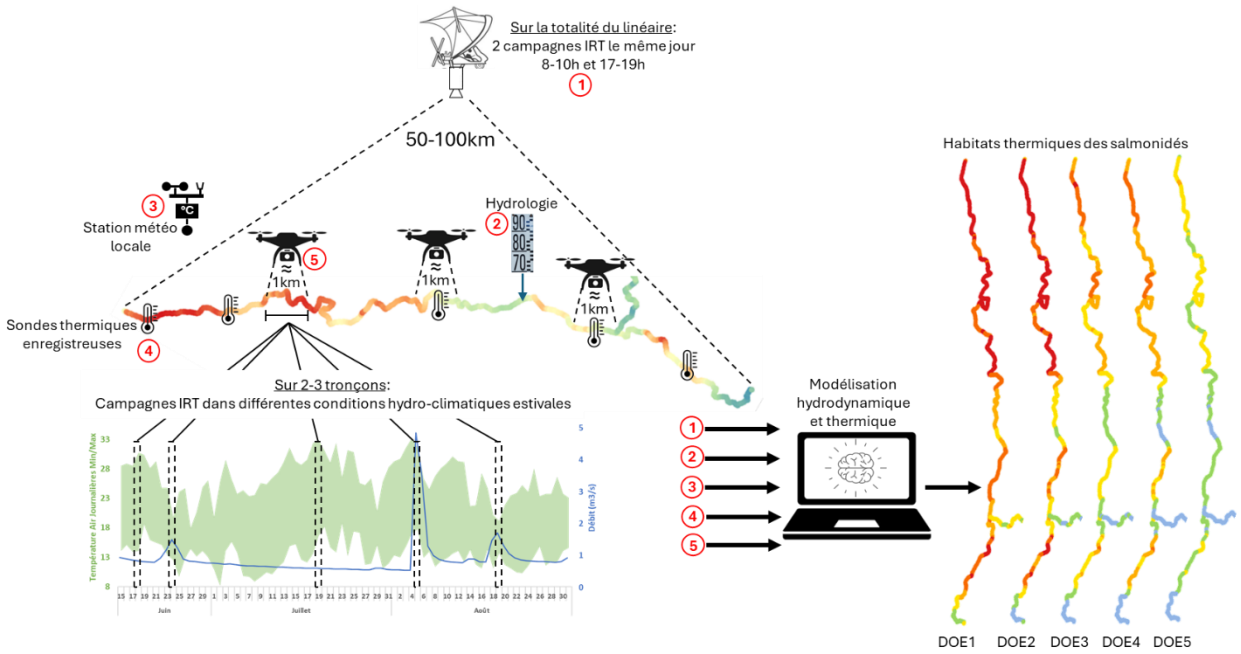


Figure 36 : Présentation du principe méthodologique de définition d'un Débit d'Objectif d'Etiage associant relevés IRT-a à différentes échelle spatiales et d'autres données thermiques et hydro-climatiques dans une démarche de modélisation thermo-hydraulique.

La réalisation de plusieurs campagnes à des échelles spatiales différentes a pour but de collecter des données de répartition des habitats thermiques dans des conditions hydro-climatiques variées afin de pouvoir ensuite modéliser la variation des habitats thermiques en fonction des débits et des variables climatiques.

Les différentes campagnes proposées apportent des données complémentaires :

D'une part, les deux campagnes IRT-a réalisées le même jour sur la totalité du linéaire permettent de décrire la variabilité journalière des habitats thermiques sur l'ensemble de la rivière en caractérisant leurs distributions dans deux conditions de températures contrastées au sein de la même journée à savoir aux heures où les températures d'eau sont les plus chaudes et les plus froides. Ces données permettent de connaitre la distribution des habitats thermiques à différentes valeurs de températures d'air qui se reproduisent régulièrement au cours de la période estivales.

D'autre part, les campagnes IRT-a réalisées à différentes périodes de l'année sur quelques tronçons, d'environ 1km, représentatifs de la rivière, permettent de décrire comment la distribution spatiale des habitats thermiques et des refuges thermiques varie en fonction des débits et des conditions climatiques. La démarche proposée ici permet de prendre en compte l'ensemble des conditions hydro-climatiques qui peuvent être rencontrées au cours de la période estivale.

5.1.3 Protéger les ressources en eau encore non-exploitées

Une des principales mesures conservatoires à mettre en œuvre consiste à décider d'un moratoire sur le prélèvement de certaines ressources en eau souterraines ou de surface qui ne sont pas encore exploitées. Cette mesure a pour but d'éviter tous nouveaux projets d'exploitations (AEP, agricoles ou industrielles) afin de maintenir la restitution d'eau froide dans le milieu naturel qui permet la création d'habitats thermiques favorables et de refuges thermiques essentiels.

La figure 37 ci-dessous illustre l'exemple d'un apport d'eau froide important identifié sur le Chéran dont l'origine est une résurgence de la nappe phréatique. Le maintien de ce refuge thermique est donc

directement dépendant du niveau de la nappe. Dans un tel cas, il est essentiel d'être vigilent sur l'exploitation de cette ressource pour ne pas mettre en péril le refuge thermique qui en dépend.

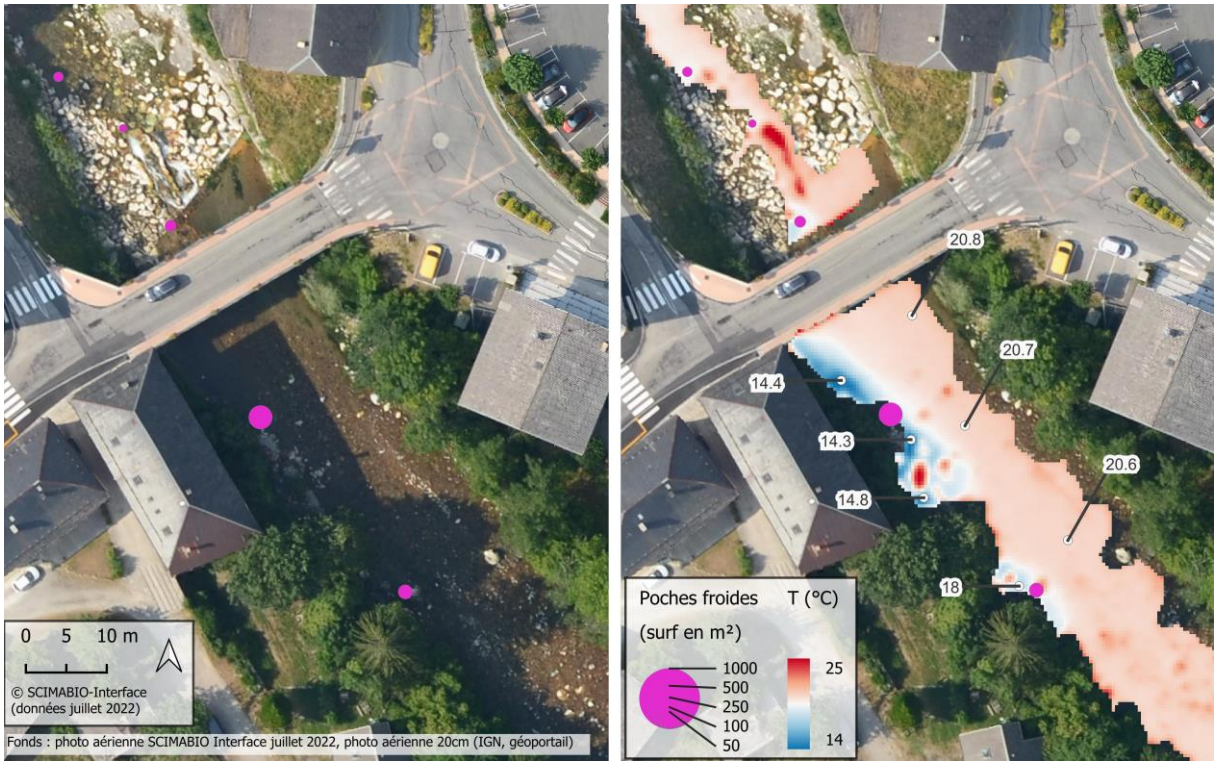


Figure 37 : Exemple d'un apport d'eau froide d'origine phréatique identifié sur le Chéran au Pont de Lescheraines qui est directement dépendant du niveau de la nappe.

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

Les résultats des campagnes IRT-a peuvent mettre en évidence l'existence d'apports d'eau froide majeurs pour les salmonidés dont les ressources connues (origines hydrologiques) sont cependant exploitées (captages AEP de sources ou d'aquifères karstiques par exemple).

Dans ce cas, il est préconisé de trouver des solutions d'approvisionnement alternatives moins impactantes pour le milieu qui permettraient de restituer le maximum de débit d'eau froide à la rivière en période estivale.



Figure 38 : Exemple d'un refroidissement important provoqué par une résurgence karstique (résurgence de l'Arce sur la Bienne) actuellement exploitée pour l'AEP. Cet apport d'eau froide a été identifié comme essentiel pour la vie salmonicole sur la Bienne, un arrêt de son exploitation en période estivale permettrait d'augmenter encore le volume restitué au milieu naturel.

5.1.5 Réduire l'exploitation et la consommation d'eau à l'échelle du bassin versant

Toutes les actions visant à réduire l'exploitation des ressources en eau et la consommation d'eau à l'échelle d'un bassin peuvent être bénéfiques au milieu.

A ce titre, les études sur les volumes prélevables et les analyses HMUC, qui ont pour but d'assurer une gestion équilibrée des ressources en eaux sur un territoire, sont primordiales. Elles permettent de fixer par usage des objectifs de réduction des prélèvements d'eau afin de garantir le bon état

écologique de la masse d'eau concernée. Ces démarches rentrent donc pleinement dans le domaine de la conservation et la restauration des habitats aquatiques favorables et des refuges thermiques.

Cependant, comme expliqué auparavant, il est essentiel de faire évoluer les méthodes actuelles de ces études pour qu'elles intègrent la température de l'eau des espèces concernées comme paramètres essentiels afin d'être capable de proposer des actions qui auront *in fine* un réel effet sur la biodiversité aquatique (voir un exemple d'outil d'aide à décision, Sedighkia & Datta 2024).

5.2 Comment restaurer, optimiser et créer des habitats thermiques favorables et des refuges thermiques

Bien que les actions de conservation soient essentielles pour réussir à maintenir certains habitats thermiques ou refuges thermiques identifiés, elles ne seront pas suffisantes pour limiter les effets du changement climatique et ainsi permettre aux salmonidés de s'adapter aux évolutions thermiques attendues. En complément, des actions de restauration ambitieuses sont nécessaires.

5.2.1 Réduire les échauffements liés aux barrages et retenues

La cartographie IRT-a met en évidence des échauffements d'eau importants au niveau des remous hydrauliques provoqués par les barrages qui modifient le faciès d'écoulement des rivières. Les effets peuvent être ponctuels ou s'étendre sur un linéaire plus important en fonction de la taille de l'ouvrage.

Trois catégories d'actions sont envisageables pour restaurer des conditions d'habitats thermiques plus favorables aux salmonidés en période estivale :

- Prévoir et planifier le rachat de certains barrages importants et impactant lorsque les opportunités se présentent (mise en vente, renouvèlement de concession) en vue de les démanteler.
- Etudier des actions de mise en transparence ou « débarrage » des ouvrages pendant la période estivale critique pour éviter les effets « retenues hydrauliques » qui accélèrent le réchauffement de l'eau de la rivière.
- Démanteler les petits ouvrages (anciens moulins, petits seuils successifs) qui provoquent systématiquement un étalement du lit avec un impact thermique, et qui conduisent à produire des effets cumulatifs non négligeables sur les rivières.

5.2.2 Restaurer les échanges nappe/rivière et les apports hyporhéiques

Les apports d'eau issus de l'aquifère alluvial constituent la principale origine des échanges nappe/rivière. Ils jouent un rôle majeur 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 sont perdus ou réduits par les aménagements anthropiques réalisés sur les rivières (chenalisation, recalibrage du profil, rectification, endiguement, protections de berge).

Aussi, les travaux de restauration hydromorphologique qui cherchent à supprimer les altérations physiques et à accentuer les échanges nappe/rivière font partis des solutions les plus efficaces. Cependant, ces travaux, souvent concentrés sur la restauration des connectivités longitudinales et latérales, ne réussissent pas à restaurer les processus qui sont à l'origine des échanges nappe/rivière. En effet, le fait de modifier l'apparence morphologique d'une rivière sur un linéaire relativement court ne suffit pas à restaurer la complexité des processus hydromorphologiques qui sont à l'origine des échanges nappe/rivière.

Il est essentiel d'intégrer, dans les projets, la restauration de la connectivité verticale qui va chercher à restaurer les processus plus que l'apparence pour retrouver des interactions entre la nappe alluviale ou la zone hyporhéique et la rivière (Boulton 2007, Kasahara et al. 2009, Kurth et al. 2015).

Pour réactiver des échanges nappe/rivière, les projets de restauration doivent travailler à l'échelle de la zone transversale dans laquelle les processus hydromorphologiques ont lieu (Tague et al. 2008, Ciotti et al. 2021 ; figure 39). Les restaurations écologiques moins ambitieuses qui travaillent dans des espaces latéraux trop réduits ne permettront de retrouver une connectivité verticale fonctionnelle.

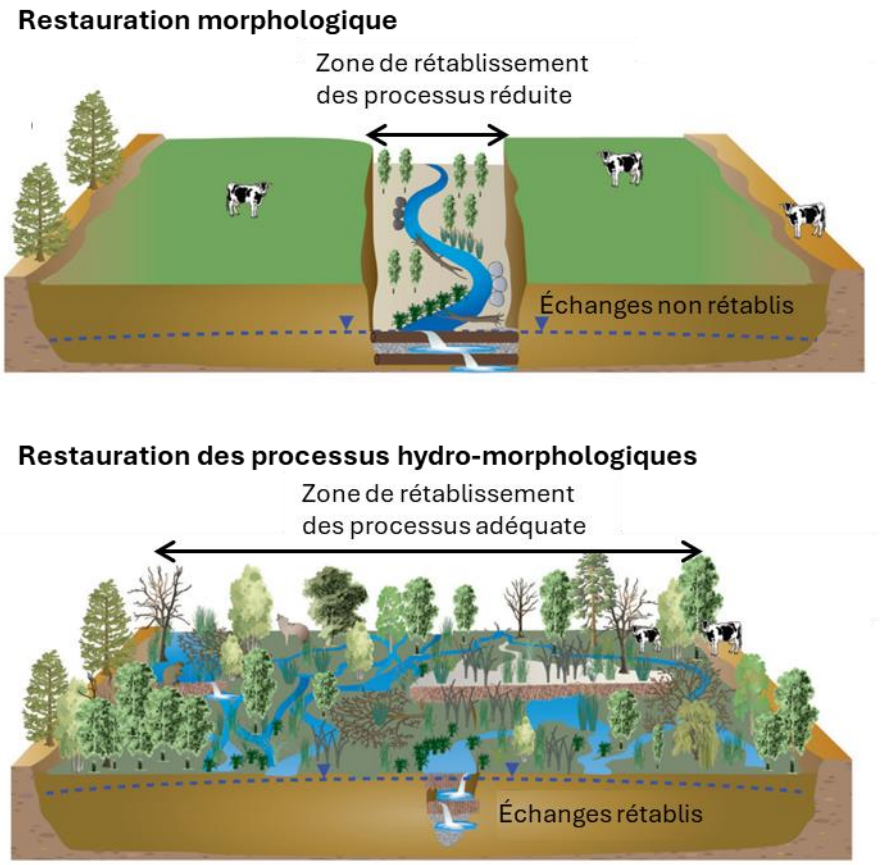


Figure 39 : Illustration schématique de la différence entre une restauration morphologique au sein d'une emprise insuffisante pour rétablir une connectivité verticale et d'une restauration des processus hydro-morphologique grâce à un travail sur l'ensemble de l'espace alluvial. (Modifié d'après Ciotti et al. 2021).

Dans le cas d'une emprise anthropique réduite à proximité de la rivière et au sein du lit majeur, les techniques de restauration dite « low-tech » doivent être préconisées (Wheaton et al. 2019). Elles vont permettre à l'écosystème rivière de regagner progressivement de l'espace transversalement en réoccupant le fond de vallée fonctionnel et ainsi recréer une connectivité verticale.

Dans le cas d'une emprise anthropique plus importante au sein du lit majeur, les techniques et méthodes de restauration plus classiques peuvent être mises en œuvre mais en veillant à intégrer la problématique de la connectivité verticale. Pour cela, il est nécessaire de collecter, en plus des données habituelles sur la topographie, des nouvelles données hydrogéologiques pour connaitre les niveaux et les températures de l'eau de la nappe alluviale et de la zone hyporhéique grâce à l'installation d'un réseau de piézomètres. Une note technique récente présente les méthodes permettant de prendre en compte les données sur la nappe dans les projets de restauration (Gurrieri 2023).

Les points de collecte de ces données doivent être répartis longitudinalement sur l'ensemble du linéaire concerné par le projet de restauration et transversalement sur la totalité de l'emprise du lit majeur historique.

Les données de températures au sein de la zone hyporhéique, couplées à celles obtenues par IRT-a qui renseignent sur la localisation des poches froides encore présentes, permettent d'évaluer le potentiel d'apports d'eau froide que pourrait constituer une reconnexion verticale. Les informations de niveaux d'eau de la nappe permettent, elles, de repérer les tronçons où la nappe est la plus affleurante sur lesquels une reconnexion avec le lit de la rivière sera plus aisée.

Ainsi, au moment de la définition des différentes options de restauration, il sera possible de privilégier le scénario qui permettra de reconnecter le nouveau tracé du chenal principal avec des zones hyporhéiques qui apporteront des eaux froides (voir Ubing & Bountry 2019 pour exemple).

5.2.3 Réduire l'artificialisation urbaine

Les rivières sont souvent soumises à des échauffements lors des traversées de zones urbaines qui présentent des lits et des berges fortement artificialisées (fond du lit et murs enrochés ou bétonnés, seuils de stabilisation, absence de ripisylve). Ce phénomène de pollution thermique est largement connu et décrit dans la littérature comme le syndrome des rivières urbaines (Somers et al. 2013).

Les cartographies IRT-a illustrent bien les causes : les linéaires urbains conjuguent divers effets avec des faciès lentiques et une lame d'eau étalée qui facilitent les échanges air/eau, un déficit d'ombrage faute de ripisylve qui augmente l'action du rayonnement solaire direct et des berges construites avec des matériaux à forte masse thermique qui entraine une forte radiation de chaleur et une forte inertie (figure 40).

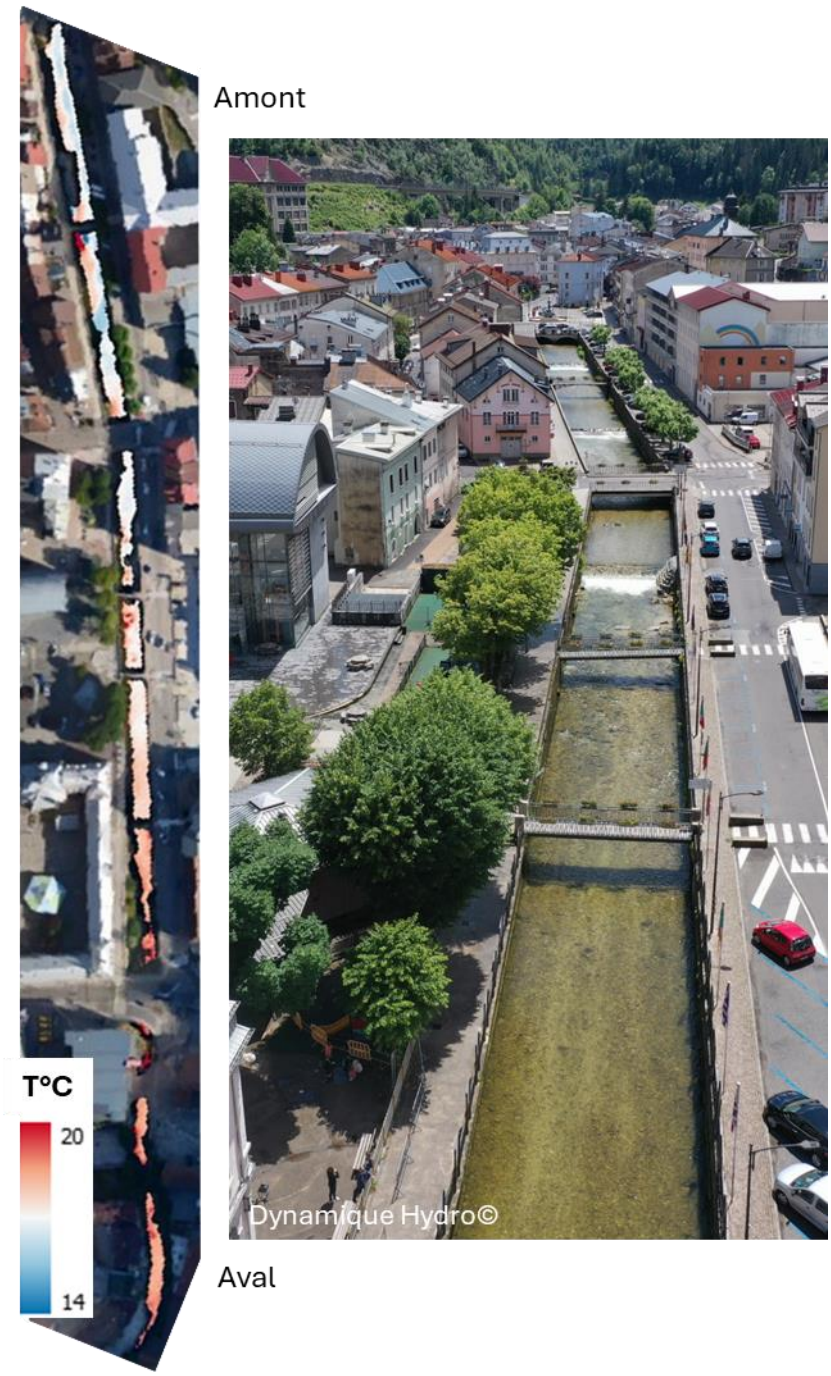


Figure 40 : exemple de pollution thermique urbaine observée par IRT-a sur la rivière Bienne (Jura) au niveau de la traversée de la ville de Morez. A gauche : mosaïque thermique par IRT-a montrant l'échauffement de l'eau (SCIMABIO Interface©), à droite : photo aérienne du même tronçon prise par drone (Dynamique Hydro©).

Seuls des projets de restauration ambitieux qui repensent complètement la place et le rôle de la rivière dans la ville peuvent permettre de réduire la pollution thermique urbaine. Les solutions doivent être pensées sur le long terme. Elles passent par divers procédés (Abdi et al. 2020), comme :

- la réduction de l'artificialisation des sols et la renaturation des sols (désimperméabilisation et enherbage) dans les zones urbaines et résidentielles périphériques qui vont permettre une meilleure l'infiltration des eaux de pluie et un retour progressif à la rivière par drainage naturel ;
- la suppression des revêtements imperméabilisant le lit (béton, enrochement) et la création de faciès pool/radier pour retrouver des échanges hyporhéiques ;

- la suppression de l'emprise urbaine sur un corridor autour de la rivière et la plantation d'une ripisylve qui va créer un ombrage efficace pour réduire le rayonnement solaire ;
- le maintien ou la création de zones alluviales boisées en amont dans les zones dites périphériques pour limiter les échauffements avant la traversée urbaine et permettre de réduire la température ambiante de l'air (réduction de l'effet ilot de chaleur).

La restauration des rivières en zone urbaine est très complexe et croise plusieurs enjeux importants (économiques, risques d'inondation, écologiques, socio-culturels) avec des conflits d'intérêt qui rendent les projets longs et difficiles à mettre en œuvre (Smith et al. 2014). Des outils d'élaboration de scénario de restauration et d'aide à la décision peuvent être utilisés pour mieux apprécier les effets de la pollution thermique urbaine et les différentes solutions pour les réduire (Veról et al. 2020). Pour réussir, les projets de restauration urbaine ne doivent pas opposer les objectifs de restauration écologique et de lutte contre les inondations mais au contraire les associer dans une approche commune.

5.2.4 Optimiser l'attrait des refuges thermiques existants

Certains refuges thermiques créés par un chenal latéral, un suintement ou un affluent se matérialisent par la présence d'un panache d'eau plus froide que la rivière.

Dans certaines configurations, la surface d'un tel panache peut être augmentée par le biais de déflecteurs qui vont retarder le mélange entre le panache et la rivière et ainsi permettre de prolonger le flux d'eau plus froide (Bilby 1984, Torgersen et al. 2012, Kurylyk et al. 2015). Bien qu'à notre connaissance, il n'existe pas encore d'exemples en France de mise en place de ce type de solution, leur mise en œuvre parait tout à fait envisageable et relativement simple pour des gains potentiellement importants.

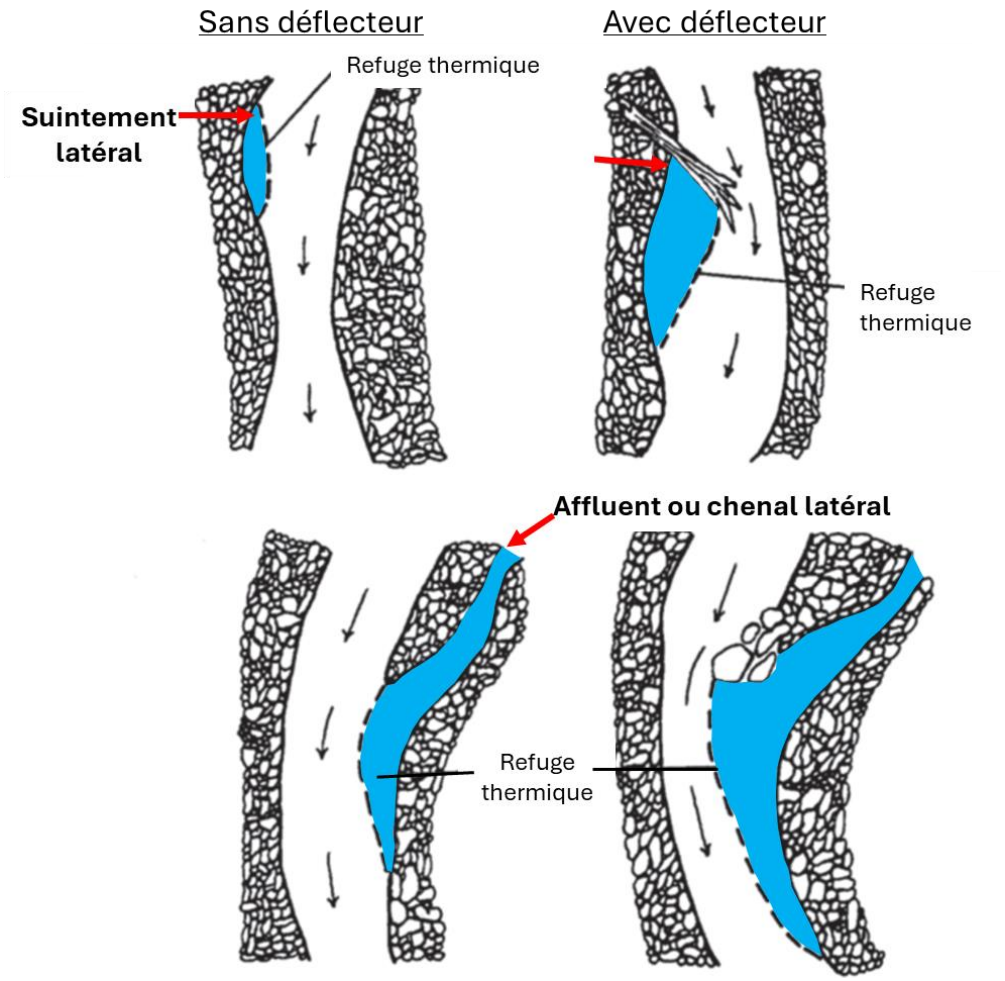


Figure 41 : principe de mise en place de déflecteurs pour augmenter la surface de refuges thermiques créés par un suintement latéral, un affluent ou un chenal latéral (modifié d'après Bilby 1984 et Torgersen et al. 2012).

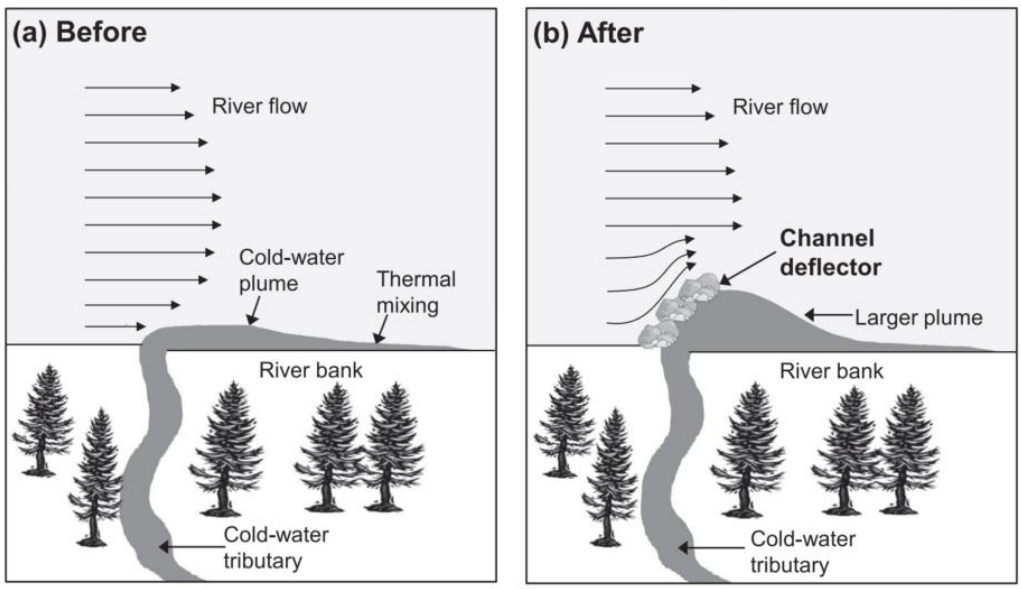


Figure 42 : Schéma de principe de l'optimisation d'un refuge thermique par la pose de déflecteurs à la confluence d'un affluent pour augmenter la taille de la poche froide (source Kurylyk et al. 2015).

L'utilisation de modèles thermo-hydrauliques qui vont simuler la forme du panache en fonction du débit et de l'aménagement projeté (localisation et forme du déflecteur) peuvent s'avérer très utiles dans la phase d'étude pré-travaux pour dimensionner le refuge thermique souhaité (Saadi et al. 2022).

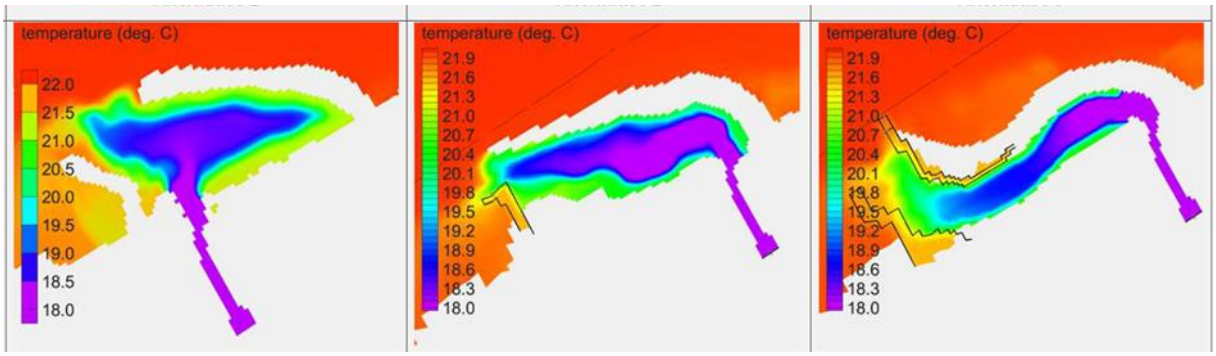


Figure 43 : Exemple de simulation du panache thermique d'un affluent (Horsetail Creek USA) pour un débit donné avec 3 scénarios d'aménagement (source : Lower Columbia Estuary Partnership, 2021).

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

Dans certaines situations, des zones identifiées comme refuges thermiques potentiels ou pouvant constituer de futurs refuges climatiques sont difficilement accessibles à la faune piscicole en raison de la présence d'obstacles à la migration.

Les projets de rétablissement de la continuité écologique pour les salmonidés (démantèlement d'ouvrages et équipement des obstacles par des ouvrages de franchissement) ne doivent plus uniquement se focaliser sur la migration de reproduction mais doivent désormais prendre en compte les besoins de mobilité liés aux comportements de thermorégulation qui contraignent les individus à se déplacer en période de forte chaleur et dans des conditions d'étiages sévères.

5.2.6 Reboiser les berges pour créer de l'ombrage

De nombreuses études montrent l'importance de l'ombrage créé par la végétation rivulaire pour limiter l'échauffement de l'eau voire de diminuer significativement la température moyenne des rivières (Seavy et al. 2009, Withrow-Robinson et al. 2011, Kristensen et al. 2015, Kalny et al. 2017, Dugdale et al. 2018, Marteau et al. 2020 et 2022b, Rusnák et al. 2022).

Aussi, les actions de reboisement destinées à créer ou densifier la végétation aux abords des cours d'eau sont fortement préconisées pour limiter les effets du changement climatique.

Le couplage de différentes technologies comme l'IRT-a, la photogrammétrie et le LiDAR avec des outils de modélisation spatiale permet d'analyser les effets attendus de la végétation rivulaire en termes d'ombrage sur l'évolution de la température de l'eau (Wawrzyniak et al. 2017, Loicq et al. 2018, Dugdale et al. 2019, Jackson et al. 2021, Bolick et al 2021, Fuller et al. 2022, Dugdale et al. 2024). Ces outils peuvent être utilisés pour tester des scénarios de restauration de la ripisylve et prioriser les reboisements sur les zones les plus pertinentes.

Pour illustrer le type de livrables envisageables par ces méthodes, trois exemples de cartographie des effets d'ombrage de la végétation rivulaire sont présentés dans les figures suivantes (Keeping Rivers Cool 2016, Nielson 2022, Hyatt 2023). Ces résultats très opérationnels permettent d'identifier les tronçons de rivière qui sont les plus soumis au risque d'élévation de la température à cause d'une végétation rivulaire absente ou insuffisante. Ils permettent de définir des plans de reboisement en priorisant les actions sur les tronçons où les gains attendus sont les plus forts.

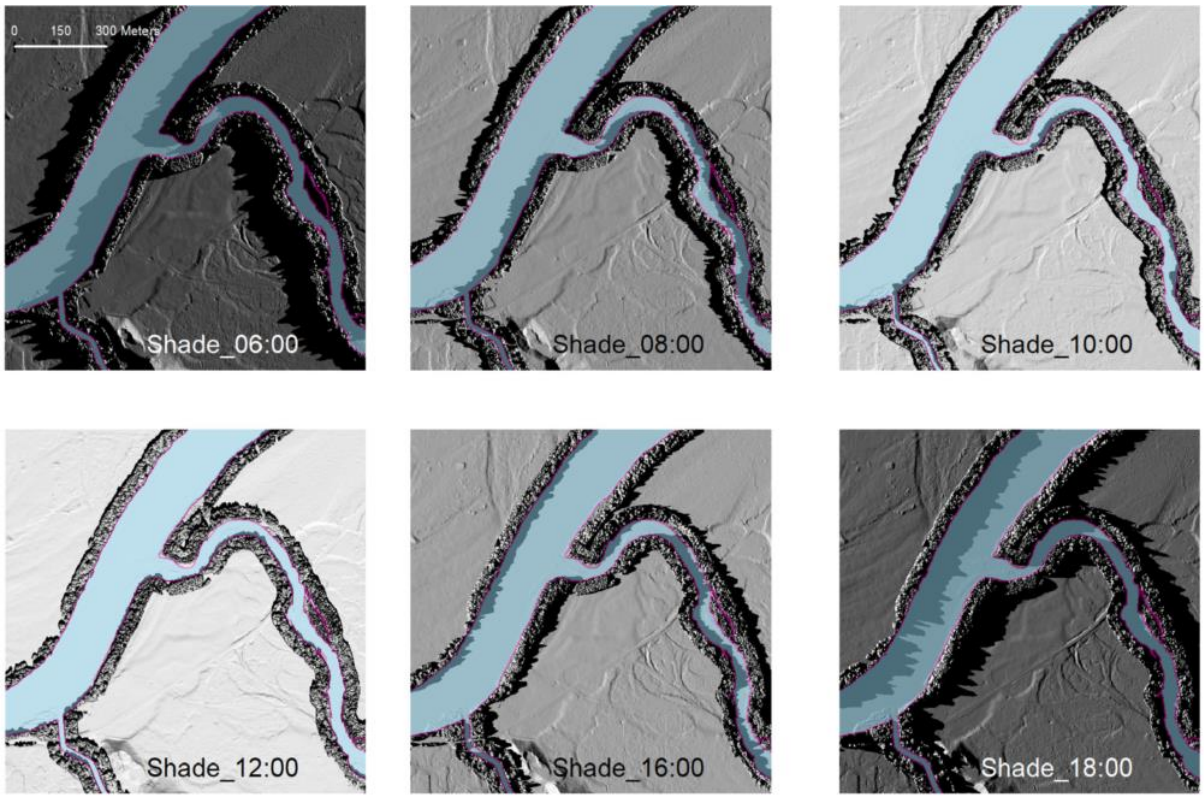


Figure 44 : Exemple d'images de la rivière Skagit (USA) et d'un affluent montrant l'évolution de l'ombrage provoqué par la végétation rivulaire à différentes heures de la journée (ici le 21 juin) (source Hyatt 2023).

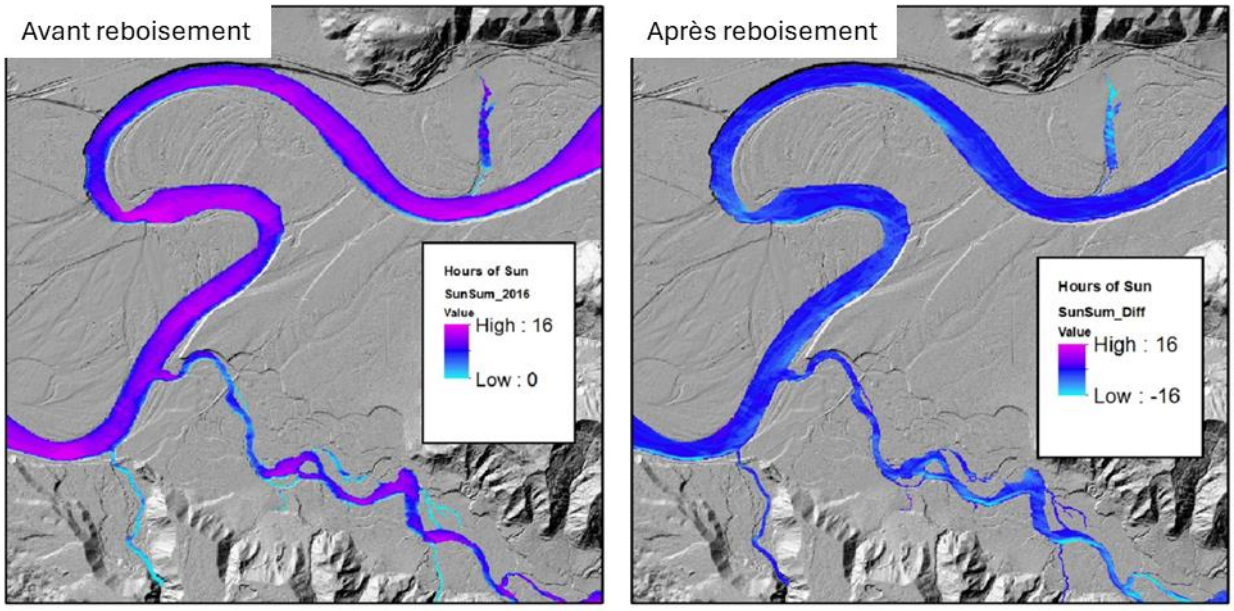


Figure 45 : Exemple de cartes présentant le nombre d'heure par jour d'ensolleilement direct à la surface de l'eau (bleu = faible ensoleillement, violet = fort ensoleillement). La photo de gauche présente la situation au moment de l'étude (avant reboisement), la photo de droite présente le resultat obtenu par modélisation après reboisement (Source Hyatt 2023).

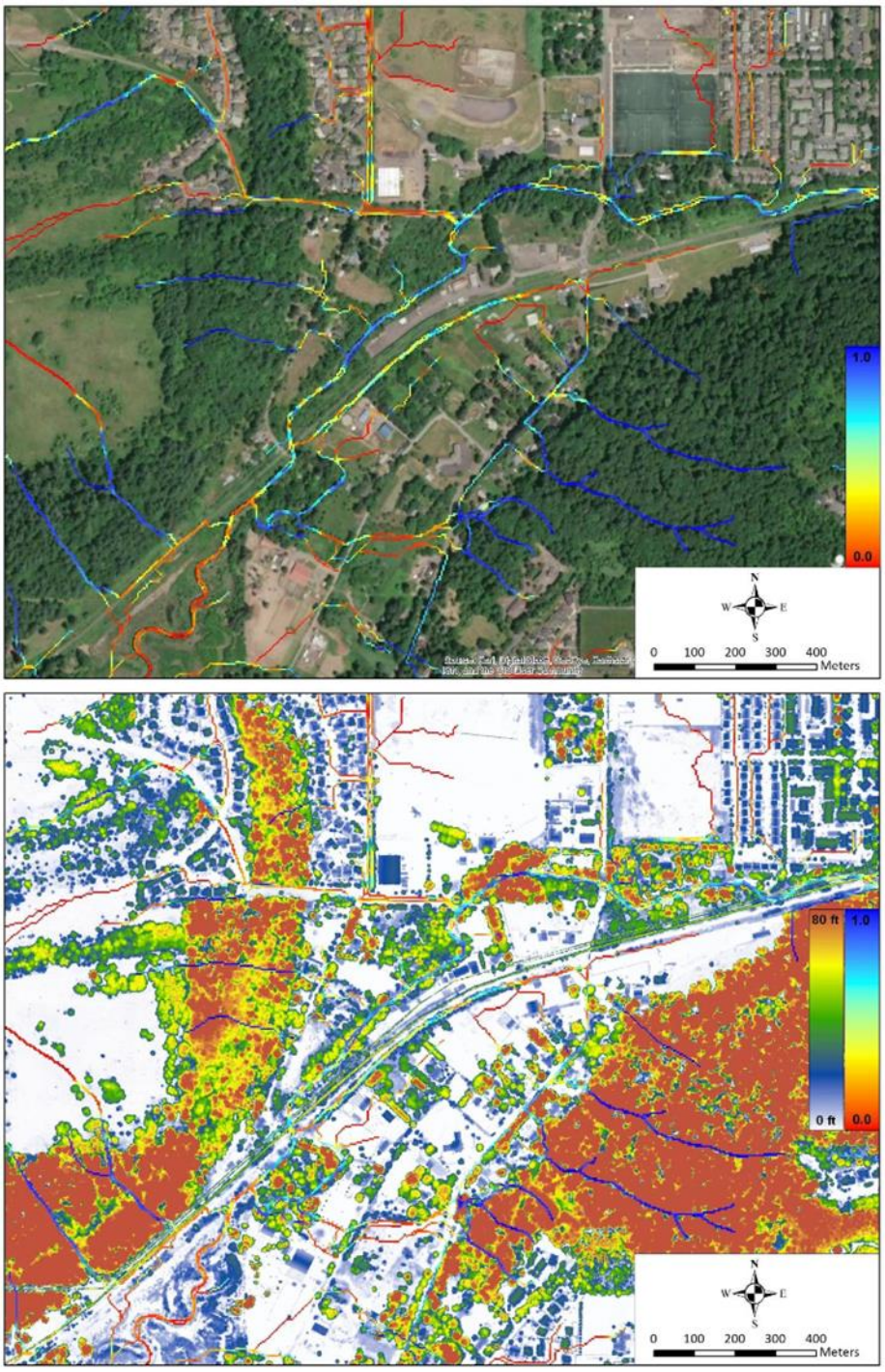


Figure 46 : Exemple de cartes d'ombrage et de hauteur de la végétation rivulaire obtenues par Lidar sur le réseau hydrographique de Johnson Creek (USA). En haut : carte d'ombrage avec une gamme de couleur allant du rouge (0% d'ombrage) au bleu (100% d'ombrage), en bas : carte d'ombrage + carte de hauteur de la végétation avec une gamme de couleur allant du blanc au rouge (blanc : 0m, bleu : 6m, vert : 12m, jaune : 18m, rouge : 24m). Modifié d'après Nielsen 2022.



Figure 47 : Exemple d'une carte des ombrages générées par la ripisylve montrant les zones fortement ombragées (bleu) et celles faiblement ombragées (rouge) (Modifié d'après Environment Agency Open Data, UK).

5.2.7 Créer des refuges thermiques artificiels

La création de refuges thermiques fait partie des actions qui sont proposées et testées dans la littérature scientifique. Ces nouveaux refuges thermiques d'origine anthropique cherchent à compenser la perte des apports naturels et l'élévation des températures d'eau en période critique pour aider les populations de salmonidés à se maintenir.

Trois techniques différentes ont été mises en pratique et testées :

- La création de mares creusées au niveau de résurgences d'eau froide identifiées dans le lit majeur en périphérie du chenal principal (Morley et al. 2005, Moravek et al. 2024). Ces travaux permettent de créer un habitat thermique et physique favorable aux salmonidés à la place d'une résurgence qui, naturellement, serait inutilisable par les poissons (figure 48).

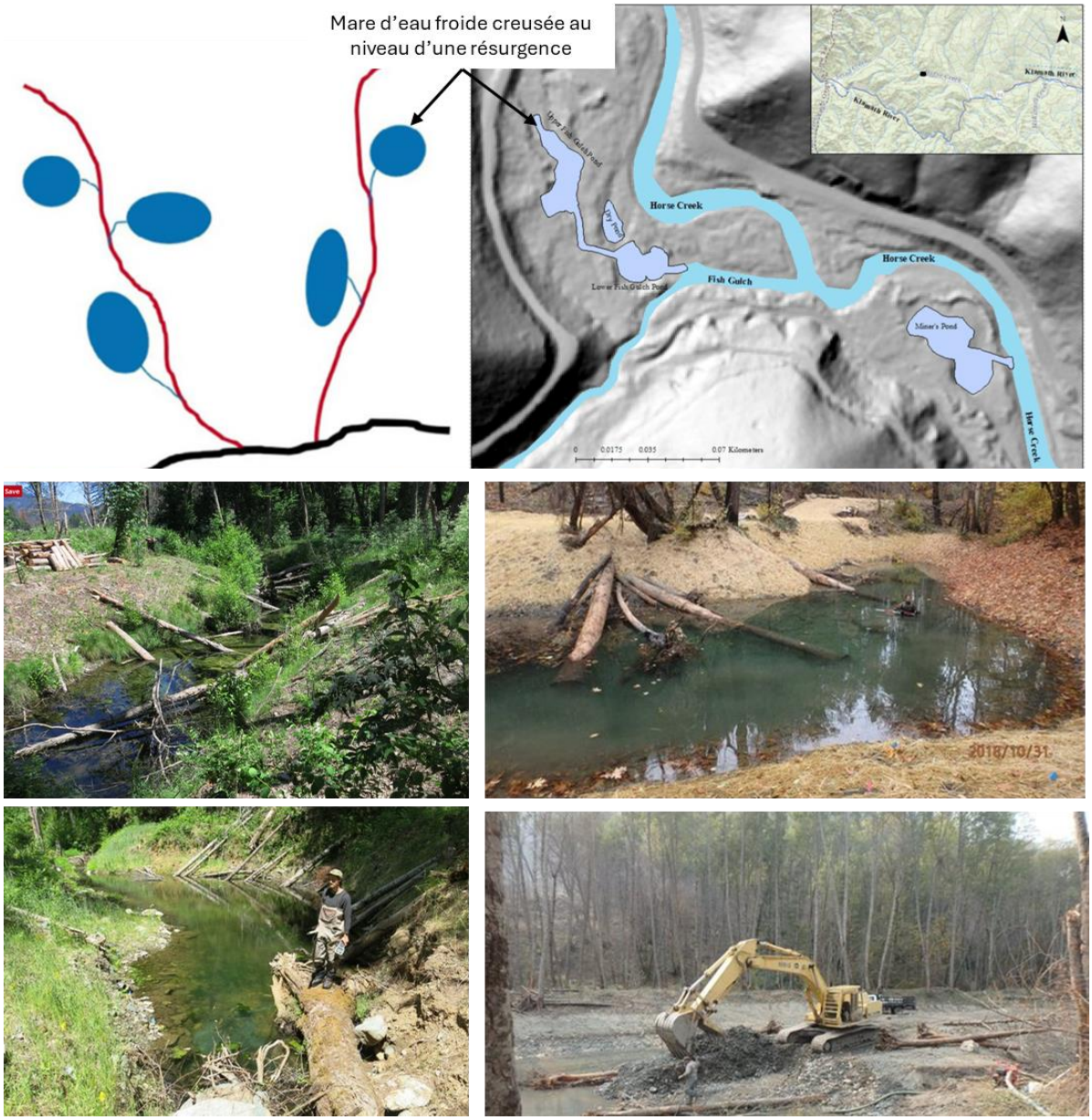


Figure 48 : Exemple de création de refuges thermiques pour les salmonidés en creusant des mares d'eau froide sur le bassin de la rivière Klamath (USA). (Sources : Maher et al. 2019, Moravek et al. 2024, www.mkwc.org).

- L'aménagement de galeries d'infiltration sous graviers qui consiste à injecter une partie du débit de la rivière dans un la zone hyporhéique pour rejeter en sortie une eau plus froide que celle de la rivière (Masurat 2022, Smith et Kurylyk 2023). En sortie de la zone d'infiltration, un chenal à ciel ouvert peut être créé pour rejeter l'eau plus froide et ainsi servir de refuge thermique.

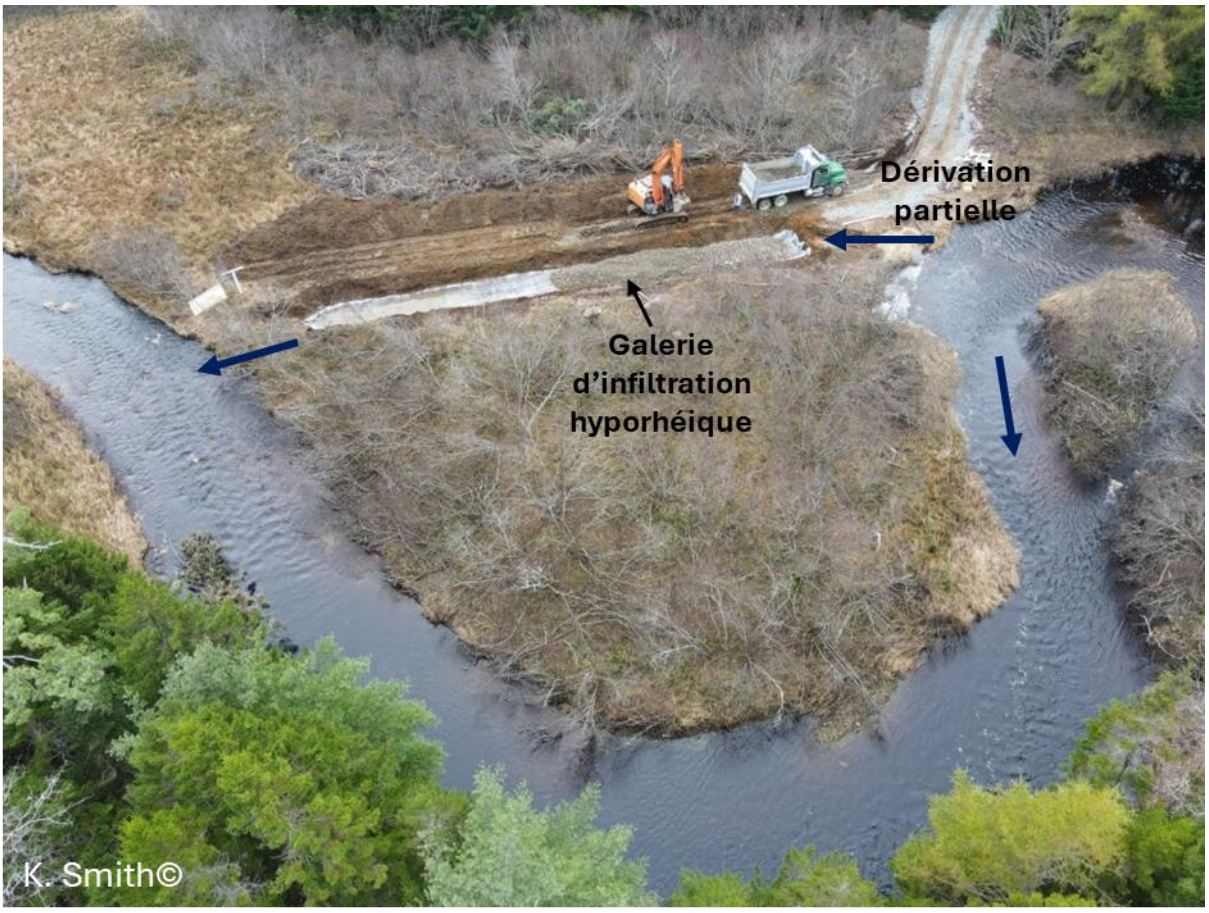


Figure 49 : exemple de création d'une galerie d'infiltration hyporhéique sur la rivière Killag (Canada) dans le but de créer un refuge thermique pour les saumons Atlantiques (Source K. Smith 2023).



Figure 50 : Exemple de création d'une galerie d'infiltration hyporhéique sur la rivière Methow (USA) avec en sortie l'aménagement d'un chenal à ciel ouvert qui sert de refuge thermique (Source Masurat 2022 et Inter-Fluve, https://interfluve.com/2020/fender-mill-alcove/).

- La mise en place de pompage d'eau froide dans la nappe phréatique avec une restitution en surface afin de créer un panache servant de refuge thermique (Kurylyk et al. 2015, Smith et Kurylyk 2023). La fréquence et le débit du pompage sont adaptés pour être uniquement limités aux périodes estivales les plus critiques.

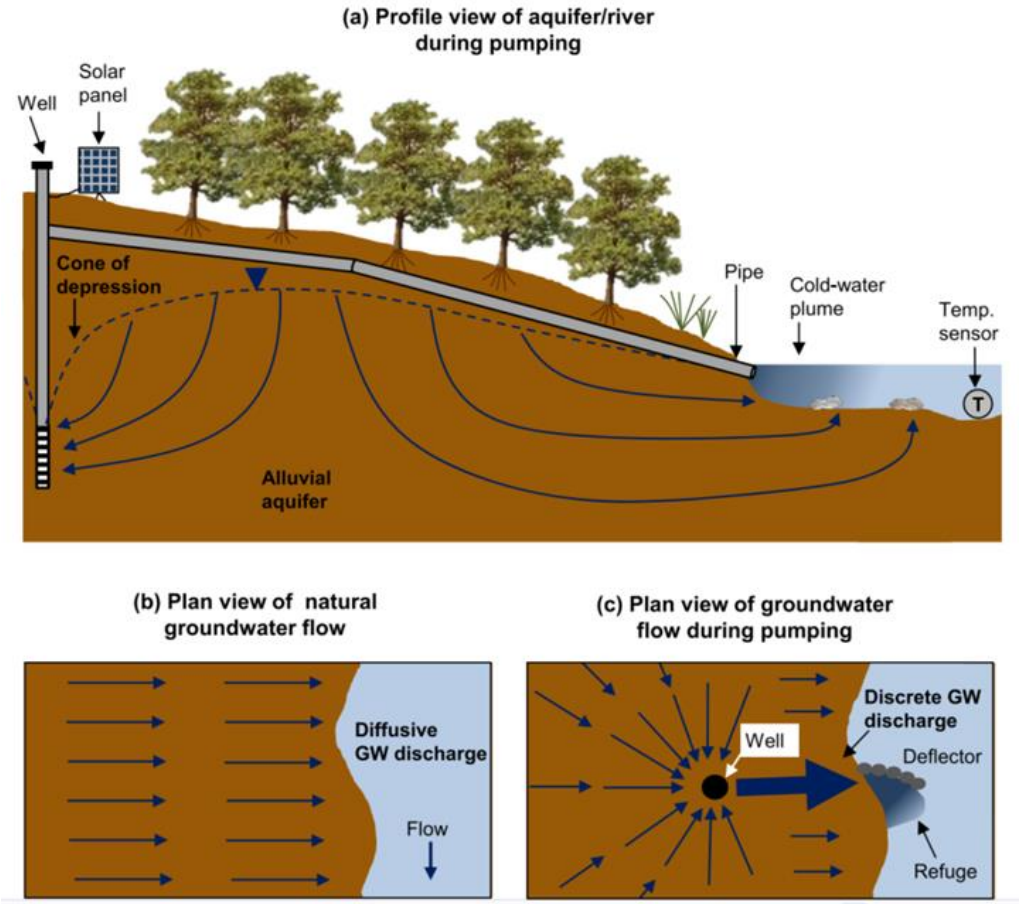


Figure 51 : Schéma de principe de la création d'un refuge thermique temporaire à partir d'un pompage dans la nappe alluviale (Kurylyk et al. 2015).



Figure 52 : Image d'un panache d'eau froide créé artificiellement sur la rivière Wrights (Nouvelle Ecosse, Canada) et qui a été utilisé 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 a été observé sur le Guiers, en Savoie, au niveau de la restitution de la pisciculture de St-Christophe qui alimente ses bassins grâce à un forage dans la nappe. La cartographie thermique du Guiers réalisée en juillet 2022 permet clairement de visualiser l'eau froide dans les bassins 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 53).

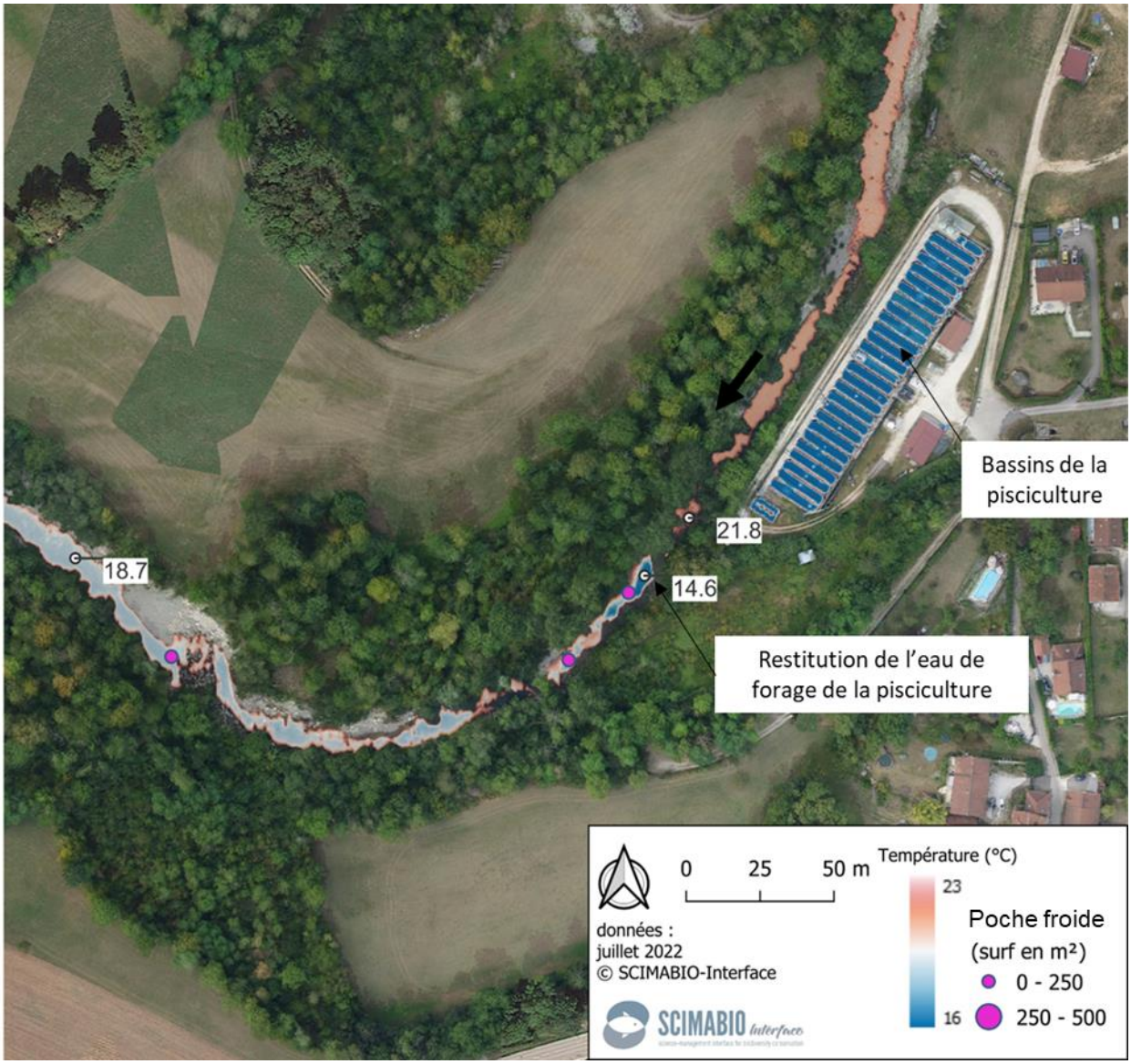


Figure 53 : Mosaïque thermique illustrant l'effet de la restitution du forage de la pisciculture de St-Christophe sur la rivière Guiers (Savoie).

6. CONCLUSION / PERSPECTIVE

Le présent guide, qui a été rédigé dans le cadre d'un programme conjoint sur les rivières Guiers et Chéran, a pour vocation de dépasser les frontières de ces deux bassins afin d'être utile à tous les acteurs de la gestion des milieux aquatiques qui souhaitent intégrer dans leur diagnostic les notions d'habitats thermiques et de refuges thermiques. Ainsi, afin d'être le plus exhaustif possible sur les possibilités actuelles qu'offre la cartographie thermique par IRT-a pour la protection et la conservation des habitats thermiques en rivière, des résultats issus d'autres projets ont été insérés.

Ce guide a été pensé et rédigé avec une orientation ciblée sur la caractérisation des habitats et des refuges thermiques estivaux pour les salmonidés. Il ne reprend pas les éléments déjà publiés ailleurs, sur les aspects techniques et méthodologiques de l'utilisation de l'outil, ni sur son exploitation à des fins de diagnose géomorphologique des cours d'eau. Ce document constitue donc un supplément aux autres guides déjà publiés (voir Dugdale 2016 et Marteau et al. 2023).

Après une explication des différents termes utilisés (habitat thermique, refuge thermique, poche froide, refuge climatique), le guide explique de manière illustrée comment la cartographie thermique par IRT-a peut être utilisée pour répondre à ces besoins de caractérisation de ces habitats particuliers sur de grands linéaires (>100 km) et avec une précision et une résolution fines (0,3°C, 15 à 40 cm·px^{-1}). Les étapes principales de l'analyse sont présentées, et les éléments clés à inclure pour une étude standardisée sont expliqués : remise en contexte du survol dans la dynamique estivale de la température de l'air, de la température de l'eau, des débits, etc. ; évaluation des résultats spatialisés au regard des caractéristiques hydrogéologiques du bassin versant et géomorphologiques du fond de vallée ; diagnostique des actions passées (altérations et restauration) ; cartographie orientée sur les besoins connus d'espèces cibles (truites, ombres communs, etc.) ; et intégration de la dimension temporelle pour une analyse approfondie des conditions d'habitat thermique dans les deux dimensions espace-temps.

Enfin, le guide se termine par une revue de la littérature d'actions menées pour conserver, restaurer et recréer des refuges thermiques, notamment dans des rivières salmonicoles d'Amérique du Nord. La diversité des actions recensées reflète à quel point il peut être complexe d'influer sur les facteurs qui contrôlent la distribution des refuges thermiques, mais également l'éventail des actions possibles lorsque l'on cherche à améliorer la situation. La restauration des refuges thermiques est une facette récente de la restauration écologique des rivières, qui nécessite une appropriation concrète, réfléchie et scientifique de la communauté concernée en France et en Europe, pour une évaluation transparente de sa pertinence sur nos hydrosystèmes. Ces actions peuvent aussi s'appuyer sur le cadre réglementaire et sur des outils de modélisation dont l'usage n'en est également qu'à ses débuts.

Sans chercher à offrir une liste de réponses clés en main à des questions complexes, le guide pose les bases d'un fil de réflexion global pour évaluer le fonctionnement actuel et futur de nos rivières dans un climat qui change, depuis la réalisation du diagnostic jusqu'aux pistes de remédiation. Le constat posé par un grand nombre de gestionnaires, et la tendance des conditions hydroclimatiques changeantes observées depuis maintenant une décennie, illustrent les besoins croissants de méthodes et d'outils capable d'apporter des éléments de réponses à des questions complexes. C'est dans ce cadre que le présent guide propose des pistes pour celles et ceux préoccupés par les conditions d'habitats thermiques en rivière.

7. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Abdi, R., Endreny, T., & Nowak, D. 2020. A model to integrate urban river thermal cooling in river restoration. *Journal of environmental management*, *258*, 110023.

AE RMC, Cemagref de Lyon, Délégation de bassin Rhône-Méditerranée, Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques. 2008. Proposition de démarche pour l'évaluation des débits biologiques minimaux des cours d'eau à inscrire dans les études sur les volumes prélevables. Octobre 2008.

AE RMC. 2013. Mieux gérer les prélèvements d'eau : l'évaluation préalable des débits biologiques dans les cours d'eau. Note technique du SDAGE.

AE RMC. 2019. Plans de Gestion de la Ressource en eau (PGRE). Principes, gouvernance, suivi et révision. Note technique du SDAGE.

AESN, OFB, DREAL Centre Val de Loire 2022. Analyses Hydrologie Milieux Usage Climat (HMUC) guide et recommandations méthodologiques., 63p.

Alabaster, J. S., & Loyd, R. 1980. Water quality criteria for freshwater fish. Butterworths, London, UK.

Almodóvar, A., Nicola, G. G., Ayllón, D., & Elvira, B. 2012. Global warming threatens the persistence of Mediterranean brown trout. *Global Change Biology*, *18*(5), 1549-1560.

Bell, J. M. 2006. The assessment of thermal impacts on habitat selection, growth, reproduction and mortality in brown trout (Salmo trutta L.): a review of the literature. *Rep. No. EPA GRANT# WS*, 97512701-0.

Bilby, R. E., 1984. Characteristics and Frequency of Cool-Water Areas in a Western Washington Stream. *Journal of Freshwater Ecology* 2: 593-602

Bolick, M. M., Post, C. J., Mikhailova, E. A., Zurqani, H. A., Grunwald, A. P., & Saldo, E. A. 2021. Evaluation of riparian tree cover and shading in the Chauga river watershed using LiDAR and deep learning land cover classification. *Remote Sensing*, *13*(20), 4172.

Boulton, A. J. 2007. Hyporheic rehabilitation in rivers: restoring vertical connectivity. *Freshwater Biology*, *52*(4), 632-650.

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.

Caudron A., Marteau B., 2024a. Le rôle de la trame turquoise dans la sauvegarde et la restauration des refuges thermiques pour les salmonidés – programme conjoint sur le Guiers et le Chéran. *Rapport final AAP Eau et Biodiversité AERMC 2020.* 174p.

Caudron A., Marteau B. 2024b. Cartographie thermique par infra-rouge thermique aéroporté (IRTa) du Doubs moyen et amont, du Dessoubre et du Cusancin. EPAGE Doubs-Dessoubre, 119 pages.

Ciotti, D. C., Mckee, J., Pope, K. L., Kondolf, G. M., & Pollock, M. M. 2021. Design criteria for process-based restoration of fluvial systems. *Bioscience*, *71*(8), 831-845.

Corey, E. 2022. The biological significance of thermal refuges to juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar*) in a changing climate. PhD Thesis, University of New Brunswick 217p.

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., & 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), p-3.

Dugdale, S. J., Malcolm, I. A., & Hannah, D. M. 2024. Understanding the effects of spatially variable riparian tree planting strategies to target water temperature reductions in rivers. *Journal of Hydrology*, *635*, 131163.

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.

Dugdale, S. J., Malcolm, I. A., Kantola, K., & Hannah, D. M. 2018. Stream temperature under contrasting riparian forest cover: Understanding thermal dynamics and heat exchange processes. *Science of the Total Environment*, *610*, 1375-1389.

Dugdale, S. J., Hannah, D. M., & Malcolm, I. A. 2017. River temperature modelling: A review of process-based approaches and future directions. *Earth-Science Reviews*, *175*, 97-113.

Dugdale, S. J. 2016. A practitioner's guide to thermal infrared remote sensing of rivers and streams: recent advances, precautions and considerations. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, *3*(2), 251-268.

Dugdale, S. J., Franssen, J., Corey, E., Bergeron, N. E., Lapointe, M., & Cunjak, R. A. 2016. Main stem movement of Atlantic salmon parr in response to high river temperature. *Ecology of Freshwater Fish*, 25(3), 429-445.

Dugdale, S. J., Bergeron, N. E., & 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.

Dugdale, S. J., Bergeron, N. E., & St-Hilaire, A. 2013. Temporal variability of thermal refuges and water temperature patterns in an Atlantic salmon river. *Remote Sensing of Environment*, *136*, 358-373.

Dzara, J. R., Neilson, B. T., & Null, S. E. 2019. Quantifying thermal refugia connectivity by combining temperature modeling, distributed temperature sensing, and thermal infrared imaging. *Hydrology and Earth System Sciences*, *23*(7), 2965-2982.

Ebersole, J. L., W. J. Liss, and C. A. Frissell. 2001. Relationship between stream temperature, thermal refugia and rainbow trout Oncorhynchus mykiss abundance in arid-land streams in the northwestern United States. *Ecology of Freshwater Fish* 10: 1-10.

Elliott, J., & Elliott, J. A. 2010. Temperature requirements of Atlantic salmon Salmo salar, brown trout Salmo trutta and Arctic charr Salvelinus alpinus: predicting the effects of climate change. *Journal of fish biology*, *77*(8), 1793-1817.

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.

Elliott J.M., 1981. *Some aspects of thermal stress on freshwater teleosts*. *In*: Pickering AD, editor, Stress and fish. London: Academic press. pp.209-245.

Frechette, D. M., Dugdale, S. J., Dodson, J. J., & Bergeron, N. E. 201). Understanding summertime thermal refuge use by adult Atlantic salmon using remote sensing, river temperature monitoring, and acoustic telemetry. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, *75*(11), 1999-2010.

Fuller, M. R., Leinenbach, P., Detenbeck, N. E., Labiosa, R., & Isaak, D. J. 2022. Riparian vegetation shade restoration and loss effects on recent and future stream temperatures. *Restoration Ecology*, *30*(7), e13626.

Gurrieri, J. 2023. Groundwater Considerations for Stream Restoration. U.S. Department of Agriculture, Forest Service; National Stream and Aquatic Ecology Center. Technical Note TN-105. Fort Collins, Colorado.

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), 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.

Kalny, G., Laaha, G., Melcher, A., Trimmel, H., Weihs, P., & Rauch, H. P. 2017. The influence of riparian vegetation shading on water temperature during low flow conditions in a medium sized river. *Knowledge & Management of Aquatic Ecosystems*, (418), 5.

Kasahara, T., Datry, T., Mutz, M., & Boulton, A. J. 2009. Treating causes not symptoms: restoration of surface–groundwater interactions in rivers. *Marine and freshwater research*, *60*(9), 976-981.

Keeping Rivers Cool 2016. A guidance Manual. Creating riparian shade for climate change adaptation. 22p.

Kristensen, P. B., Kristensen, E. A., Riis, T., Alnoee, A. B., Larsen, S. E., Verdonschot, P. F. M., & Baattrup-Pedersen, A. 2015. Riparian forest as a management tool for moderating future thermal conditions of lowland temperate streams. *Inland Waters*, *5*(1), 27-38.

Kurth, A. M., Weber, C., & Schirmer, M. 2015. How effective is river restoration in re-establishing groundwater–surface water interactions?–A case study. *Hydrology and Earth System Sciences*, *19*(6), 2663-2672.

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.

Lamouroux, N., Augeard, B., Baran, P., Capra, H., Le Coarer, Y., Girard, V., ... & Tissot, L. 2018. Débits écologiques: la place des modèles d'habitat hydraulique dans une démarche intégrée. *Hydroécologie appliquée*, *20*, 1-27.

Lower Columbia Estuary Partnership 2021. Pilot Thermal Refuge Enhancement at the Horsetail Creek-Columbia River Confluence. Feasability and preliminary basis of design report, 66p.

Lee, S. Y., Fullerton, A. H., Sun, N., & Torgersen, C. E. 2020. Projecting spatiotemporally explicit effects of climate change on stream temperature: A model comparison and implications for coldwater fishes. *Journal of Hydrology*, *588*, 125066.

Linnansaari, T., O'Sullivan, A. M., Breau, C., Corey, E. M., Collet, E. N., Curry, R. A., & Cunjak, R. A. 2023. The role of cold-water thermal refuges for stream salmonids in a changing climate—Experiences from Atlantic Canada. *Fishes*, *8*(9), 471.

Loicq, P., Moatar, F., Jullian, Y., Dugdale, S. J., & Hannah, D. M. 2018. Improving representation of riparian vegetation shading in a regional stream temperature model using LiDAR data. *Science of the total environment*, *624*, 480-490.

Maher S, Rose D, Stanfield I, Woelfle-Erskine C 2019. Horse creek off-channel pond monitoring results: characteristics of juvenile salmon habitat in summer 2019. Technical report, 16p.

Marteau, B., Piégay, H., & Moatar, F. 2023. L'infrarouge thermique aéroporté, un outil de connaissance des rivières face au changement climatique. *Rapport de projet Zone-Atelier Bassin du Rhône*, *Action 72*, 84p.

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. 2022a. 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.

Marteau, B., Piégay, H., Chandesris, A., Michel, K., & Vaudor, L. 2022b. Riparian shading mitigates warming but cannot revert thermal alteration by impoundments in lowland rivers. *Earth Surface Processes and Landforms*, *47*(9), 2209-2229.

Masurat, N. 2022. Off-channel habitat restoration using groundwater infiltration galleries in the Methow River Basin, Washington. Master Thesis, WWU Graduate School Collection, 82p.

Morgan, A. M., & O'Sullivan, A. M. 2023. Cooler, bigger; warmer, smaller: Fine-scale thermal heterogeneity maps age class and species distribution in behaviourally thermoregulating salmonids. *River Research and Applications*, *39*(2), 163-176.

Moravek, J. A., Soto, T., Brashares, J. S., & Ruhí, A. 2024. Restored off-channel pond habitats create thermal regime diversity and refuges within a Mediterranean-climate watershed. *Restoration Ecology*, *32*(4), e14110.

Morley, S. A., Garcia, P. S., Bennett, T. R., & Roni, P. 2005. Juvenile salmonid (*Oncorhynchus* spp.) use of constructed and natural side channels in Pacific Northwest rivers. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, *62*(12), 2811-2821.

Nielsen, E. M. 2022. An economical and repeatable method for mapping shade cast on water channels. *Environmental Science*, 1-20.

Olden, J. D., & Naiman, R. J. 2010. Incorporating thermal regimes into environmental flows assessments: modifying dam operations to restore freshwater ecosystem integrity. *Freshwater Biology*, *55*(1), 86-107.

O'Sullivan, A. M., Linnansaari, T., Leavitt, J., Samways, K. M., Kurylyk, B. L., & Curry, R. A. 2022. The salmon-peloton: Hydraulic habitat shifts of adult Atlantic salmon (*Salmo salar*) due to behavioural thermoregulation. *River Research and Applications*, *38*(1), 107-118.

Ouellet, V., St-Hilaire, A., Secretan, Y., Mingelbier, M., Morin, J., & Dugdale, S. J. 2021. The importance of including water temperature simulations in a 2D fish habitat model for the St. Lawrence River. *Water*, *13*(13), 1736.

Pander, J., Kuhn, J., Casas-Mulet, R., Habersetzer, L., & Geist, J. 2024. Diurnal patterns of spatial stream temperature variations reveal the need for integrating thermal heterogeneity in riverscape habitat restoration. *Science of the Total Environment*, *918*, 170786.

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

Saadi, A. M., Msilini, A., Charron, C., St‐Hilaire, A., & Ouarda, T. B. 2022. Estimation of the area of potential thermal refuges using generalized additive models and multivariate adaptive regression splines: A case study from the Ste‐Marguerite River. *River Research and Applications*, *38*(1), 23-35.

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.

Sedighkia, M., & Datta, B. 2024. Minimum environmental flow assessment: a fuzzy TOPSIS decision-making system for selecting the best approach. *Discover Water*, *4*(1), 1-19.

Smith, K. A., & Kurylyk, B. L. 2023. Creating groundwater-sourced thermal refuges in rivers to adapt to a warning world. Geological Society of America meeting. https://gsa.confex.com/gsa/2023AM/meetingapp.cgi/Paper/392393

Smith, B., Clifford, N. J., & Mant, J. 2014. The changing nature of river restoration. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, *1*(3), 249-261.

Somers, K. A., Bernhardt, E. S., Grace, J. B., Hassett, B. A., Sudduth, E. B., Wang, S., & Urban, D. L. 2013. Streams in the urban heat island: spatial and temporal variability in temperature. *Freshwater Science*, *32*(1), 309-326.

Strange, J. S. 2011. Salmonid use of thermal refuges in the Klamath River: 2010 annual monitoring study. *Yurok Tribal Fisheries Program, Hoopa, CA.* Final Report, 24p.

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

Tague, C., Valentine, S., & Kotchen, M. 2008. Effect of geomorphic channel restoration on streamflow and groundwater in a snowmelt‐dominated watershed. *Water Resources Research*, *44*(10).

Torgersen, C. E., Ebersole, J. L., & Keenan, D. M. 2012. Primer for identifying cold-water refuges to protect and restore thermal diversity in riverine landscapes. *USGS Report*, 39p.

Ubing C., Bountry J. 2019. The potential for restoring thermal refuges in rivers for cold-water fishes. Research and Development Office, Science and Technology Program. Final Report ST-2019-212-01.

Varley M.E., 1967. Water temperature and dissolved oxygen as environmental factors affecting fishes. pp 29-52 In British freshwater fishes, Fishing News, London.

Vatland, S. J., Gresswell, R. E., & Poole, G. C. 2015. Quantifying stream thermal regimes at multiple scales: Combining thermal infrared imagery and stationary stream temperature data in a novel modeling framework. *Water Resources Research*, *51*(1), 31-46.

Veról, A. P., Lourenço, I. B., Rebechi Fraga, J. P., Battemarco, B. P., Merlo, M. L., de Magalhães, P. C., & Miguez, M. G. 2020. River Restoration Integrated with Sustainable Urban Water Management for Resilient Cities. *Sustainability* 12(.11): 4677.

Vornanen, M., Haverinen, J., & Egginton, S. 2014. Acute heat tolerance of cardiac excitation in the brown trout (Salmo trutta fario). *Journal of Experimental Biology*, *217*(2), 299-309.

Wang, T., Kelson, S. J., Greer, G., Thompson, S. E., & Carlson, S. M. 2020. Tributary confluences are dynamic thermal refuges for a juvenile salmonid in a warming river network. *River Research and Applications*, *36*(7), 1076-1086.

Wawrzyniak, V., Allemand, P., Bailly, S., Lejot, J., & Piégay, H. 2017. Coupling LiDAR and thermal imagery to model the effects of riparian vegetation shade and groundwater inputs on summer river temperature. *Science of the Total Environment*, *592*, 616-626.

Wheaton, J. M., Bennett, S. N., Bouwes, N. W., Maestas, J. D., & Shahverdian, S. M. (Eds.). 2019. *Low-tech process-based restoration of Riverscapes: Design manual*. Utah State University Restoration Consortium.

White, J. C., Khamis, K., Dugdale, S., Jackson, F. L., Malcolm, I. A., Krause, S., & Hannah, D. M. 2023. Drought impacts on river water temperature: A process‐based understanding from temperate climates. *Hydrological Processes*, *37*(10), e14958.

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.