



Cartographie thermique par infra-rouge thermique aéroporté (IRTa) du Doubs moyen et amont, du Dessoubre et du Cusancin



Référence à citer :

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

SOMMAIRE

1.	Méthodologie de la cartographie thermiques par IRT-a.....	4
1.1	Description de la campagne d'acquisition	4
1.2	Conditions climatique et hydrologique au cours de l'été	7
1.3	Conditions de température d'eau au cours de l'été.....	9
1.4	Notion de refuges thermiques et refuges climatiques pour les espèces thermo-sensibles	10
2.	Résultats de la cartographie thermique par IRT-a sur le Cusancin	12
2.1	Diversité thermique de la rivière le jour du survol	12
2.2	Profil longitudinal de température	13
2.3	Détection des anomalies thermiques chaudes.....	14
2.3.1	Caractéristiques et distribution sur le linéaire	14
2.3.2	Cartographies des mosaïques thermiques	16
2.4	Détection des poches froides	22
2.4.1	Caractéristiques et distribution sur le linéaire	22
2.4.2	Les zones de refroidissements majeurs.....	26
2.5	Variations spatio-temporelles des habitats thermiques vis à vis des salmonidés.....	30
2.6	Refuges thermiques et refuges climatiques potentiels pour les salmonidés	33
3.	Résultats de la cartographie thermique par IRT-a sur le Dessoubre.....	36
3.1	Diversité thermique de la rivière le jour du survol	36
3.2	Profil longitudinal de température	37
3.3	Détection des anomalies thermiques chaudes.....	40
3.3.1	Caractéristiques et distribution sur le linéaire	40
3.3.2	Cartographies des mosaïques thermiques	42
3.4	Détection des poches froides	55
3.4.1	Caractéristiques et distribution sur le linéaire	55
3.4.2	Les zones de refroidissements majeurs.....	60
3.5	Variations spatio-temporelles des habitats thermiques vis à vis des salmonidés.....	76
3.6	Refuges thermiques et refuges climatiques potentiels pour les salmonidés	80
4.	Résultats de la cartographie thermique par IRT-a sur le Doubs	89
4.1	Diversité thermique de la rivière le jour du survol	89
4.2	Profils longitudinaux de température.....	90
4.3	Interprétation des « poches froides ».....	94
4.3.1	Sur le Doubs amont	94
4.3.2	Sur le Doubs médian.....	107
4.1	Variations spatio-temporelles des habitats thermiques vis à vis des salmonidés sur le Doubs amont	112
5.	Synthèse	116
6.	Références citées.....	118

1. MÉTHODOLOGIE DE LA CARTOGRAPHIE THERMIQUES PAR IRT-A

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

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

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

La température médiane, extraite tous les 100 m, a été utilisée pour construire le profil longitudinal de température. A partir de ce profil, une carte de température médiane locale a été générée par interpolation spatiale. La comparaison de la mosaïque thermique avec cette carte nouvellement établie de la température médiane locale permet de ressortir des poches d'eau plus froide que la masse d'eau générale. Le seuil de température en-deçà duquel une poche d'eau est considérée comme significativement plus froide que l'eau de la rivière a été calculé à 0,50°C. Ce seuil est construit sur une approche de seuil de détection limite qui intègre l'ensemble des incertitudes liées à la méthode (erreurs intrinsèques de la caméra, calibration empirique, variabilité spatiale, etc., Marteau et al., 2022). Enfin, un seuil de taille a été choisi pour éliminer les structures pouvant être générées lors de la création de la mosaïque thermique : pour être comptabilisée, une poche froide doit donc être constituée d'au moins 4 pixels adjacents, c'est-à-dire avoir une taille visible à la surface d'au moins 0,36 m².

1.1 Description de la campagne d'acquisition

La campagne d'acquisition IRT-a sur les 3 rivières a été réalisées en ULM le 23 août 2023, entre 15h02 et 19h05. Les linéaires imagés sont de 12km sur le Cusancin, 24 km sur le Doubs Médián, 31 km sur le Doubs amont et 34 km sur le Dessoubre. Les vols ont été réalisés à une altitude comprise entre 200 et 300m et à une vitesse moyenne de 15 m·s⁻¹.

Sur le Doubs, les linéaires qui ont pu être imagés sont inférieurs à ceux envisagés. Le pilote, seul responsable de la sécurité du vol, a pris l'initiative de réduire le temps de survol pour des raisons de sécurité. En effet, les fortes températures d'air observées le jour du survol ont provoqué des conditions de vols relativement dangereuses pour un ULM. En effet, lors d'épisode de forte chaleur, la température élevée entraîne une modification de la densité de l'air qui réduit la portance de l'aéronef. La conséquence est une perte régulière de l'altitude qui ne peut être compensée par le moteur thermique. Les dégradations des performances de vol sont considérées comme significatives à partir de 30°C. Au moment du survol, les températures sur le territoire étudié étaient comprises entre 35 et 40°C.



Figure 1 : Stabilisateur embarquant les capteurs optique et thermique installés sur le côté de l'ULM. (Crédit : S. Blanchon – Jura ULM©).



Figure 2 : Linéaires concernés par la campagne d'acquisition IRT-a sur les 3 cours d'eau et localisation des sondes thermiques de calibration.

Sur les 14 thermographes (HOBO® Water Temp Pro v2, précision de $\pm 0,21^{\circ}\text{C}$, résolution de $0,02^{\circ}\text{C}$) déployés le long du linéaire d'étude le jour du survol, 13 ont pu être utilisés pour la calibration des données IRT-a. Leur positionnement a été choisi afin de maximiser la diversité des conditions de température observées. En effet, plus la gamme de température utilisée pour la validation/calibration est grande, plus la certitude de la mesure augmente. Ainsi, la droite de régression représentant la relation entre température « radiante » et la température réelle montre une représentation satisfaisante ($R^2 = 0.97$) sur une gamme de température d'environ 14 à 28°C (figure 3).

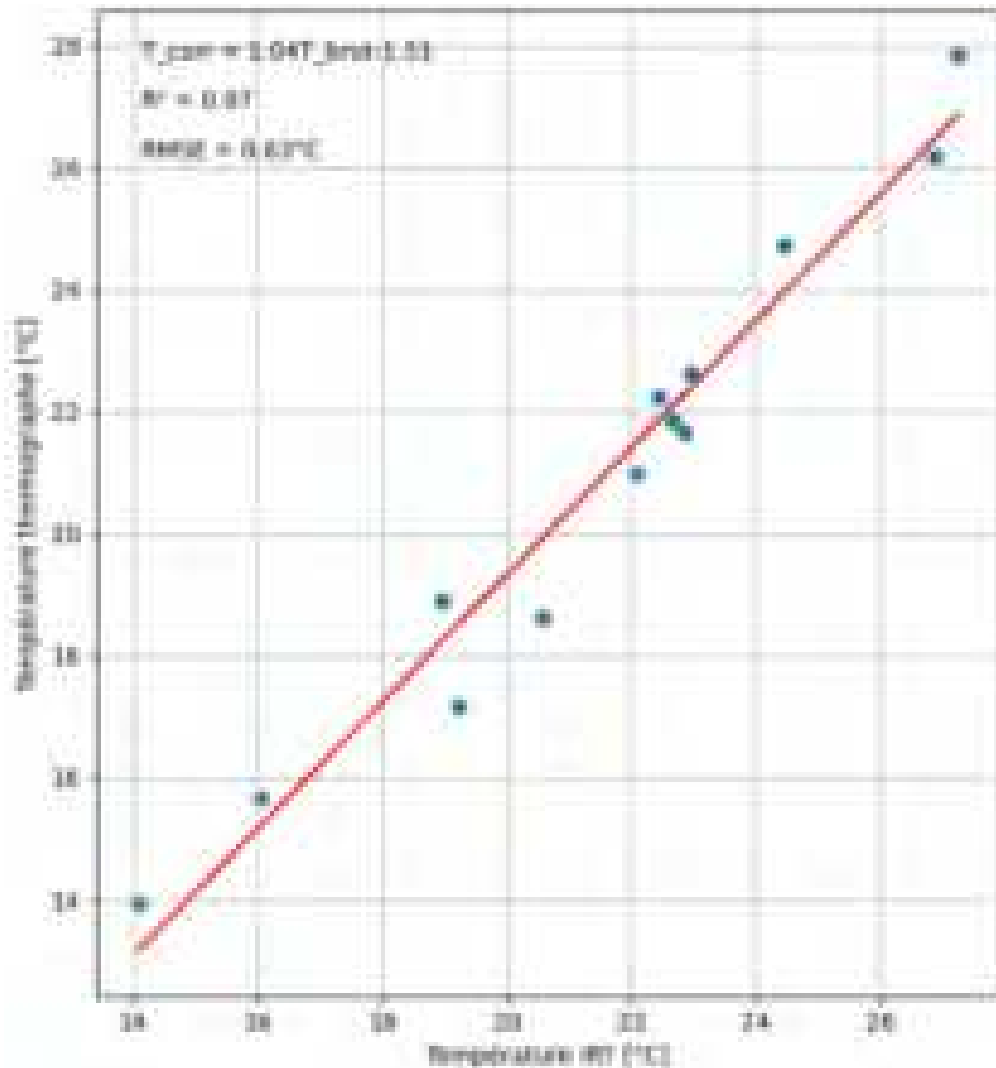


Figure 3 : Relation entre la température radiante (issue des images thermiques) et la température réelle de la rivière (issue des thermographes), enregistrées pendant le survol.

1.2 Conditions climatique et hydrologique au cours de l'été

Afin de caractériser les conditions climatique et hydrologique sur les 4 linéaires investigués au cours de l'été 2023 et le jour du survol, les températures de l'air et les débits ont été étudiées entre le 15 juin et le 31 août 2023. Pour les données de températures d'air, les stations météorologiques de Baume-les-Dames (pour le Cusancin) et de Maîche (pour le Dessoubre et le Doubs) ont été utilisées car il s'agit des stations les plus proches des linéaires concernés pour lesquelles des données validées pour l'été 2023 étaient disponibles (source www.infoclimat.fr). Pour les débits, les données hydrométriques des stations de Baume-les-Dames pour le Cusancin, de St-Hippolyte pour le Dessoubre et de Pontarlier et Glère pour le Doubs ont été exploitées (source HydroPortail : www.hydro.eaufrance.fr/).

Les débits des cours d'eau et les températures minimale et maximale de l'air le jour du survol, soit le 23 août 2023, sont présentés dans le tableau 1. L'évolution des conditions de températures de l'air et de débit sur les trois cours d'eau au cours de l'été 2023 est présentée sur la figure 4.

Débits le 23 août 2023	
Le Cusancin à Baume-les-Dames	0,50m ³ /s
Le Dessoubre à St-Hippolyte	0,93m ³ /s
Le Doubs à Pontarlier	0,67m ³ /s
Le Doubs à Glère	3,41m ³ /s
Températures minimale et maximales de l'air le 23 août 2023	
Station de Baume-les-Dames	20 à 33,2°C
Station de Maîche	15,7 à 29,8°C

Tableau 1 : données des débits et des températures minimales et maximale de l'air le jour du survol au niveau des stations météorologiques et hydrologiques sélectionnées (sources infoclimat.fr et hydro.eaufrance.fr).

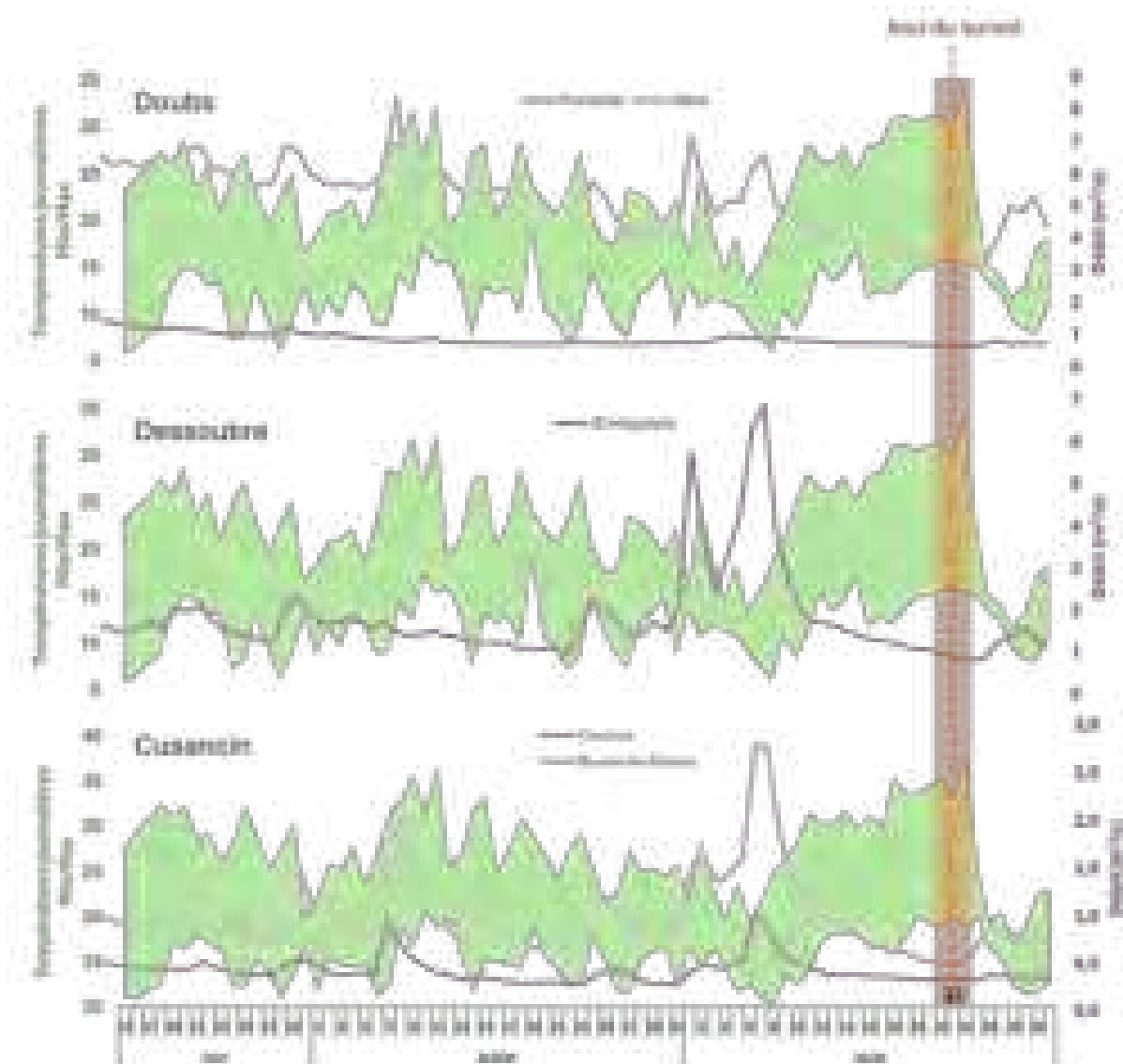


Figure 4 : Evolution des amplitudes des températures journalières de l'air et des débits pour les trois cours d'eau concernés du 15 juin au 31 août 2022 (source météo France et HydroPortail).

Le survol (23 août 2023), a été réalisé au cours de la période la plus chaude de l'été et dans des conditions d'étiages également parmi les plus sévères de l'été.

Des conditions climatiques et hydrologiques similaires à celles du jour du survol ont été observées seulement pendant 3 jours sur un total de 26 jours entre le 15 juin et le 31 août 2022 (figure 4).

1.3 Conditions de température d'eau au cours de l'été

Les conditions de températures d'eau au cours de l'été 2023 et le jour du survol ont été caractérisées à partir des données de la FDPPMA du Doubs. Douze stations réparties sur le linéaire des 3 cours d'eau ont été utilisées (figure 5).



Figure 5 : Localisation des 12 stations de suivi thermique utilisées en été 2023 sur les 3 cours d'eau concernés. La station CUSA 04 qui contenait des données partielles n'a pas été retenue.

Au cours de l'été 2023 les températures ont montré des valeurs plus élevées au cours de 3 périodes : entre le 15 et le 30 juin, du 08 au 25 juillet puis du 15 au 27 août (figure 6). A partir du 28 août, les températures d'eau montrent une chute importante puis restent au cours de septembre dans des valeurs moins élevées que durant les 3 mois précédents (figure 6).

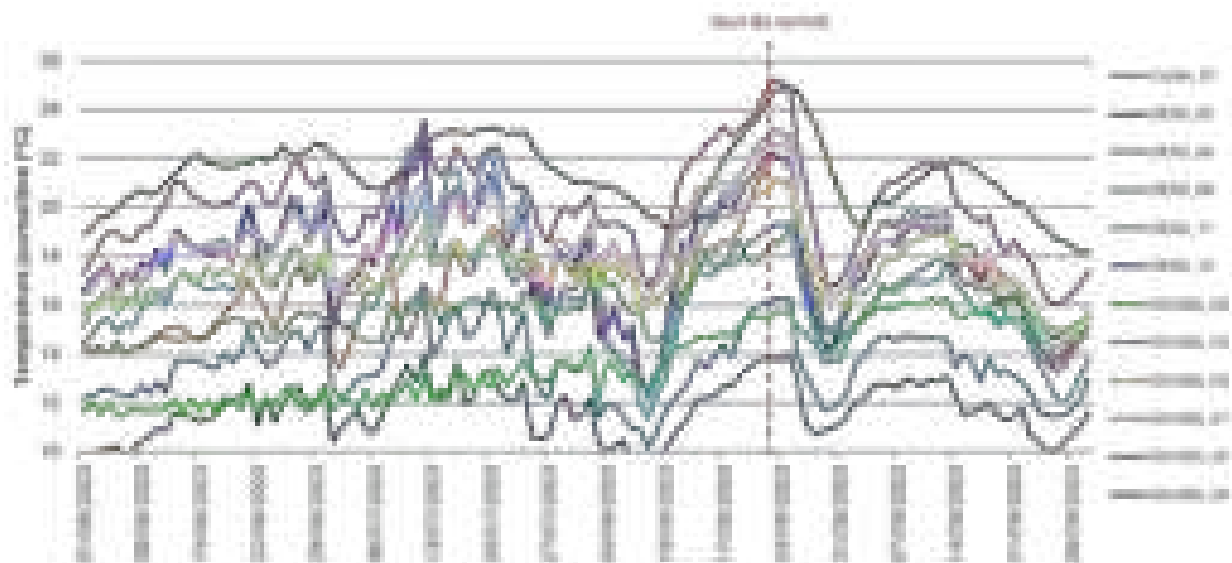


Figure 6 : Températures journalières du 01 juin au 30 septembre 2023 pour les 12 stations suivies sur le Cusancin, le Dessoubre, le Doubs amont et médian (source FDPPMA 25).

Le jour du survol, les températures d'eau étaient parmi les plus chaudes de l'été (figure 6). Si on regarde plus précisément les données de températures horaires sur les 3 jours qui encadrent le survol, du 22 au 24 août 2023, on observe que le survol a été réalisé au cours des heures où les températures d'eau étaient les plus chaudes sur les 3 jours d'eau (figure 7).

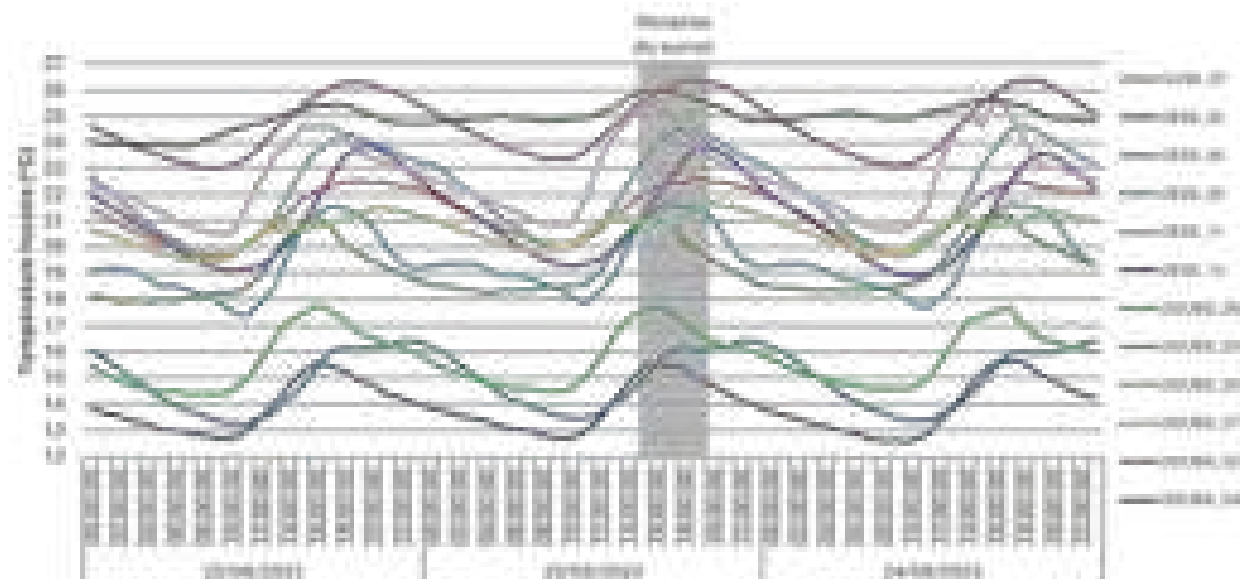


Figure 7 : Températures horaires du 22 au 24 août 2023 et indication de la plage horaire du survol pour les 12 stations suivies sur le Cusancin, le Dessoubre, le Doubs amont et médian (source FDPMA 25).

1.4 NOTION DE REFUGES THERMIQUES ET REFUGES CLIMATIQUES POUR LES ESPÈCES THERMO-SENSIBLES

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

Un refuge climatique est considéré comme une zone où une population va être capable de se maintenir pendant une période durant laquelle les conditions de vie ne sont plus favorables ailleurs. Il intervient sur une échelle de temps de plusieurs générations et nécessite de disposer de l'ensemble des habitats nécessaires au maintien de populations entières (Isaak et Young, 2023). Ainsi, 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 d'espèces thermo-sensibles, comme les salmonidés, de se maintenir sur le long terme.

Toutes les poches d'eau froide recensées par IRT-a ne peuvent être considérées comme des refuges thermiques pour les espèces de poissons thermosensibles comme la truite. En effet, pour être qualifié de refuge thermique, une poche froide nécessite de pouvoir exercer une fonction biologique de refuge pour les espèces considérées. Par exemple, pour la truite certaines exfiltrations de banc présentent une hauteur d'eau trop faible pour être accueillantes. Également, plusieurs poches froides consécutives peuvent créer qu'une seule zone de refuge thermique. Enfin, la notion de refuge s'entend lorsque la température ambiante d'un tronçon de vie dépasse les exigences de l'espèce considérée à telle point qu'elle oblige les individus à rechercher des zones moins chaudes pour se réfugier sur une durée limitée.

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



Ces zones refuges peuvent présenter soit un différentiel de température important avec la rivière dans le cas de résurgences d'eau souterraine, 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.

2. RÉSULTATS DE LA CARTOGRAPHIE THERMIQUE PAR IRT-A SUR LE CUSANCIN

Au total, 561 photographies ont été acquises et 407 ont été alignées pour générer une orthophoto recouvrant environ 4.4km² pour une résolution au sol de 5.2 cm/pixel. De la même manière, 534 images thermiques ont été prises et 487 alignées pour créer une mosaïque thermique de la même superficie, pour une résolution d'image au sol de 25.6cm/pixel.

Il est important de garder en mémoire pour l'interprétation des résultats que la technologie IRT-a fournit une information de température de surface, et ne cartographie que ce qui est visible depuis les airs.

2.1 Diversité thermique de la rivière le jour du survol

L'histogramme des valeurs de température de l'ensemble des pixels en eau obtenu le jour du survol constitue une première approche dans l'analyse des résultats issus de la cartographie thermique (figure 8). L'histogramme montre :

- Un mode principal autour de 19,5°C qui constitue la médiane.
- Un mode représentant moins de pixels mais avec une température élevée autour de 23,5°C.
- Une densité de secteurs non négligeable, autour de 60% des pixels, qui présentent des températures supérieures au seuil de stress physiologique pour les salmonidés, fixé à 19°C.
- Une quantité de pixels avec des températures plus fraîches (<17°C), représentant majoritairement les poches froides ou les secteurs les plus froids de la rivière qui peuvent jouer un rôle clé de refuge thermique en période estivale puisque ces zones se trouvent dans le *preferendum* thermique des salmonidés.

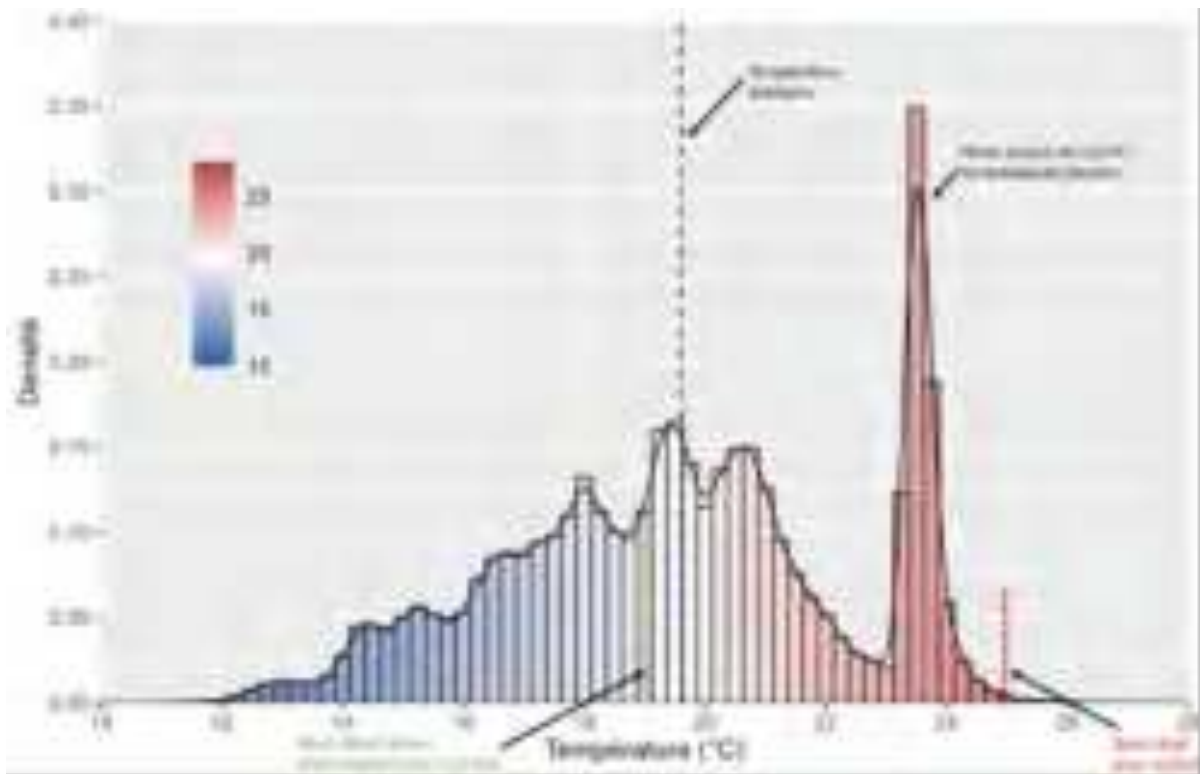


Figure 8 : Histogramme de distribution des pixels de température sur le Cusancin issu de la campagne IRT-a d'août 2023. La température médiane observée le 21 juillet 2022 est de 19,5°C. Données sur les exigences thermiques de la truite issues de Crisp (1996), Elliott et Hurley (2001).

2.2 Profil longitudinal de température

Le profil longitudinal, obtenu à partir des températures médianes tous les 100 mètres, illustre la variabilité de répartition des différents habitats thermiques sur les 12 km du Cusancin avec une gamme de température médiane allant de 12°C à 23,5°C. Le profil thermique montre globalement une élévation progressive de la température de l'amont vers l'aval avec la présence de plusieurs réchauffements et refroidissements (figures 9 et 10). On observe notamment, 1,5km avant la confluence avec le Doubs, un refroidissement important bien visible sur le profil provoqué par les apports d'eau froide de la résurgence de la Refroidière.

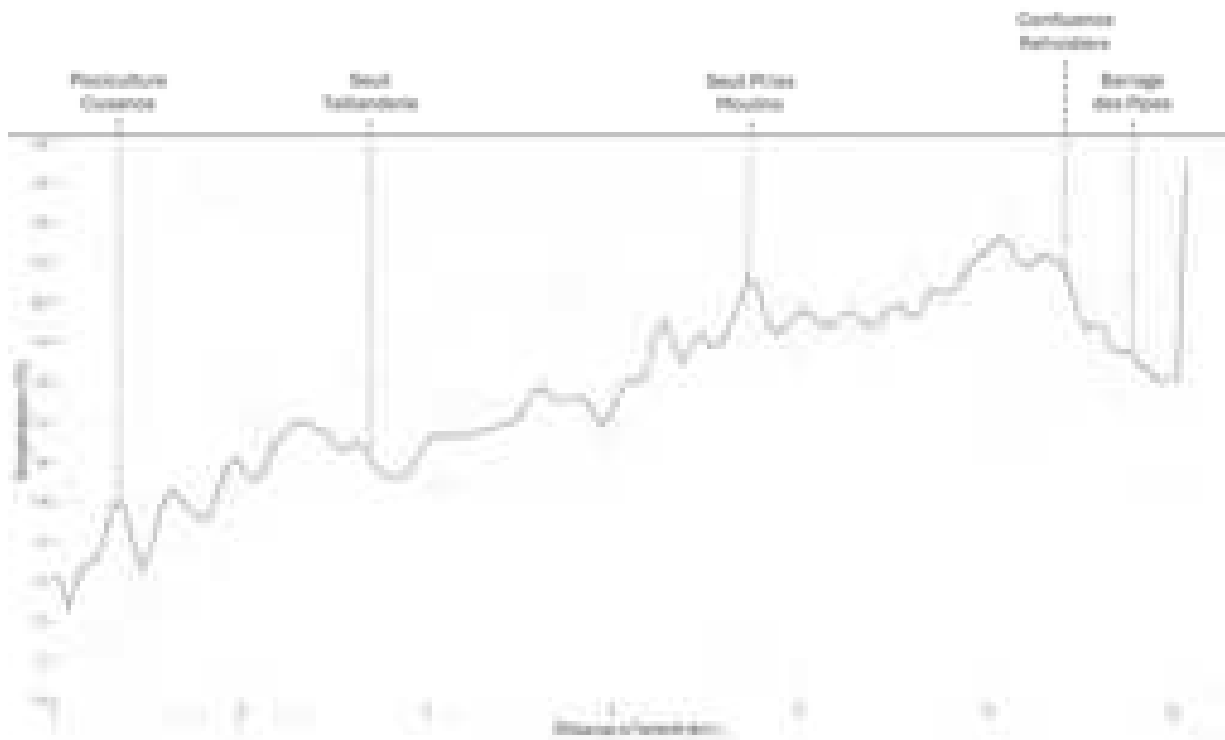


Figure 9 : Profil longitudinal de température issu de la campagne IRT-a.

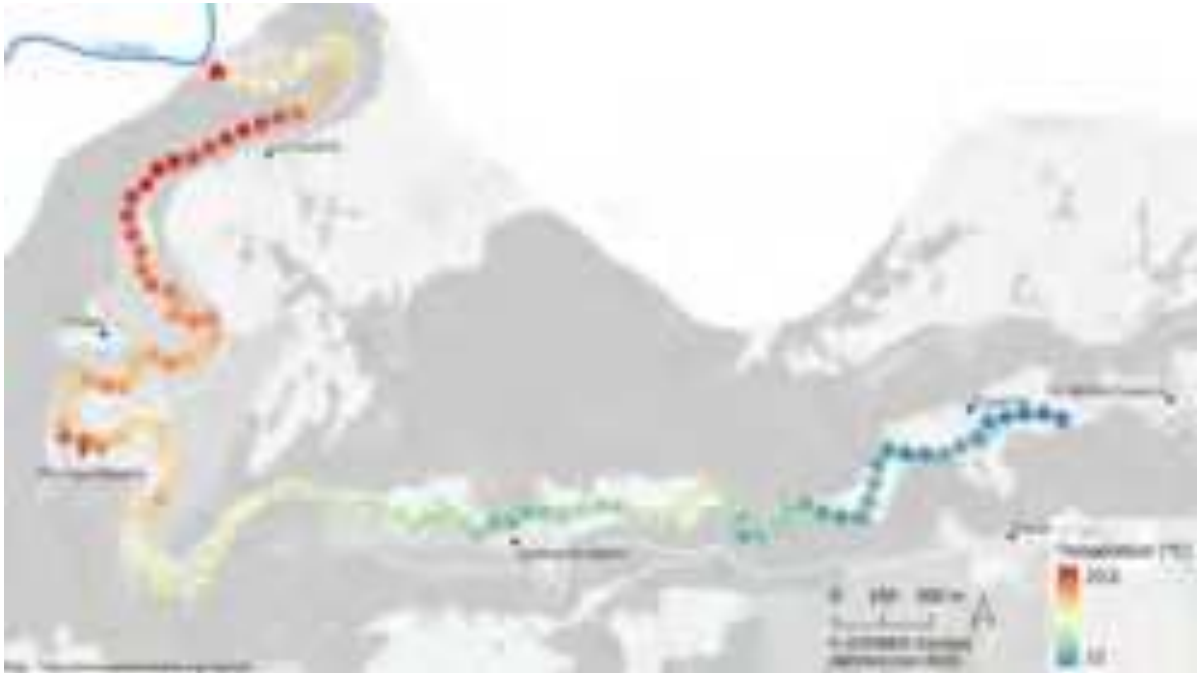


Figure 10 : Carte des températures médianes par tronçon de 100 mètres de rivière obtenues sur le Cusancin à partir des données IRT-a.

2.3 Détection des anomalies thermiques chaudes

2.3.1 Caractéristiques et distribution sur le linéaire

Sept zones de réchauffement ayant un effet significatif sur le profil thermique de la rivière ont été recensées (figure 11 et 12). Certains seuils provoquent des anomalies thermiques avec des augmentations brutales et importantes de la température qui peuvent se prolonger sur des linéaires variables selon l'importance des remous thermiques formés par les retenues (figure 11 et 12).

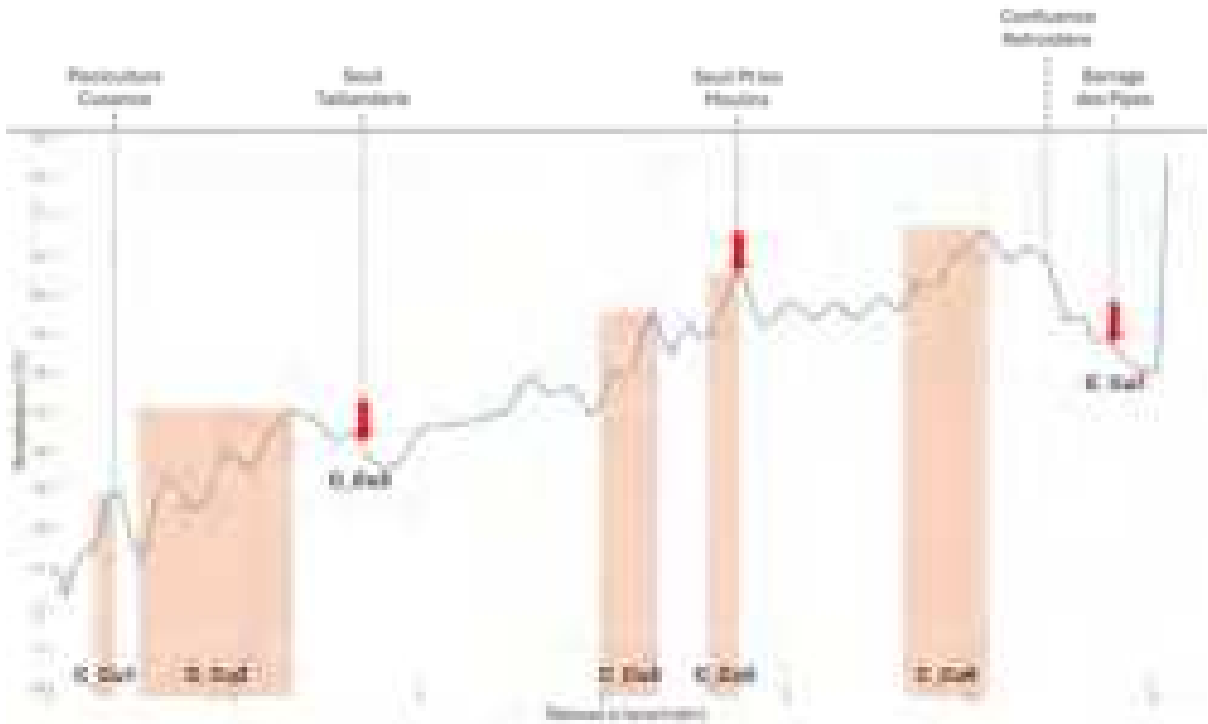


Figure 11 : Localisation sur le profil thermique des sept zones de réchauffement et des principaux seuils impactant la température de l'eau du Cusancin.



Figure 12 : Localisation sur le profil thermique des sept zones de réchauffement recensées sur le Cusancin.

2.3.2 Cartographies des mosaïques thermiques



Figure 13 : Mosaïque thermique et orthophoto illustrant le réchauffement observé au niveau de la pisciculture de Cusance (zone C_Cu1).



Figure 14 : Mosaïque thermique et orthophoto illustrant des exemples de réchauffements observés en bordure le long du linéaire de la zone C_Cu2.



Figure 15 : Mosaïque thermique et orthophoto illustrant le réchauffement observé au niveau du seuil de la Taillanderie permettant de caractériser l'emprise du remous thermique formé par la retenue (zone C_Cu3).



Figure 16 : Mosaïque thermique et orthophoto illustrant le réchauffement observé sur un linéaire présentant une succession de seuil et une absence de ripisylve (zone C_Cu4).



Figure 17 : Mosaïque thermique et orthophoto illustrant le réchauffement observé au niveau du seuil de Pont-les-Moulins permettant de caractériser l’emprise du remous thermique formé par la retenue (zone C_Cu5).



Figure 18 : Mosaïque thermique et orthophoto illustrant la confluence du Sesserant qui participe au réchauffement global du Cusancin sur ce secteur (zone C_Cu6).



Figure 19 : Mosaïque thermique et orthophoto illustrant des exemples de réchauffements observés en bordure le long du linéaire de la zone C_Cu6.



Figure 20 : Mosaïque thermique et orthophoto illustrant le réchauffement observé au niveau du seuil des Pipes qui est contenu grâce à la résurgence de la Refroidière (zone C_Cu7).

2.4 Détection des poches froides

2.4.1 Caractéristiques et distribution sur le linéaire

Pour rappel, une arrivée d'eau est considérée comme plus froide lorsque sa surface est au moins égale à $0,5\text{m}^2$ et que sa température médiane est inférieure à au moins $0,63^\circ\text{C}$ par rapport à la température médiane du tronçon de la rivière.

Un total de 123 poches froides a été recensé le long du Cusancin. Leur surface varie de $0,48^1$ à 374m^2 , pour des écarts de température médiane avec la rivière pouvant atteindre $-2,8^\circ\text{C}$ (figure 21).

Les poches froides ne sont pas réparties régulièrement le long de la rivière. Le nombre de poches froides et les écarts de température avec la rivière montrent des variations le long du linéaire (avec des concentrations d'apports d'eau souterraine sur certains secteurs et des absences totale d'échanges avec la nappe sur d'autres linéaires (figures 21 et 22).

Entre Cusance et Guillon-les-Bains, les poches froides sont plutôt denses et régulièrement réparties sur le linéaire. Puis jusqu'à l'amont de Pont-les-Moulins, sur environ 2km, les poches froides sont quasi-absentes. On retrouve de nombreuses poches froides au niveau de Pont-les-Moulins sur environ 1,5km puis de nouveau une absence sur 3km jusque La Lavaine, où apparaissent des échanges nappe/ri vière et les apports karstiques de la Refroidière (figure 22).

¹ Note : ceci correspond au seuil minimal de taille défini dans la méthode.

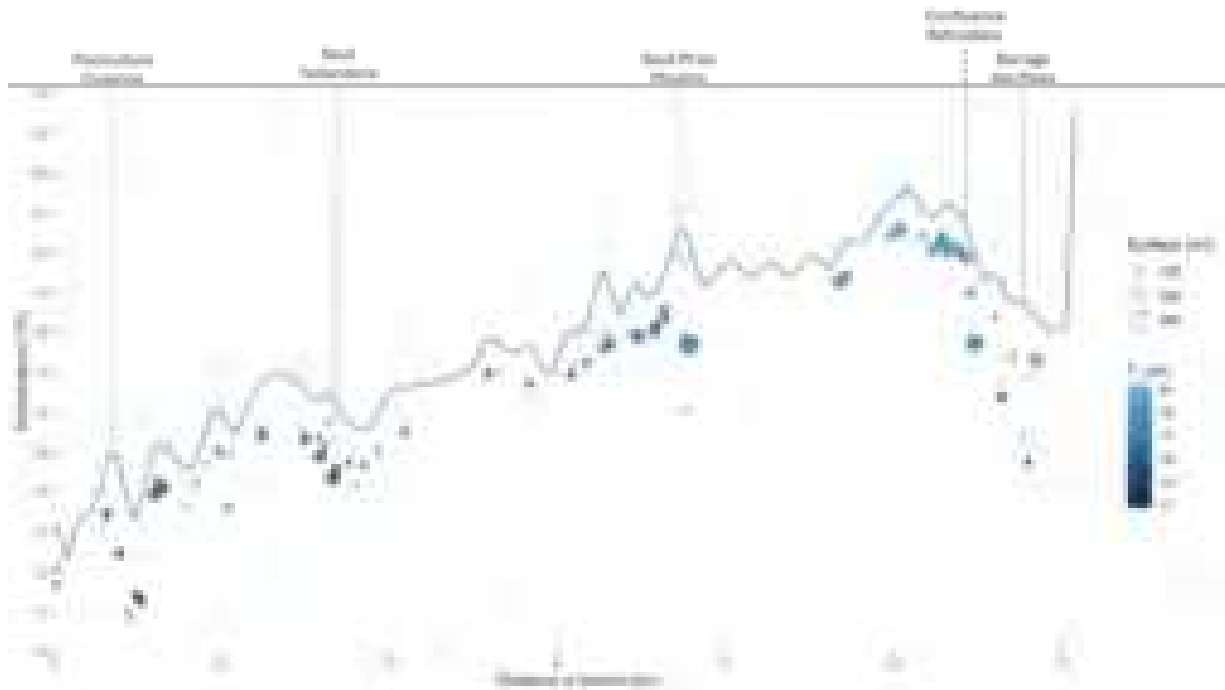


Figure 21 : Distribution des poches froides recensées sur le linéaire du Cusancin. La taille des cercles reflète la superficie visible sur les images des poches froides, et leur positionnement sur l'axe-y représente leur température médiane.



Figure 22 : Répartition des poches froides sur le linéaire du Cusancin en fonction de leur taille (superficie en m²) et de la différence de température médiane avec la rivière.

De nombreuses poches froides (30%) ont des superficies faibles, entre 0,5 et 5m². Cependant, on dénombre de nombreuses de poches froides (30% également) ayant des superficies entre 10 et 50m². Aussi, 67 poches froides (54%) présentent une taille supérieure à 10m² (figure 23).

Le différentiel thermique entre les poches froides et la rivière est globalement faible, moins de 3°C. Ainsi, 93 % des poches froides montre un différentiel inférieur ou égal à -1°C (figure 23).

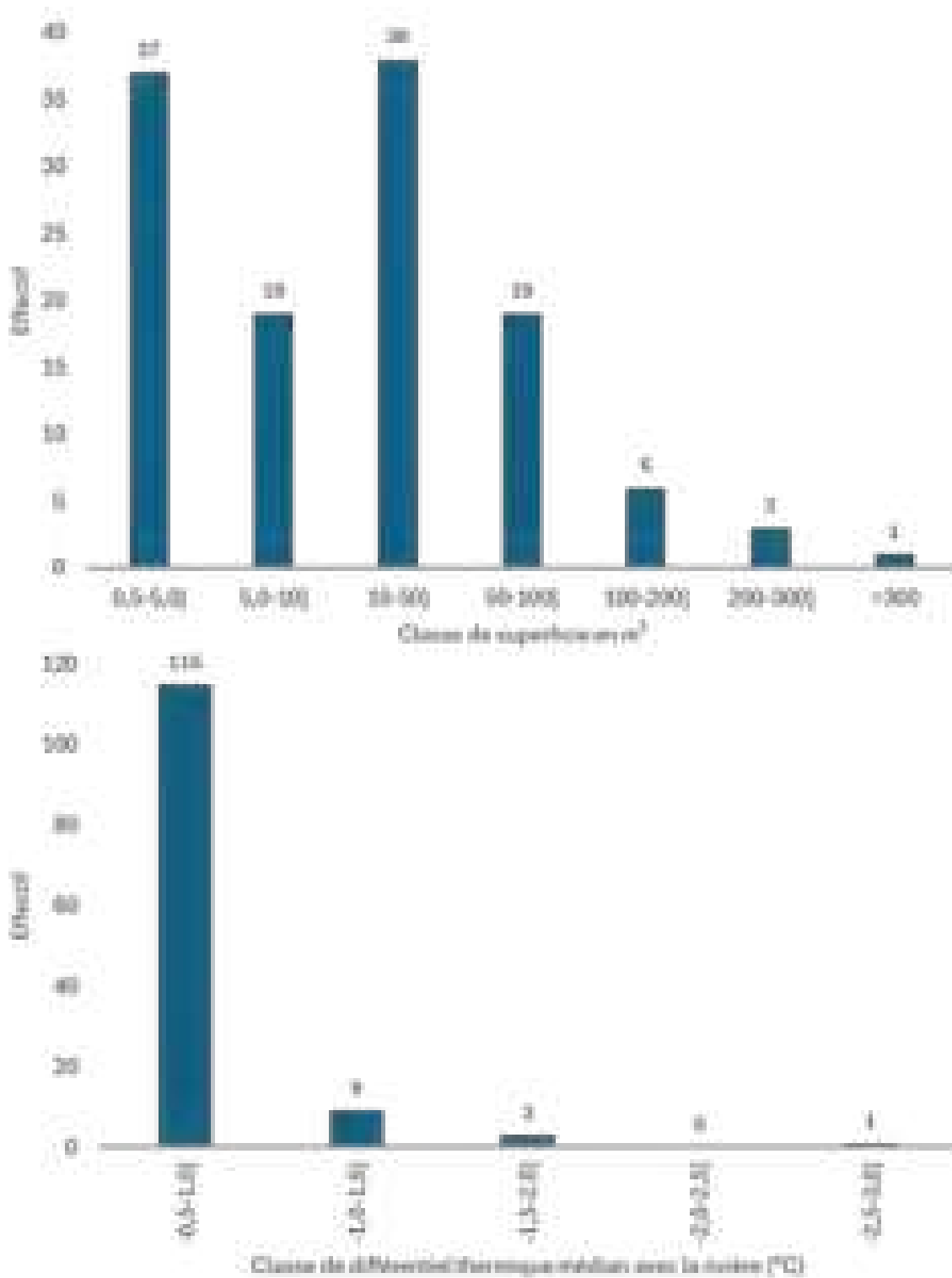


Figure 23 : Distribution des poches froides en fonction de leur taille (superficie en m²) et de leur différentiel thermique avec la température médiane de la rivière.

Les poches froides les plus étendues, plus de 100m², présentent des différentiels de température faible autour de -1°C. Les poches froides qui présentent les différentiels les plus élevés sont de faibles superficies (figure 24).

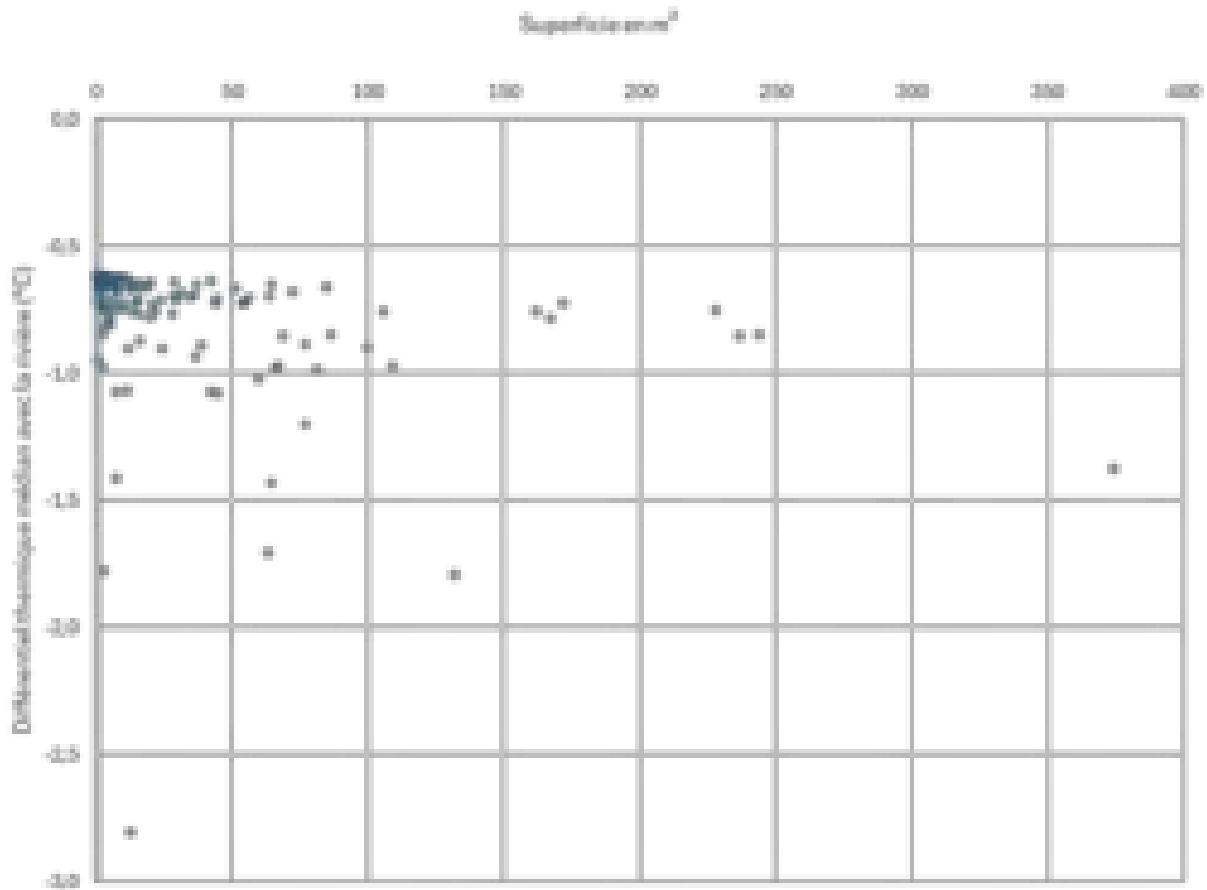


Figure 24 : Répartition des poches froides en fonction de leur différentiel thermique avec la température médiane de la rivière et de leur superficie en m².

La confrontation entre les poches recensées par IRT-a et les traçages karstiques connus permettent de bien identifier les origines de certains apports d'eau essentiels au Cusancin (figure 25). On retrouve les résurgences karstiques au niveau de Val de Cusance qui donnent naissance au Cusancin (l'Anse et la Cuse), la source de Fonteny au niveau de Guillon-les-Bains, la Source du Bois de Buchelion, la résurgence qui forme la Glaie Noire qui rejoint le Cusancin à Pont-les-Moulins et enfin la Refroidière plus en aval.

Cependant, ce travail permet également d'identifier de nombreuses poches dont l'origine probablement karstique n'est pas encore connue.

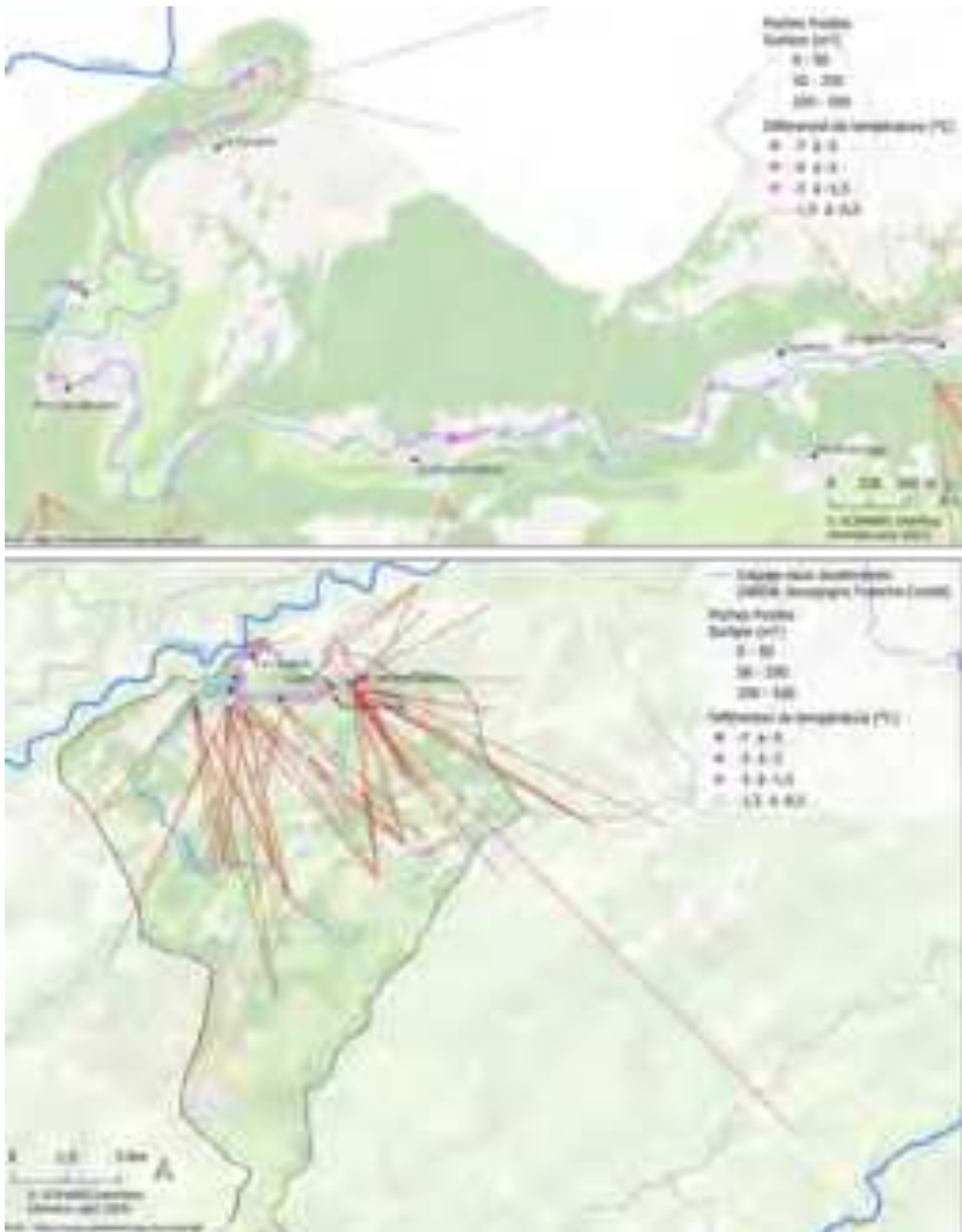


Figure 25 : Répartition des poches froides et localisation des traçages karstiques connus sur le bassin du Cusancin (données DREAL Bourgogne Franche-Comté). Vue de l'ensemble du bassin en bas et zoom sur le linéaire du Cusancin en haut.

2.4.2 Les zones de refroidissements majeurs

Même si chacune des poches froides identifiées est importante et que c'est bien l'ensemble de ces poches qui collectivement joue un rôle de catalyseur thermique permettant de réduire la température de l'eau ou de la stabiliser, certaines zones présentent des apports majeurs qui influencent le profil

thermique longitudinal de la rivière peuvent être identifiées. Ainsi, 4 zones d'apports majeurs d'eau froide ont été recensées (figures 26 et 27).

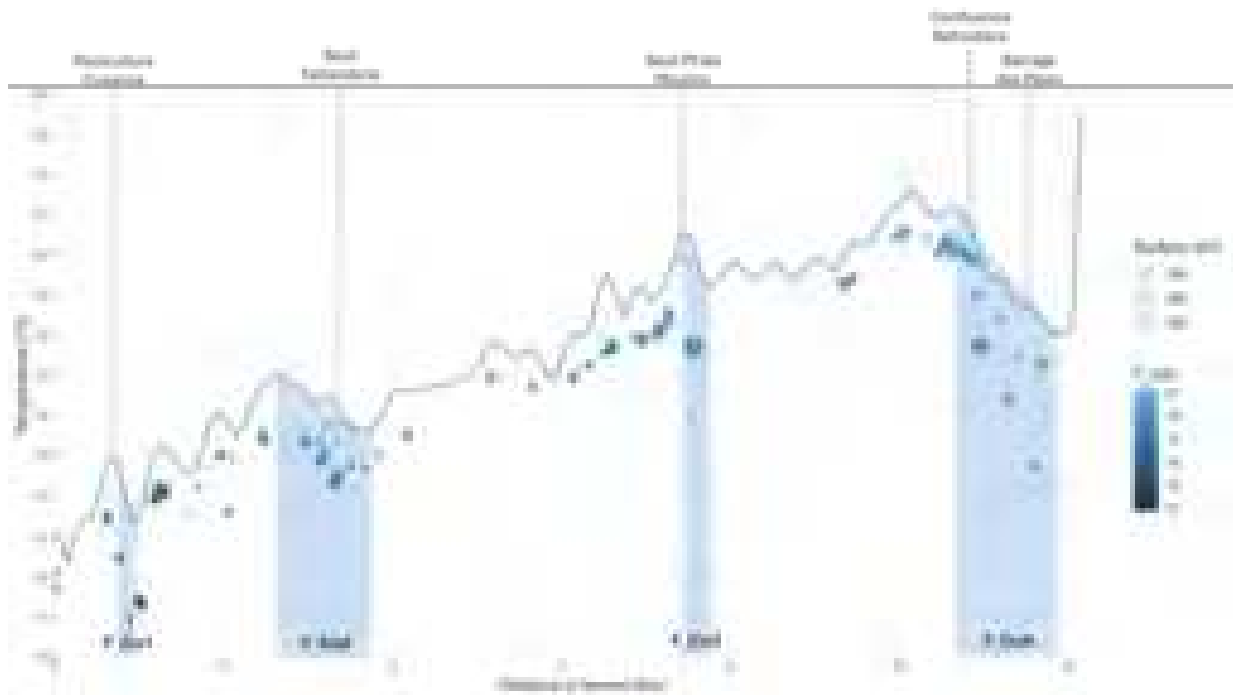


Figure 26 : Localisation sur le profil thermique des quatre principales zones de refroidissement recensées sur le Cusancin.

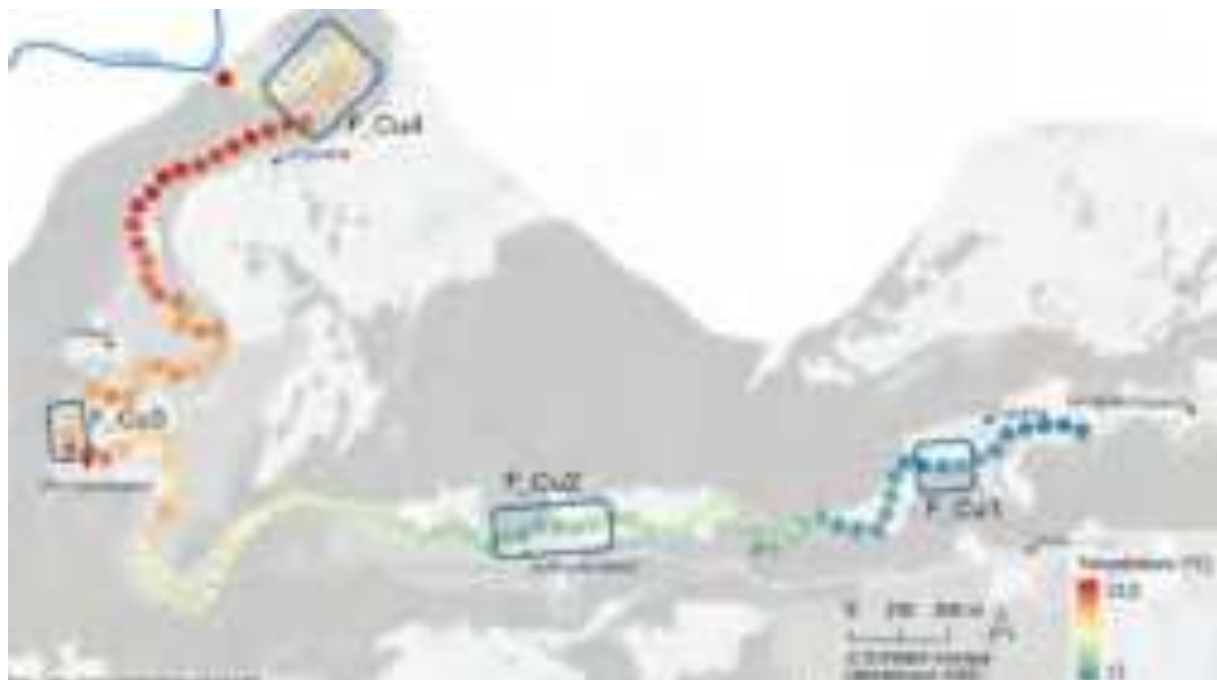


Figure 27 : Localisation sur le profil thermique des quatre principales zones de refroidissement recensées sur le Cusancin.



Figure 28 : Mosaïque thermique illustrant le refroidissement observé grâce aux nombreux apports karstiques recensés en aval de la pisciculture de Cusance (zone F_Cu1).



Figure 29 : Mosaïque thermique et orthophoto illustrant le refroidissement observé en aval immédiat du seuil de la Taillanderie (zone F_Cu2).



Figure 30 : Mosaïque thermique et orthophoto illustrant les apports hyporhéiques à l'aval immédiat du seuil de Pont-les-Moulins et la confluence de la résurgence de la Glaie Noire (zone F_Cu3).



Figure 31 : Mosaïque thermique illustrant le refroidissement généré par les nombreux apports hyporhéiques et la confluence de la Refroidière (zone F_Cu4).

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

Pour interpréter les conditions d'habitat thermique sur la Bienne vis-à-vis des salmonidés, les données spatiales obtenues par IRT-a ainsi que les données temporelles collectées par la sonde thermique de la FDPMA 25 au cours de l'été 2023 ont été confrontées aux exigences écologiques de la truite commune.

Au niveau spatial, le profil thermique obtenu par IRT-a le 23 août 2023 montre que 40% du linéaire reste dans l'optimum thermique des salmonidés ($\leq 17^{\circ}\text{C}$) et que la majorité du linéaire se situe en

dessous de 19°C, seuil thermique à partir duquel les températures commencent à occasionner des dysfonctionnements physiologiques (figure 32, tableau 2).

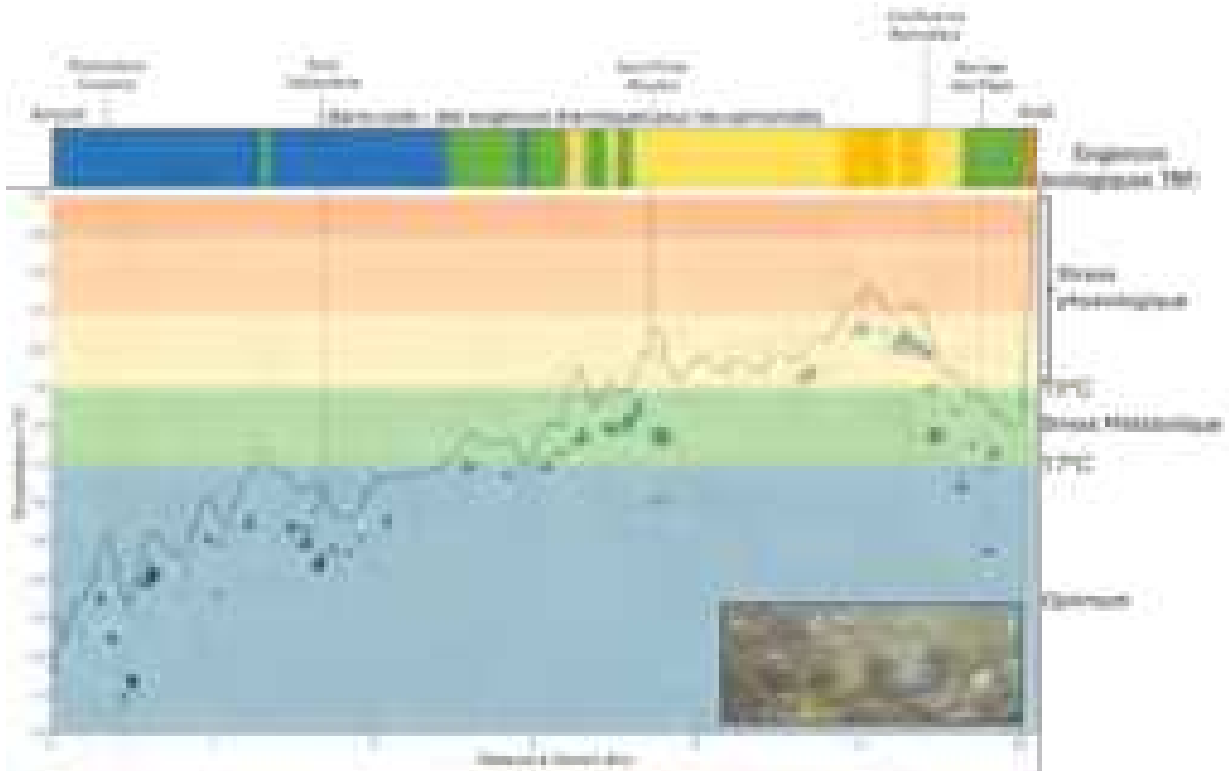


Figure 32 : Confrontation du profil thermique obtenu par IRT-a aux exigences thermiques de la truite commune et retranscription en code barre des exigences le long du linéaire du Cusancin.

≤17°C	Optimum	40,2%	
17-19°C	Stress métabolique	23,0%	
19-21°C	Stress physiologique	28,7%	36,9%
21-23°C		7,4%	
23-25°C		0,8%	
>25°C	Létal	0,0%	

Tableau 2 : Pourcentages du linéaire du Cusancin correspondant aux différentes exigences thermiques de la truite commune calculés à partir des températures médianes par tronçon de 100m.

Les conditions thermiques restent en dessous de 17°C sur les cinq premiers kilomètres en amont du cours d'eau puis fluctuent entre 17°C et 19°C jusqu'au environ de Pont-les-Moulins. A partir de là, les températures d'eau se situent dans des conditions de stress physiologique, entre 19 et 23°C, jusqu'aux résurgences de la Refroidière. Sa confluence avec le Doubs est fortement modifiée par le barrage de Baume les Dames qui provoque un remous thermique remontant le Cusancin sur environ 150 mètres.



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

Pour intégrer une dimension temporelle, les variations des conditions thermiques au cours de l'été 2023 de juin à septembre ont été analysées à partir des données horaires de la sonde thermique disponible (CUSA 07). Celle-ci se situe entre Pont-les-Moulins et la confluence du Sesseraint sur le linéaire présentant des températures médianes entre 19 et 21°C au moment du survol IRT-a (figure 33).

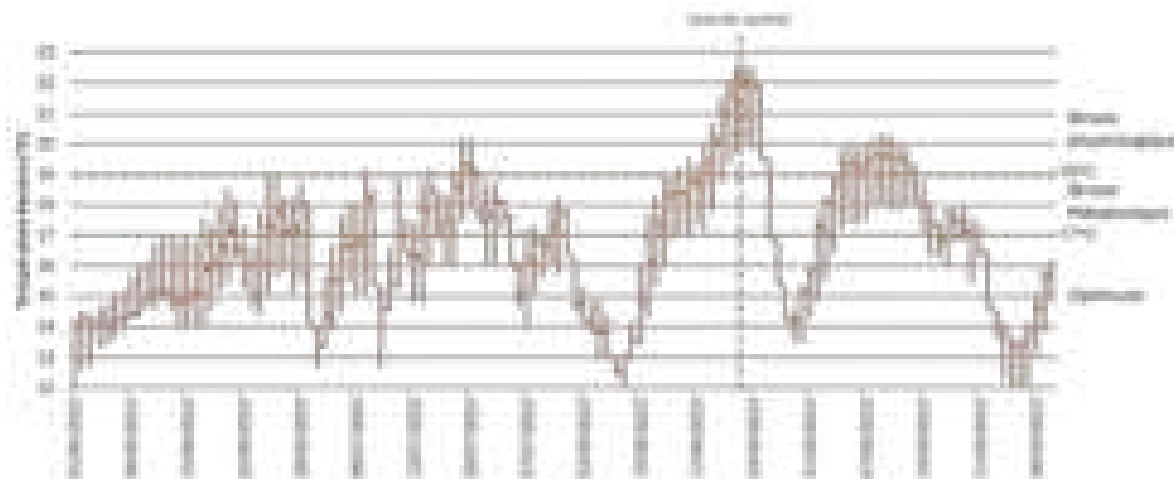


Figure 34 : Variations horaires des températures d'eau de la sonde thermique du Cusancin du 01 juin au 30 septembre 2023.

Le jour du survol, les données de la sonde montrent des valeurs comprises entre 20 et 22°C, conformément aux données IRT-a sur le secteur. Ces valeurs correspondent au pic de température observé pendant plusieurs jours du 20 au 27 août 2023 (figure 34). Il s'agit de la période la plus critique de l'été 2023 pour les salmonidés puisque les températures sont restées au-dessus de 19°C pendant 133 heures consécutives soit plus de 5 jours (figure 35). Le reste de l'été, les températures ont été nettement moins élevées permettant de rester dans des conditions acceptables entre 17 et 19°C ou même optimales, en dessous de 17°C, pour les salmonidés. Au cours des autres pics, en juillet et

septembre, les températures critiques étaient franchies quelques heures chaque jour mais redescendaient en dessous des seuils de stress au cours de la journée.

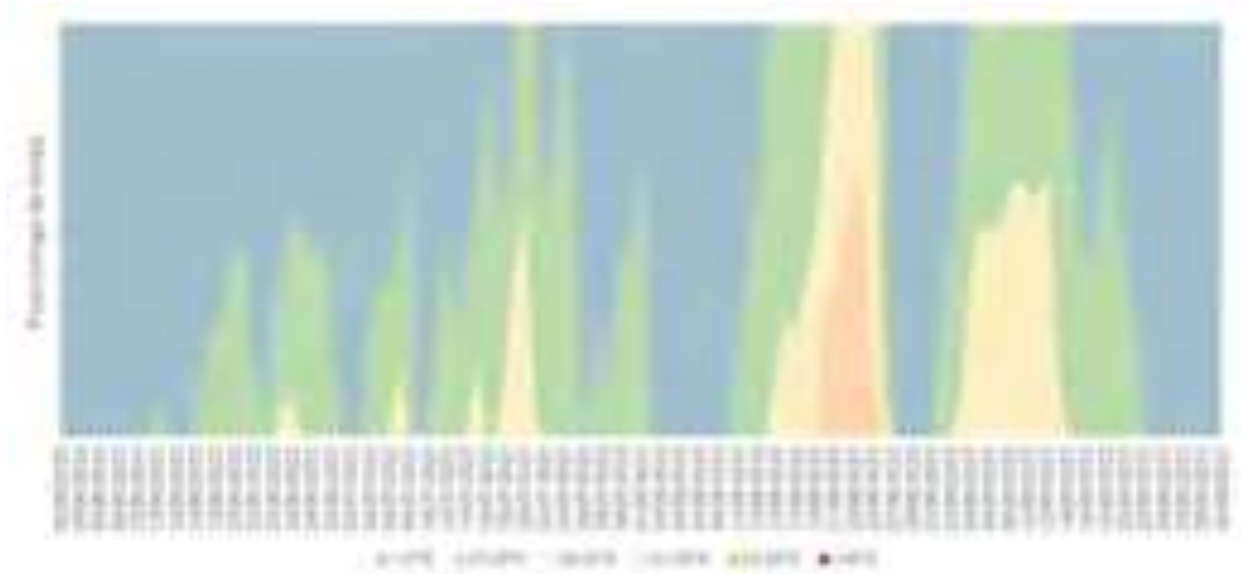


Figure 35 : pourcentage de temps (calculé à partir des données horaires) des différentes plages d'exigence thermique définies pour les salmonidés pour chaque jour entre le 01 juin et le 30 septembre 2023 observée au niveau de la sonde thermique du Cusancin.

2.6 Refuges thermiques et refuges climatiques potentiels pour les salmonidés

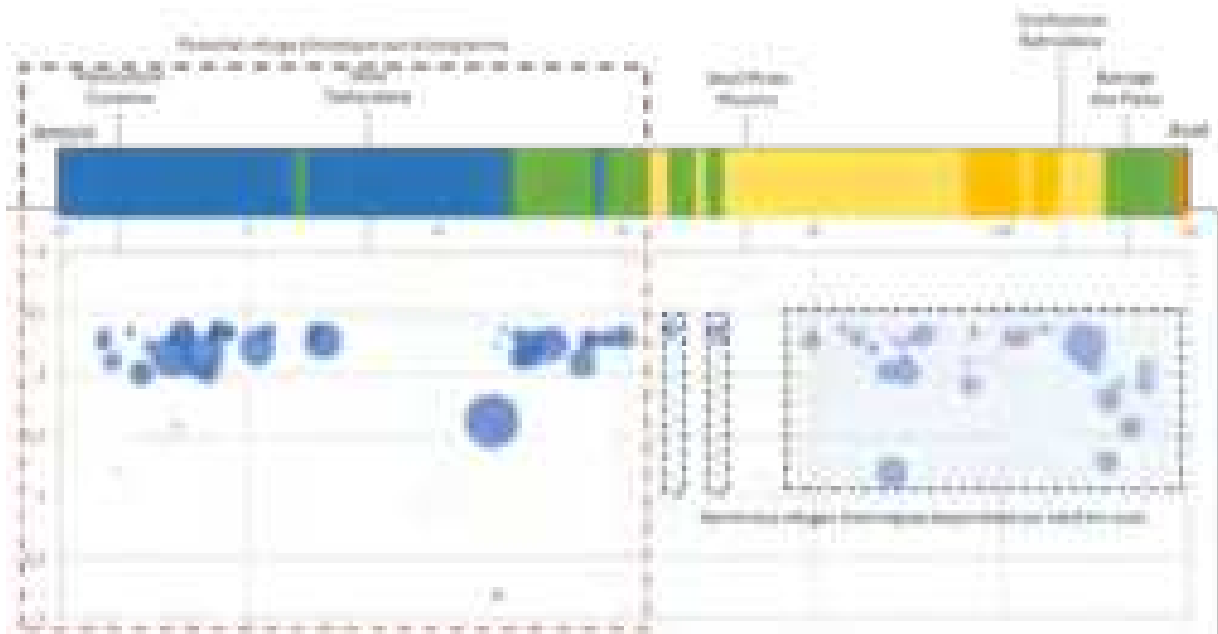


Figure 36 : Répartition le long du linéaire des poches froides présentant un intérêt potentiel comme refuges thermiques en lien avec les conditions thermiques observées vis-à-vis des exigences de la truite (voir figure 33 pour légende).

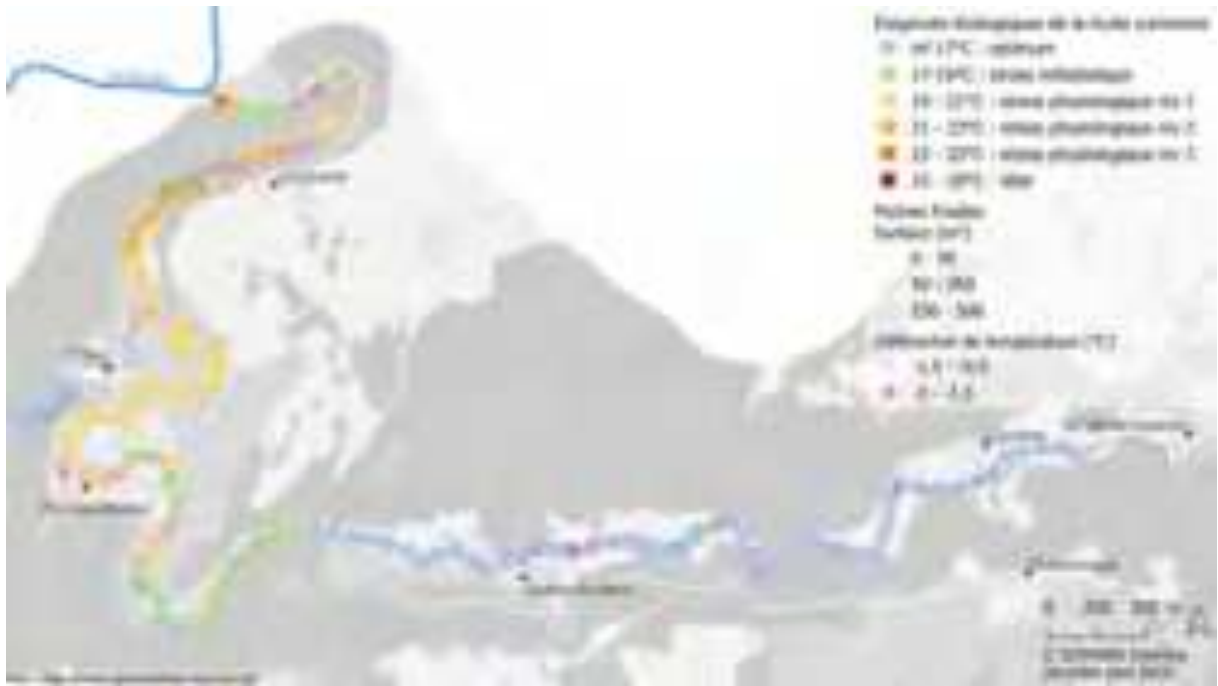


Figure 37 : Répartition et caractéristiques des poches froides sur le linéaire des conditions thermiques vis-vis des salmonidés.



Figure 38 : Mosaïque thermique des exigences écologiques des salmonidés et orthophoto montrant des exemples de poches froides qui améliorent les conditions thermiques vis-à-vis des salmonidés et qui constituent des refuges thermiques potentiels.

3. RÉSULTATS DE LA CARTOGRAPHIE THERMIQUE PAR IRT-A SUR LE DESSOUBRE

Au total, 1281 photographies ont été acquises et alignées pour générer une orthophoto recouvrant environ 10.8km² pour une résolution au sol de 6.3 cm/pixel. De la même manière, 1142 images thermiques ont été prises et alignées pour créer une mosaïque thermique de la même superficie, pour une résolution d'image au sol de 30.7cm/pixel.

Il est important de garder en mémoire pour l'interprétation des résultats que la technologie IRT-a fournit une information de température de surface, et ne cartographie que ce qui est visible depuis les airs.

3.1 Diversité thermique de la rivière le jour du survol

L'histogramme des valeurs de température de l'ensemble des pixels en eau obtenu le jour du survol constitue une première approche dans l'analyse des résultats issus de la cartographie thermique (figure 8). L'histogramme montre :

- Une température médiane de la surface autour de 25°C qui peut être considérée comme très élevée pour un cours d'eau salmonicole.
- Un pic de répartition des pixels autour de 25,7°C.
- La totalité des pixels montre des températures qui dépassent le *preferendum* des salmonidés, avec près de 95% de la surface au-dessus de 19°C, seuil de stress physiologique pour les salmonidés et 50% de la surface en eau dépasse le seuil léthal de 25°C.

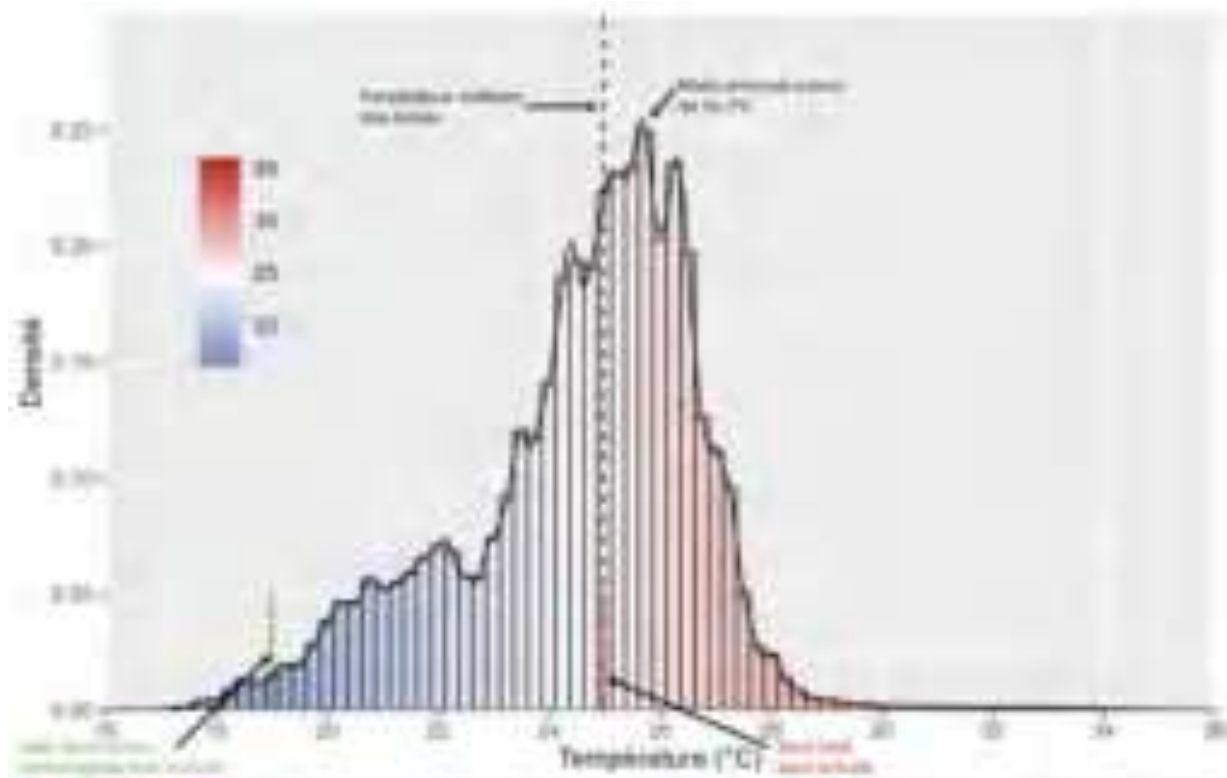


Figure 39 : Histogramme de distribution des pixels de température sur le Cusancin issus de la campagne IRT-a d'août 2023. La température médiane observée le 21 juillet 2022 est de 19,5°C. Données sur les exigences thermiques de la truite issues de Crisp (1996), Elliott et Hurley (2001).

3.2 Profil longitudinal de température

La mosaïque thermique des premières résurgences qui donnent naissance au Dessoubre au niveau du cirque de Consolation-Maisonnette est présentée dans la figure 40.



Figure 40 : Mosaïque thermique des résurgences qui donnent naissance au Dessoubre au niveau du cirque de Consolation-Maisonnette.

Le profil longitudinal, obtenu à partir des températures médianes de surface tous les 100 mètres, montre des valeurs plutôt élevées dans une gamme allant de 18°C à plus de 27°C, température maximale obtenue au niveau de la retenue de Rosureux. Le gradient thermique amont aval est loin d'être linéaire, il montre une forte variabilité avec de nombreux réchauffements et refroidissements (figures 41 et 42).

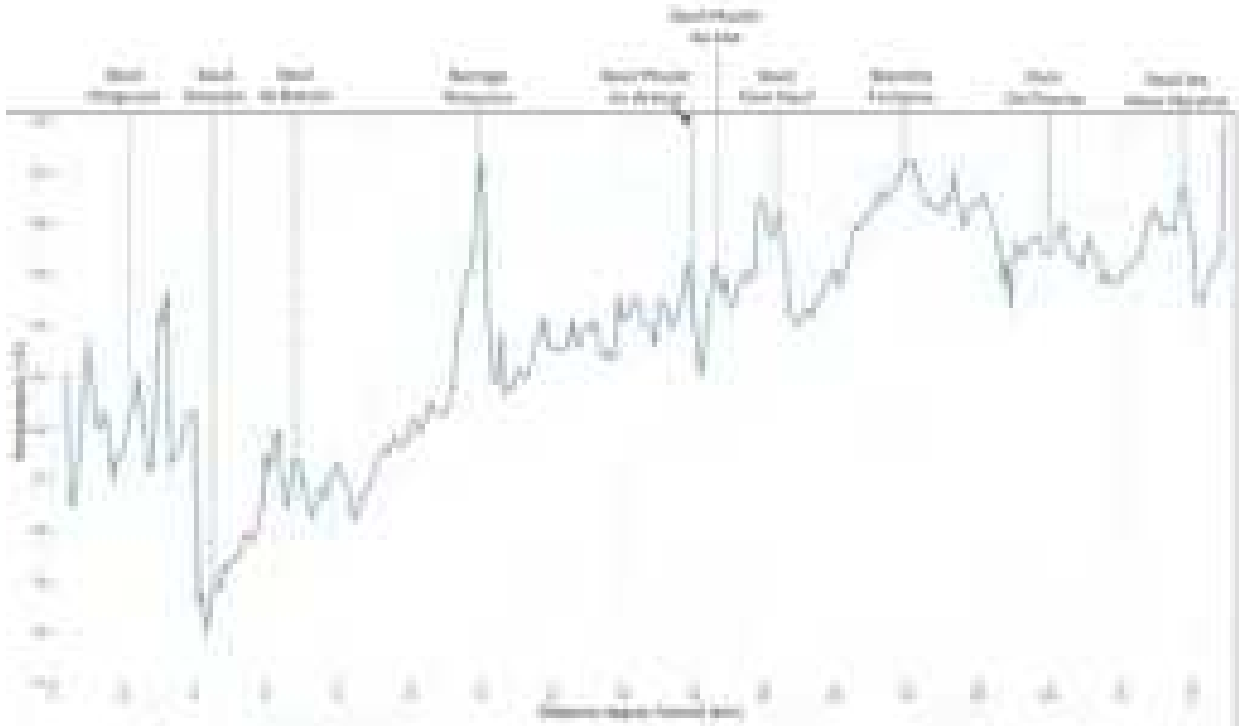


Figure 41 : Profil longitudinal de température issu de la campagne IRT-a.

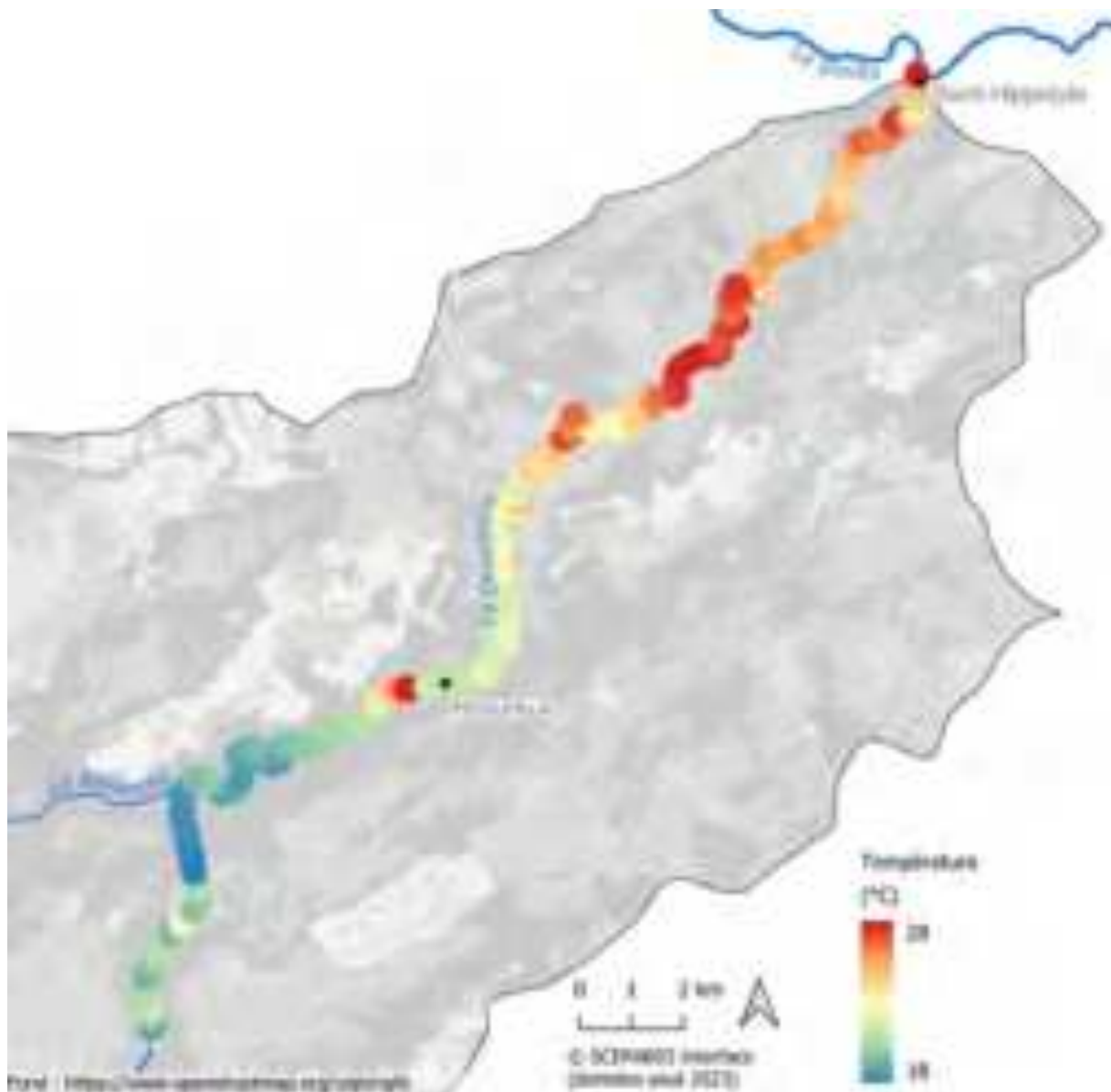


Figure 42 : Carte des températures médianes par tronçon de 100 mètres de rivière obtenues sur le Dessoubre à partir des données IRT-a.

A noter une particularité sur le Dessoubre qu'on n'a encore observé sur aucune autre rivière pour lesquelles nous disposons de données IRT-a : nous observons une différence nette entre les valeurs collectées par les sondes thermiques de la FDPPMA 25, qui mesurent les températures au fond de la rivière et les valeurs obtenues par IRT-a qui renseignent sur les températures de surface (figure 43).

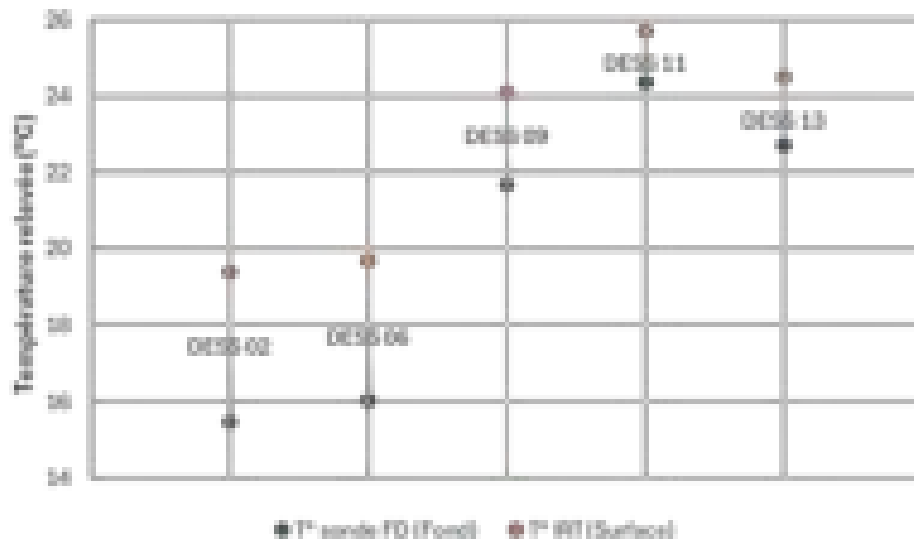


Figure 43 : Différences observées entre les températures du fond de la rivière obtenues à l'aide de sondes thermiques (données FDPPMA 25) et les températures de surface obtenues par IRT-a.

Cette différence qui représente un cas particulier pose question. Elle ne peut pas être le résultat d'une stratification thermique au sens limnologique, phénomène impossible sur un cours d'eau lotique comme le Dessoubre, qui présentent des profondeurs d'eau faibles, d'autant plus au moment de la campagne IRT-a qui a été réalisée à très faible débit.

En outre, on observe que les divergences de température fond/surface sont plus fortes sur les secteurs qui présentent des concentrations de poches froides comme sur la moitié amont du cours d'eau. Sur ces secteurs, les mosaïques thermiques du Dessoubre sont également très particulières, elles mettent en évidence, sur des linéaires importants, des différences de température de surface importantes, pouvant aller jusqu'à plusieurs degrés, entre le chenal central de la rivière, plus froid et les zones de bordure, nettement plus chaudes. Habituellement, les mosaïques thermiques des rivières montrent peu de diversité sur le plan transversal, sauf lorsque des arrivées d'eau froides sont observées, souvent en bordure.

Notre interprétation est que le Dessoubre, en plus des principales résurgences karstiques qui lui donnent naissance, bénéficie sur des linéaires importants de petits apports d'eaux souterraines réguliers voire continus ; une sorte d'échanges nappe/rivière permanent.

Ces données renseignent donc sur le fonctionnement hydro-géomorphologique particulier du Dessoubre et sur l'importance que représente les apports quasi-continus d'eaux souterraines pour l'hydrologique et le fonctionnement biologique de la rivière.

3.3 Détection des anomalies thermiques chaudes

3.3.1 Caractéristiques et distribution sur le linéaire

Onze zones principales de réchauffement ayant un effet significatif sur le profil thermique de la rivière ont été recensées (figure 44 et 45). Comme évoqué dans le paragraphe précédent, les apports quasi continus d'eau souterraine plus fraîche sur une grande partie du linéaire du Dessoubre semblent jouer un rôle déterminant dans le maintien de températures ambiantes encore favorables aux salmonidés. Les principales causes des élévations thermiques recensées sont les retenues d'eau créées par la présence de seuils ou barrages et l'absence sur certains linéaires d'apports d'eau souterraine qui se traduit immédiatement par une augmentation du profil thermique de la rivière (voir figure 61).

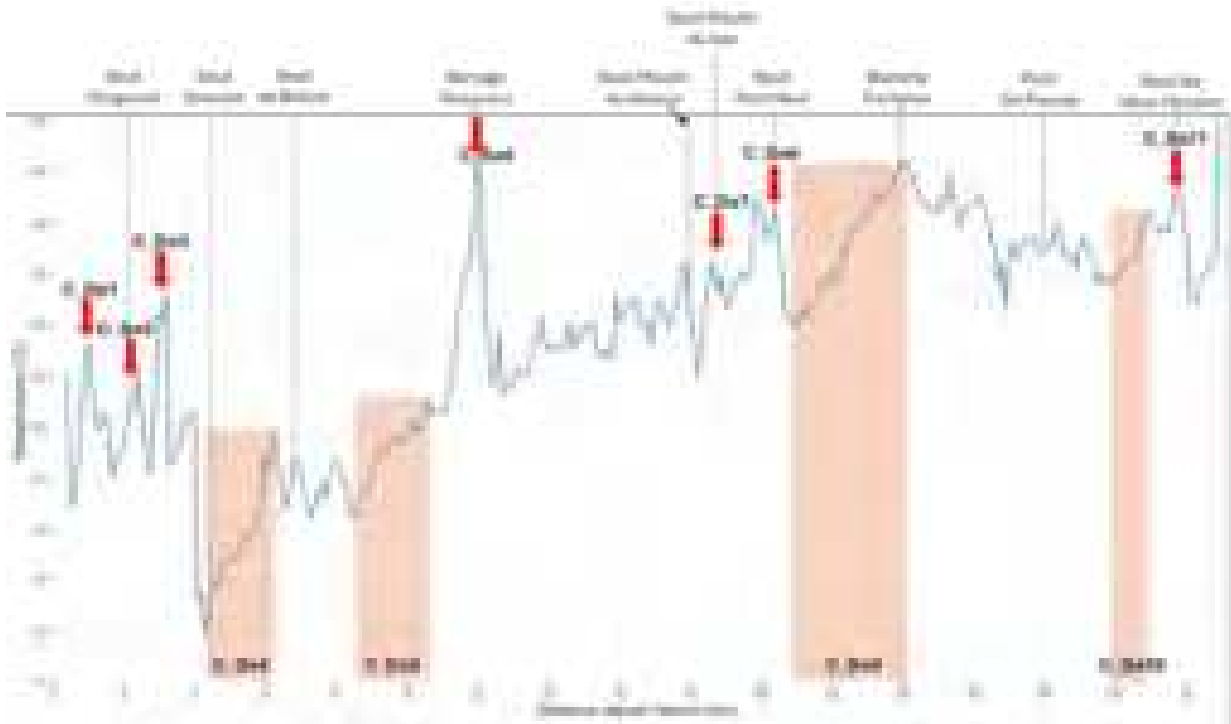


Figure 44 : Localisation sur le profil thermique des onze principales zones de réchauffement incluant les principaux seuils impactant la température de l'eau du Dessoubre.

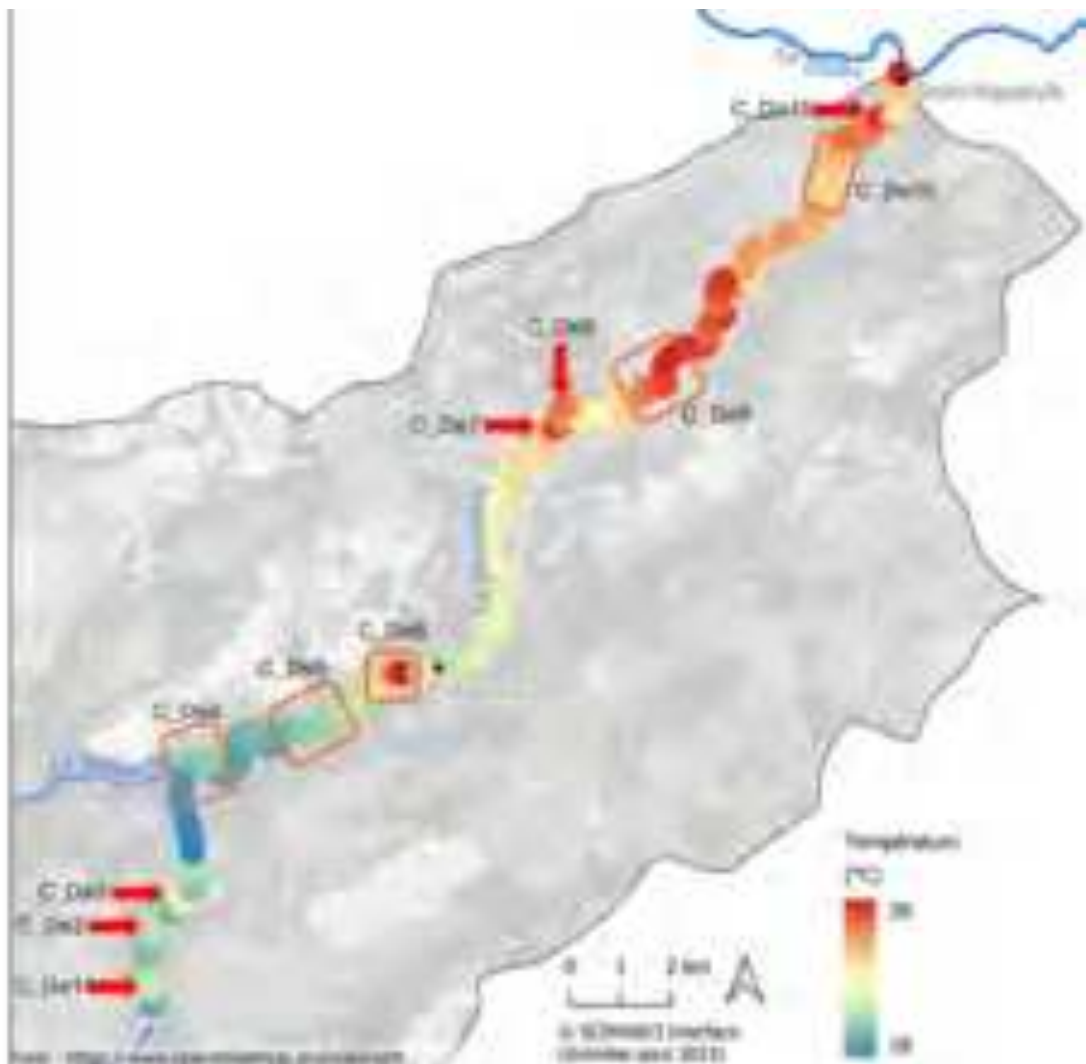


Figure 45 : Localisation sur le profil thermique des onze principales zones de réchauffement recensées sur le Dessoubre.

3.3.2 Cartographies des mosaïques thermiques



Figure 46 : Mosaïque thermique illustrant le premier réchauffement observé à l'amont du Dessoubre (zone C_De1).



Figure 47 : Mosaïque thermique illustrant le réchauffement observé au niveau d'une annexe latérale chaude et du seuil de l'Engoulot (zone C_De2).



Figure 48 : Mosaïque thermique et orthophoto de l'annexe hydraulique chaude (zoom 1 de la figure 47).



Figure 49 : Mosaïque thermique et orthophoto illustrant le réchauffement au niveau du seuil de l'Engoulot (zoom 2 de la figure 47).



Figure 50 : Mosaïque thermique et orthophoto illustrant le réchauffement observé au niveau du lieu-dit Les Berçots (zone C_De3).



Figure 51 : Mosaïque thermique de la zone de réchauffement C_De4 montrant l'absence de poches froides sur ce linéaire, des réchauffements latéraux et la confluence de la Réverotte.



Figure 52 : Mosaique thermique et orthophoto illustrant des réchauffements latéraux (zoom 1 de la figure 51).



Figure 53 : Mosaïque thermique et orthophoto illustrant le réchauffement observé à la confluence de la Réverotte (zoom 2 de la figure 51).



Figure 54 : Mosaïque thermique illustrant un linéaire avec une absence de poches froides entraînant un réchauffement progressif (zone C_De5).



Figure 55 : Mosaïque thermique illustrant le réchauffement observé en amont du barrage de Rosureux (zone C_De6).



Figure 56 : Mosaïque thermique illustrant le réchauffement observé en amont du seuil du moulin du bas partiellement compensé par la présence de poches froides (zone C_De7).



Figure 57 : Mosaïque thermique et orthophoto illustrant le réchauffement observé en amont du seuil de Pont Neuf (zone C_De8).



Figure 58 : Mosaïque thermique illustrant un linéaire avec une absence de poches froides entraînant un réchauffement progressif (zone C_De9).



Figure 59 : Mosaïque thermique illustrant un linéaire avec une absence de poches froides entraînant un réchauffement progressif (zone C_De10).



Figure 60 : Mosaïque thermique et orthophoto illustrant le réchauffement observé en amont du seuil des Vieux Moulins (zone C_De11).

3.4 Détection des poches froides

3.4.1 Caractéristiques et distribution sur le linéaire

Pour rappel, une arrivée d'eau est considérée comme plus froide lorsque sa surface est au moins égale à 0,5m² et que sa température médiane est inférieure à au moins 0,63°C par rapport à la température médiane du tronçon de la rivière.

Un total de 369 poches froides a été recensé le long du Dessoubre. Leur surface varie de 0,48² à 1500 m², pour des écarts de température médiane avec la rivière pouvant atteindre -6,6°C (figure 61).

Hormis 4 tronçons qui montrent une absence de poches froides, les arrivées d'eaux souterraines montrent une répartition plutôt régulière le long de la rivière (figures 61 et 62). On observe tout de même quelques concentrations de poches froides à certains endroits.

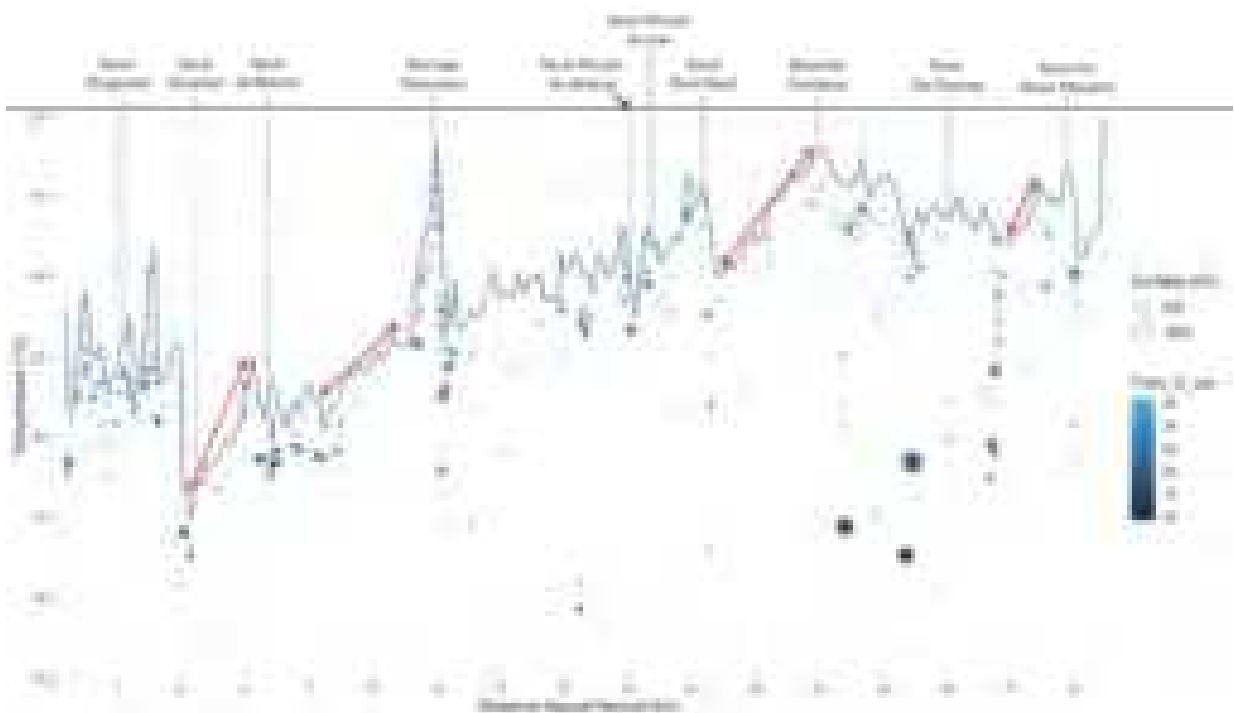


Figure 61 : Distribution des poches froides recensées sur le linéaire du Dessoubre. La taille des cercles reflète la superficie visible sur les images des poches froides, et leur positionnement sur l'axe-y représente leur température médiane. Les flèches rouges encadrent les linéaires montrant une absence d'arrivée d'eaux souterraines.

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

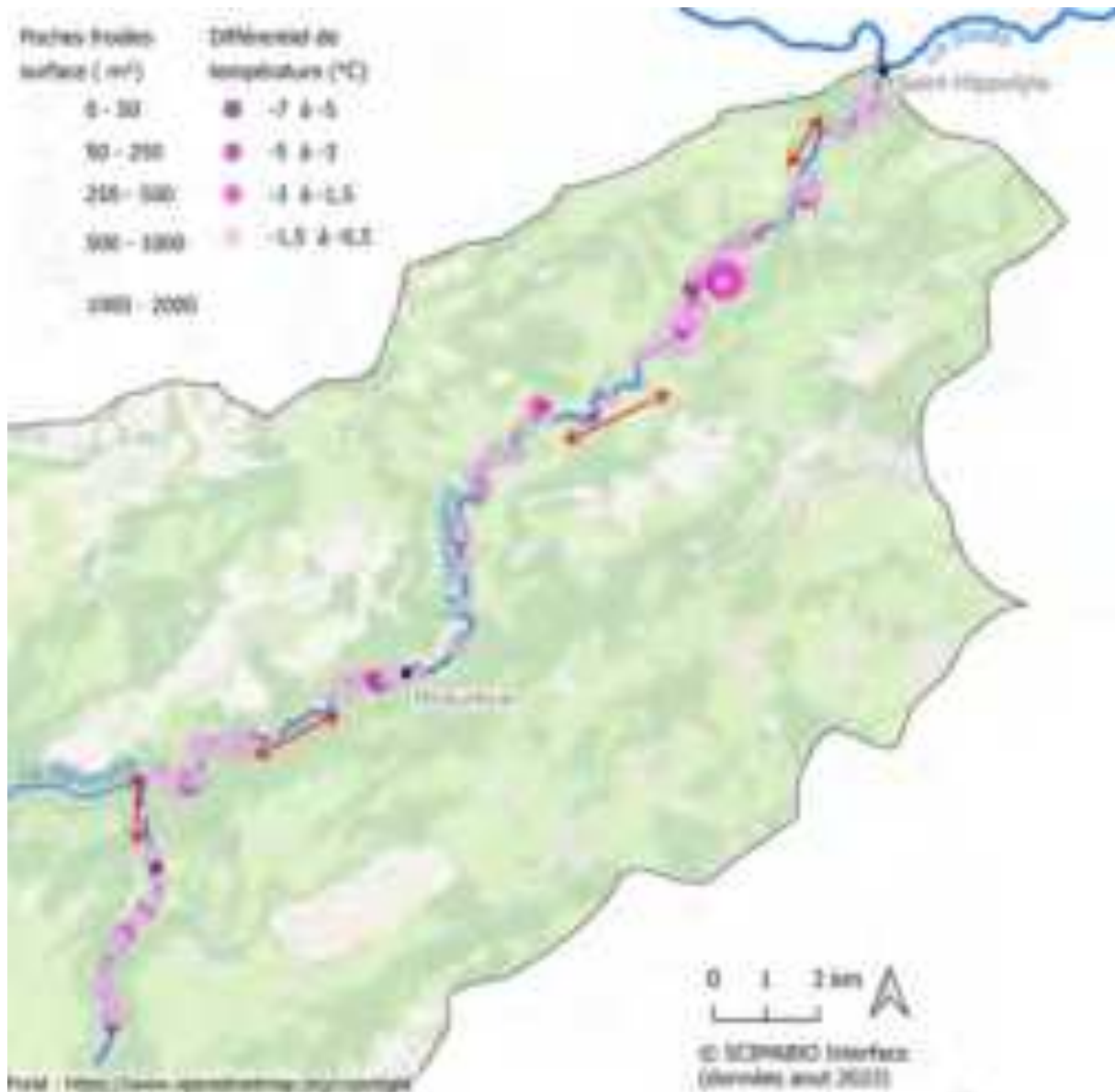


Figure 62 : Répartition des poches froides sur le linéaire du Dessoubre en fonction de leur taille (surface en m²) et de la différence de température médiane avec la rivière. Les flèches rouges encadrent les linéaires montrant une absence d'arrivée d'eaux souterraines.

232 poches froides soit 45% présentent des surfaces faibles, entre 0,5 et 5m². Cependant, la gamme de surface 10-50m² est bien représentée avec 97 poches froides soit 26% et le nombre de poches froides de grandes surfaces, supérieure à 200m², reste intéressant (n=14) (figure 63).

La majorité des poches froides montre un différentiel thermique faible avec la rivière, puisque 63% présente un différentiel inférieur ou égal à -1°C (figure 63).

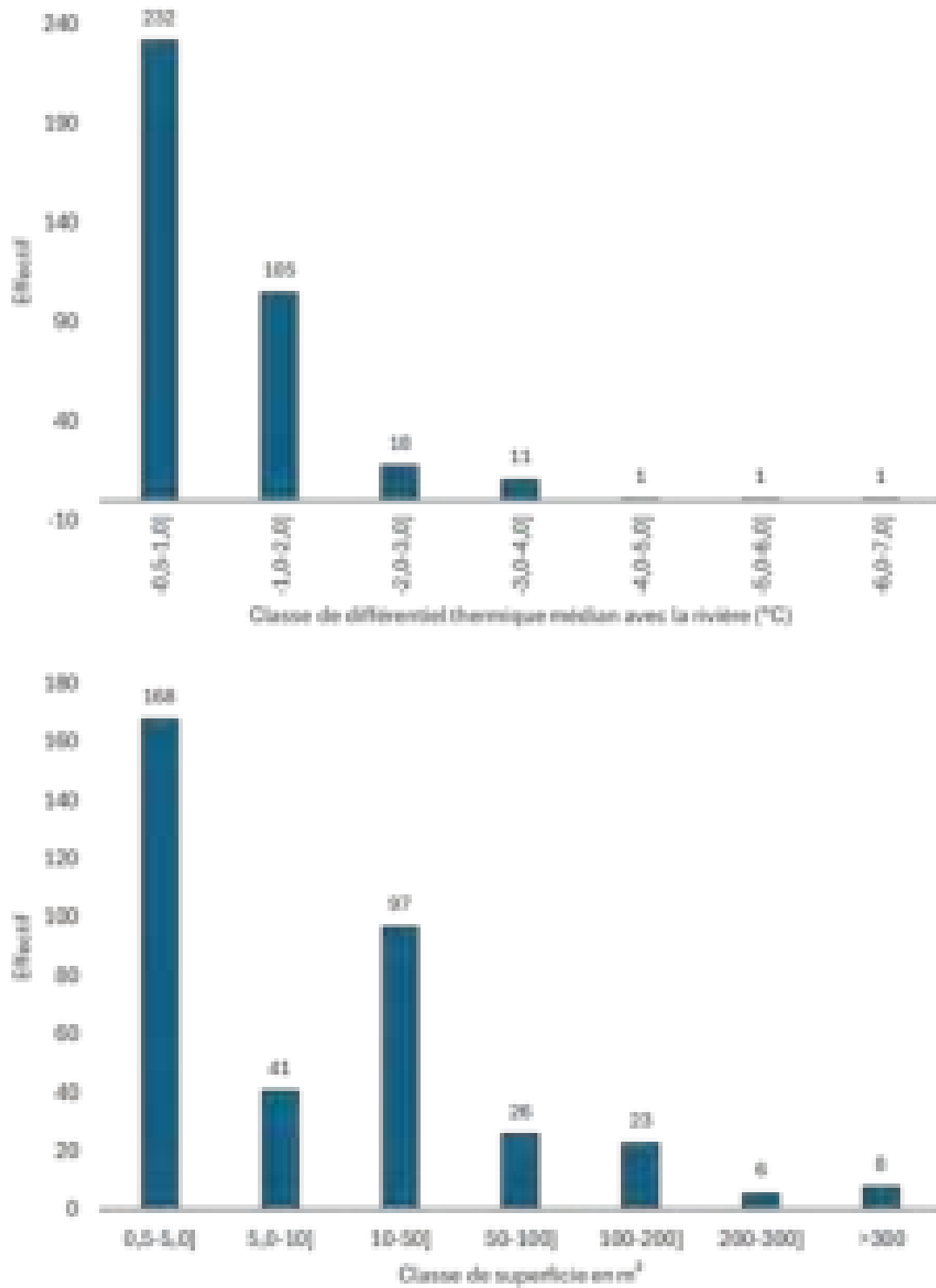


Figure 63 : Distribution des poches froides en fonction de leur taille (superficie en m²) et de leur différentiel thermique avec la température médiane de la rivière.

Les poches froides les plus étendues présentent des différentiels de température faible autour de -1°C à -2°C. Les poches froides qui présentent les différentiels les plus élevés sont majoritairement de faibles superficies (figure 64).

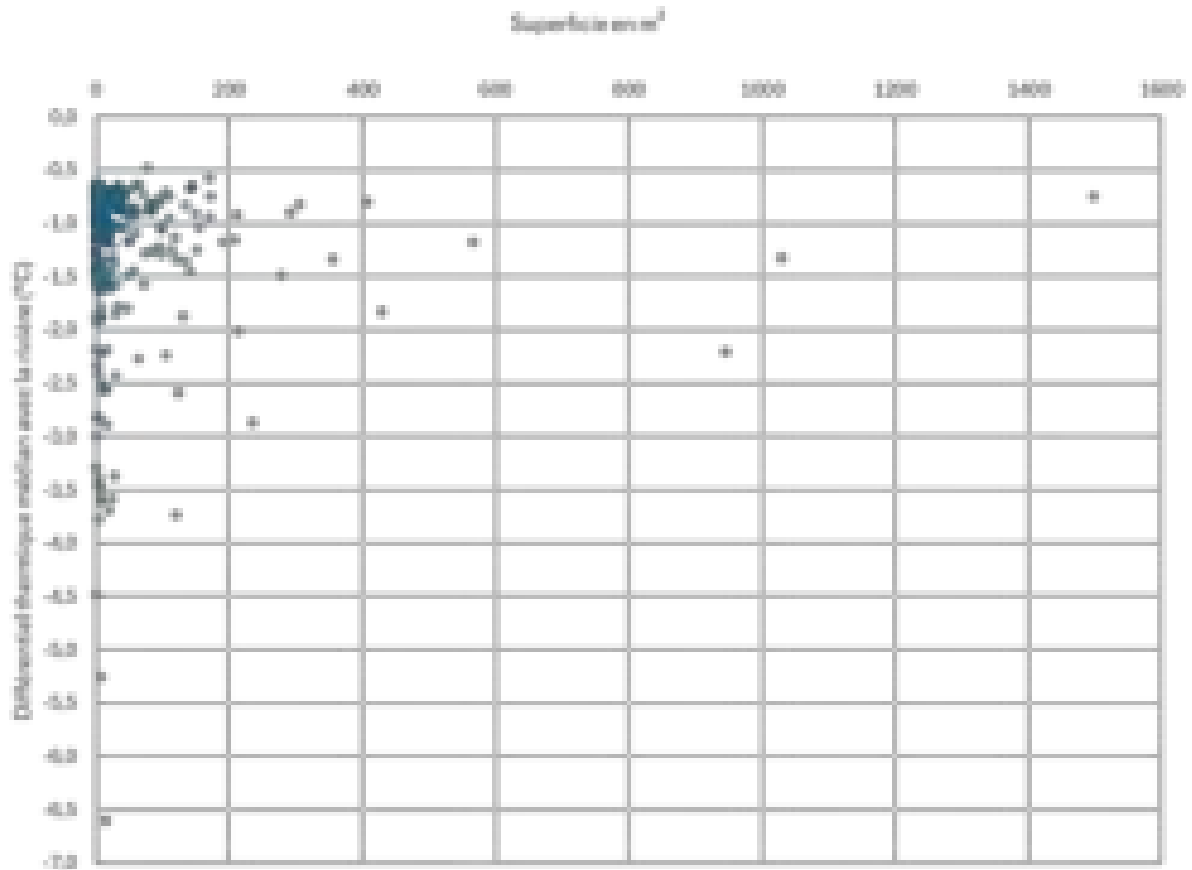


Figure 64 : Répartition des poches froides en fonction de leur différentiel thermique avec la température médiane de la rivière et de leur superficie en m².

La confrontation entre les poches recensées par IRT-a et les traçages karstiques connus permettent de bien identifier les origines de certains apports d'eau essentiels au Dessoubre (figure 65). Notamment, on identifie les trois principales résurgences karstiques connues, à savoir, la source des trois pucelles, le source de Froidefontaine et le Bief de Brand (vers la pisciculture Fleury). Cependant, plusieurs apports d'eau froide importants recensés par IRT-a ne semblent pas avoir d'origine connue.

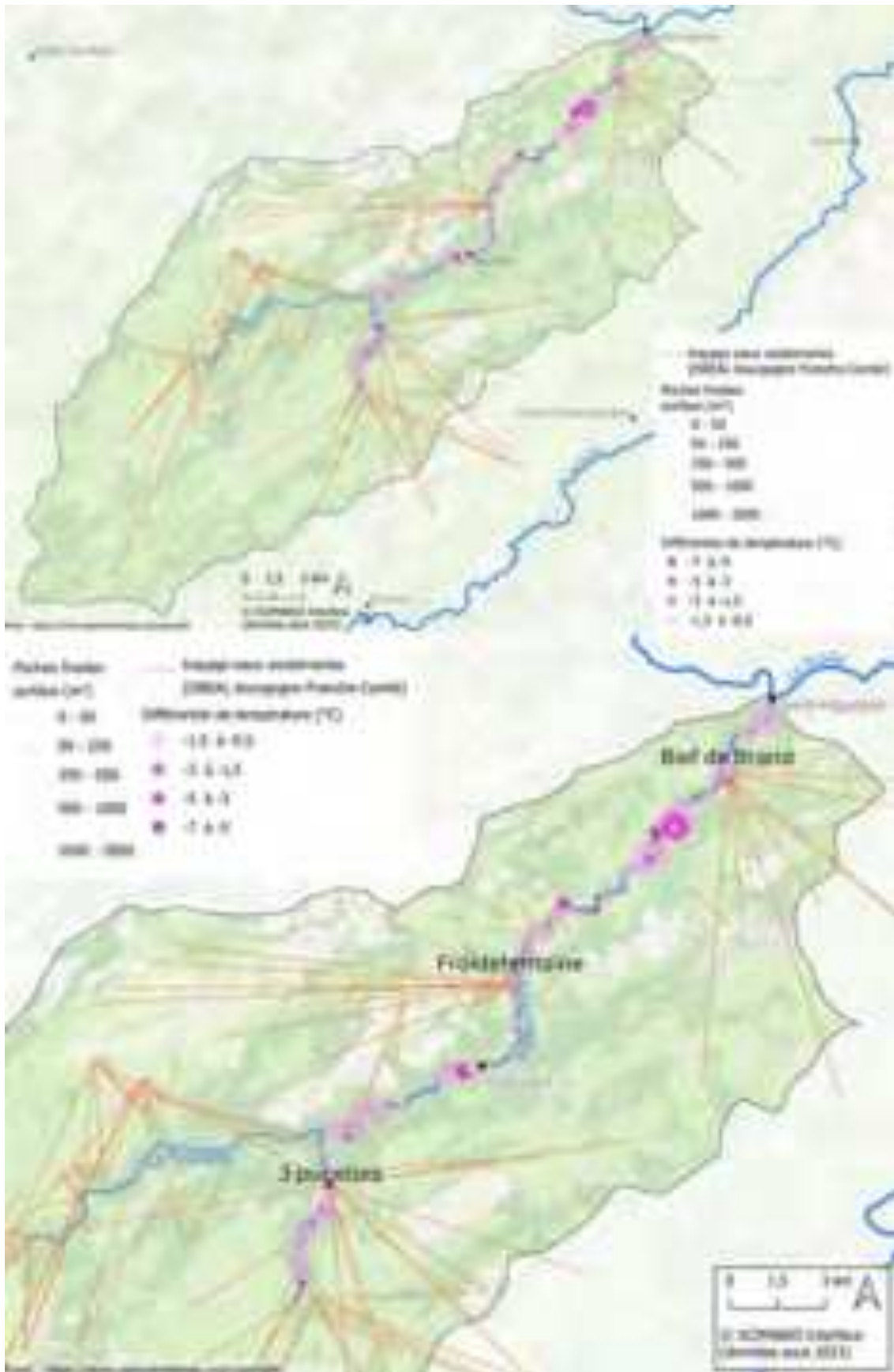


Figure 65 : Répartition des poches froides et localisation des traçages karstiques connus sur le bassin du Dessoubre (données DREAL Bourgogne Franche-Comté). Vue de l'ensemble du bassin en haut et zoom sur le linéaire du Dessoubre en bas.

3.4.2 Les zones de refroidissements majeurs

Même si chacune des poches froides identifiées est importante et que c'est bien l'ensemble de ces poches qui collectivement joue un rôle de catalyseur thermique permettant de réduire la température de l'eau ou de la stabiliser, certaines zones présentent des apports majeurs qui influencent le profil thermique longitudinal de la rivière peuvent être identifiées. Ainsi, 11 zones de refroidissements importants ont été recensées (figures 66 et 67).

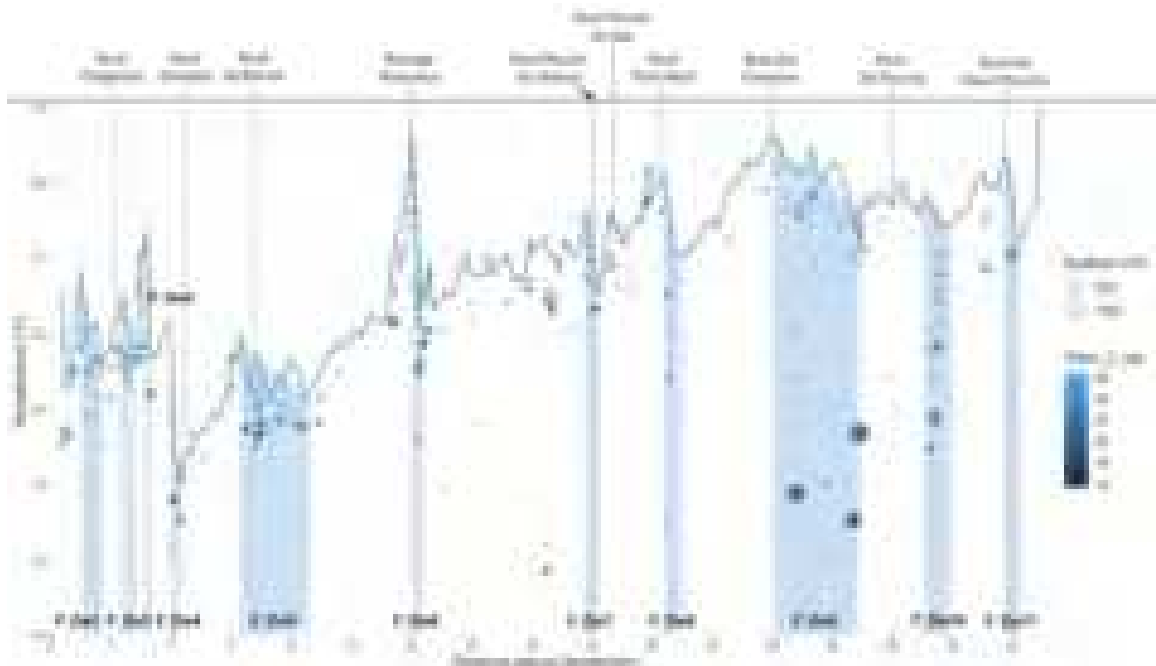


Figure 66 : Localisation sur le profil thermique des onze principales zones de refroidissement recensées sur le Dessoubre.

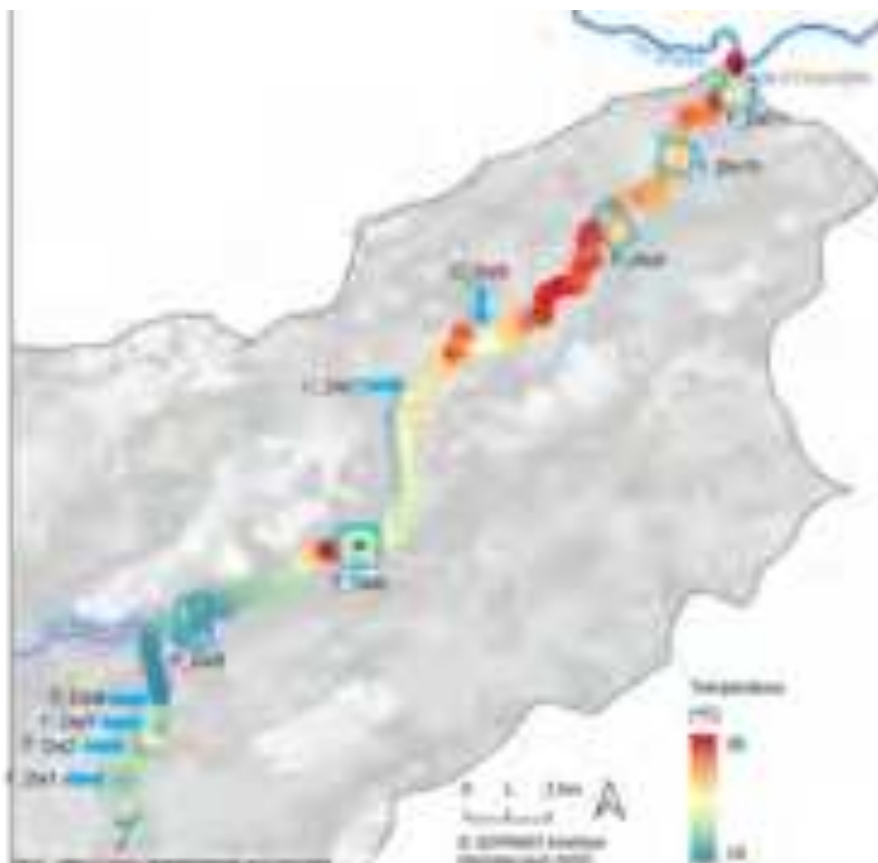


Figure 67 : Localisation sur le profil thermique des onze principales zones de refroidissement sur le Dessoubre.



Figure 68 : Mosaïque thermique illustrant les premiers refroidissements observés sur l'amont du Dessoubre grâce à la présence de poches froides et au niveau de la confluence du Bief Ayroux. (zone F_De1).



Figure 69 : Mosaïque thermique et orthophoto illustrant le refroidissement provoqué par les poches froides recensées par IRT-a sur l'amont du Dessoubre (zoom 1 de la figure 68).



Figure 70 : Mosaïque thermique et orthophoto illustrant l’apport d’eau plus froide repéré au niveau de la confluence du Bief Ayroux (zoom 2 de la figure 68).



Figure 71 : Mosaïque thermique illustrant les poches froides repérées à l'val du seul de l'Engoulot (zone F_De2).

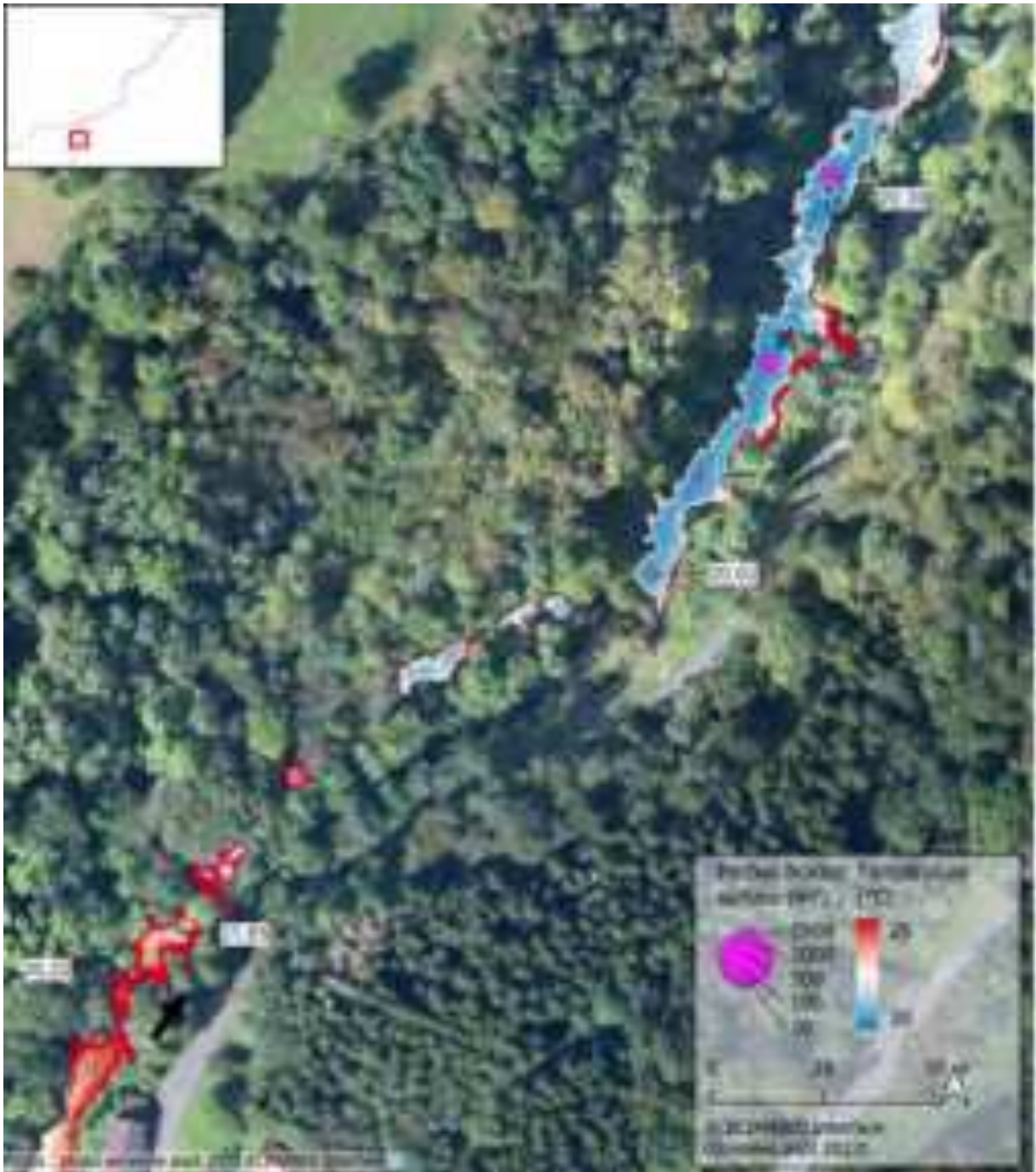


Figure 72 : Mosaïque thermique illustrant un refroidissement important lié à l'existence de plusieurs résurgences (zone F_De3).



Figure 73 : Mosaique thermique illustrant le refroidissement important provoqué par la source des 3 pucelles (zone F_De4).



Figure 74 : Mosaïque thermique illustrant les refroidissements liés à l'existence de plusieurs résurgences (zone F_De5).



Figure 75 : Mosaïque thermique et orthophoto illustrant un refroidissement généré par des poches froides sur la zone F_De5 (zoom 1 de la figure 74).

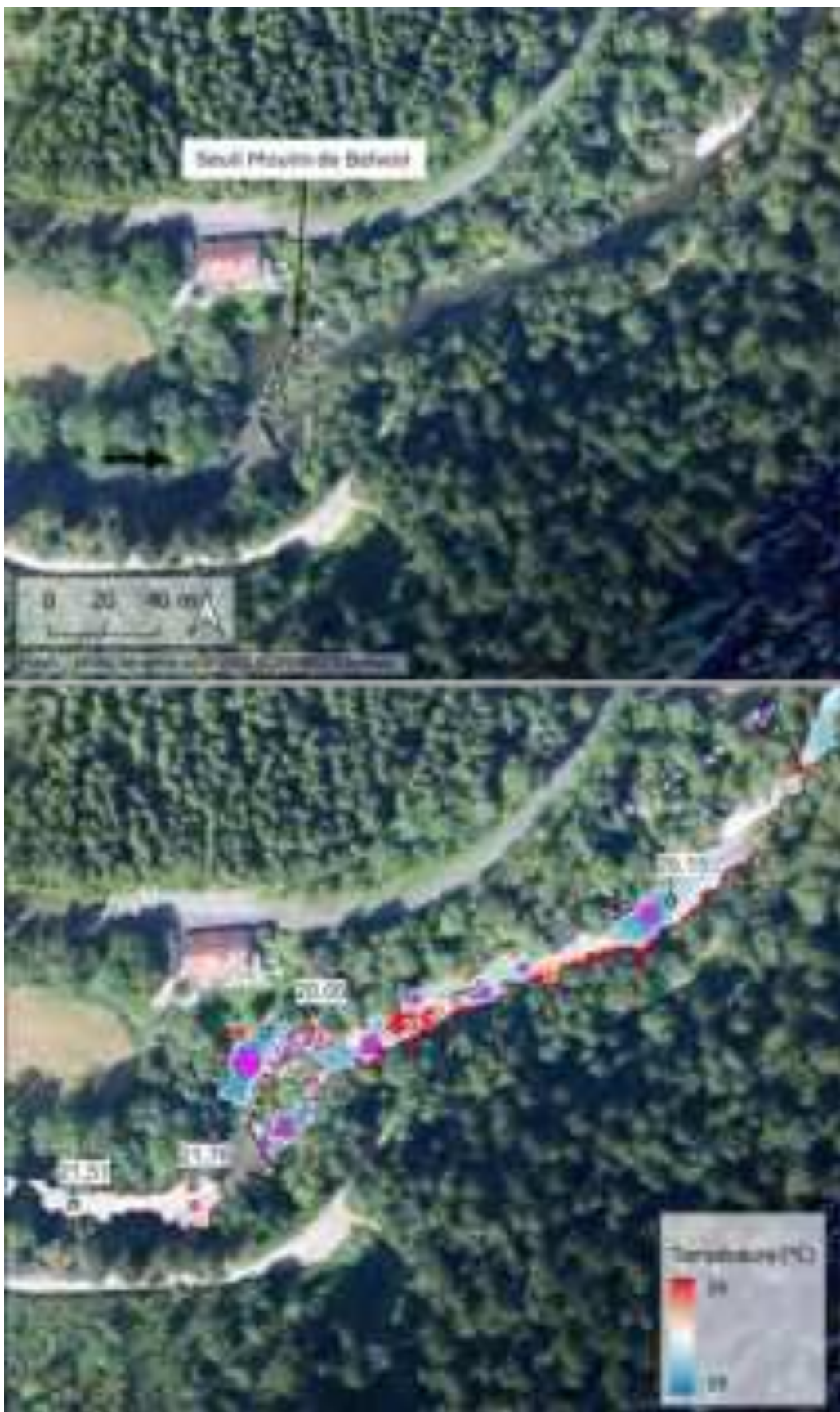


Figure 76 : Mosaïque thermique et orthophoto illustrant le refroidissement généré par des poches froides repérées en amont et en aval du seuil du moulin de Belvoir (zoom 2 de la figure 74).



Figure 77 : Mosaïque thermique et orthophoto montrant le complexe barrage et canal de Rosureux avec ses réchauffements 'amont barrage et aval tronçon court-circuité et ses refroidissements (zone F_De6).

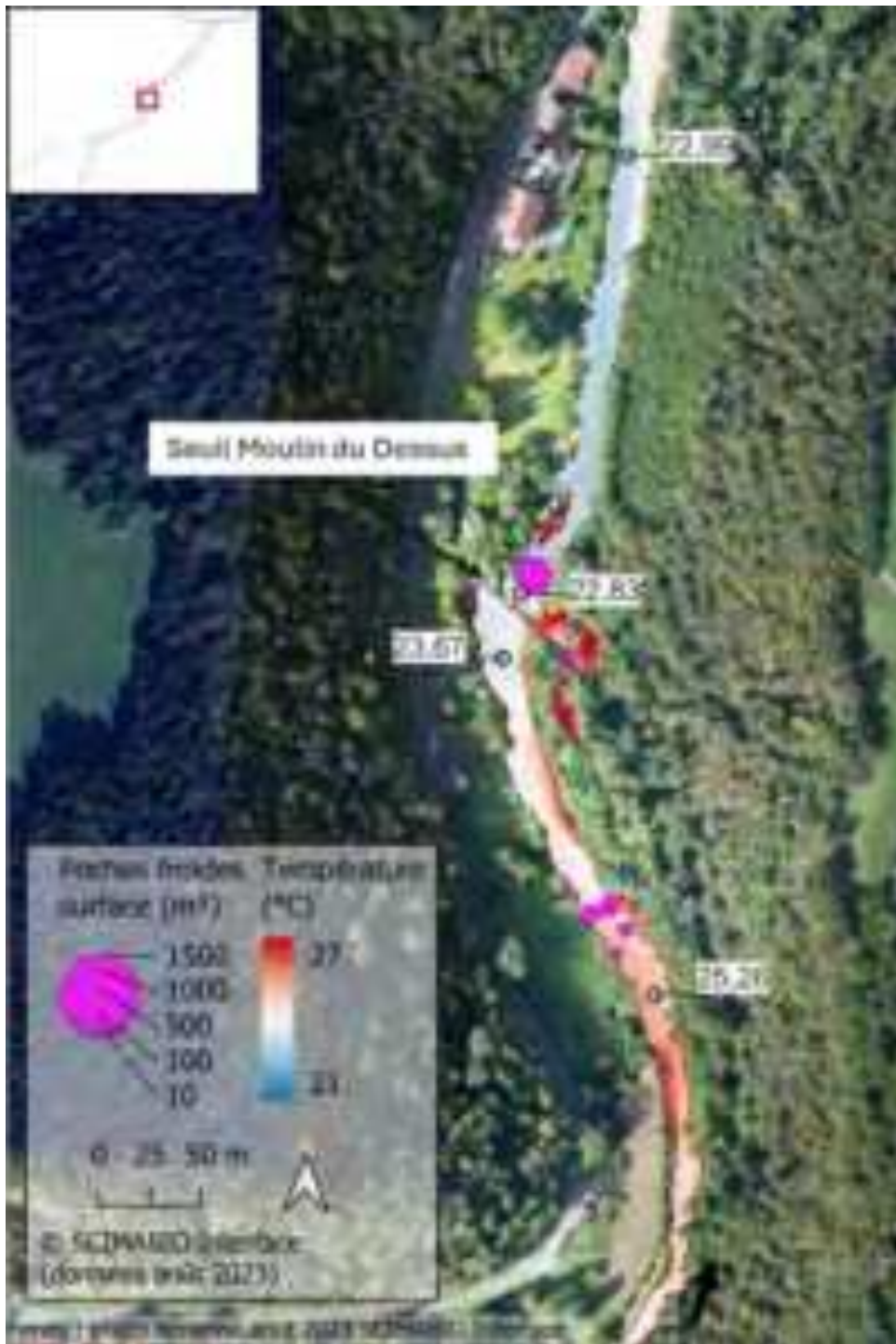


Figure 78 : Mosaïque thermique illustrant le refroidissement et les poches froides recensées au niveau du seuil du Moulin du Dessus (zone F_De7).

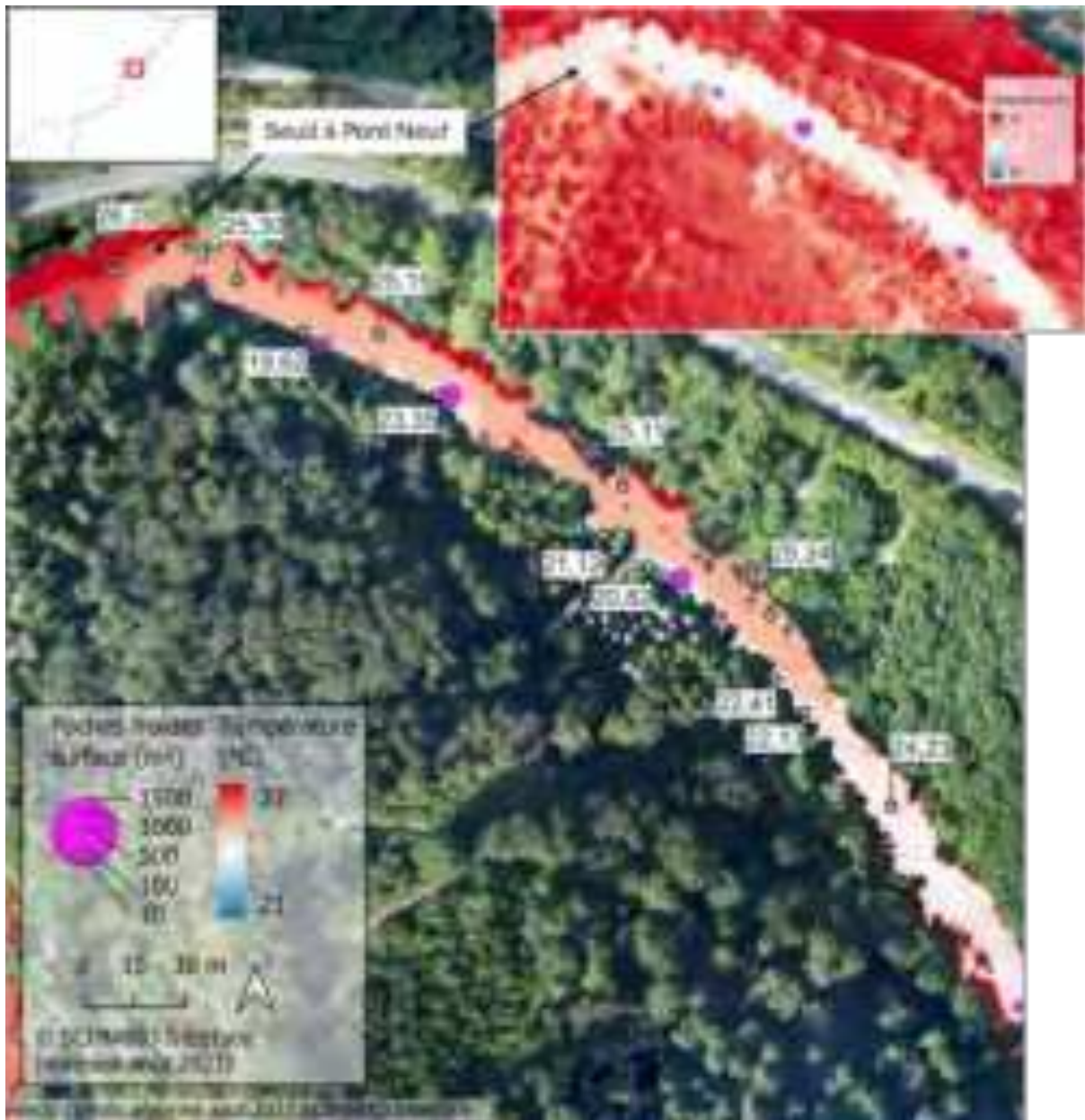


Figure 79 : Mosaïque thermique illustrant le refroidissement et les poches froides recensées au niveau du seuil à Pont Neuf (zone F_De8) avec un zoom utilisant l'imagerie IRT sur l'emprise totale permettant de mieux identifier les résurgences latérales.



Figure 80 : Mosaïque thermique illustrant plusieurs refroidissements observés sur la zone F_De9 en lien provoqués par des résurgences latérales.



Figure 81 : Mosaïque thermique et imagerie thermique sur emprise totale les refroidissements observés au niveau de la pisciculture de Fleurey et du Bief de Brand (zone F_De10).



Figure 82 : Mosaïque thermique illustrant le refroidissements tout relatif observé en aval du seuil des Vieux Moulins (zone F_De11).

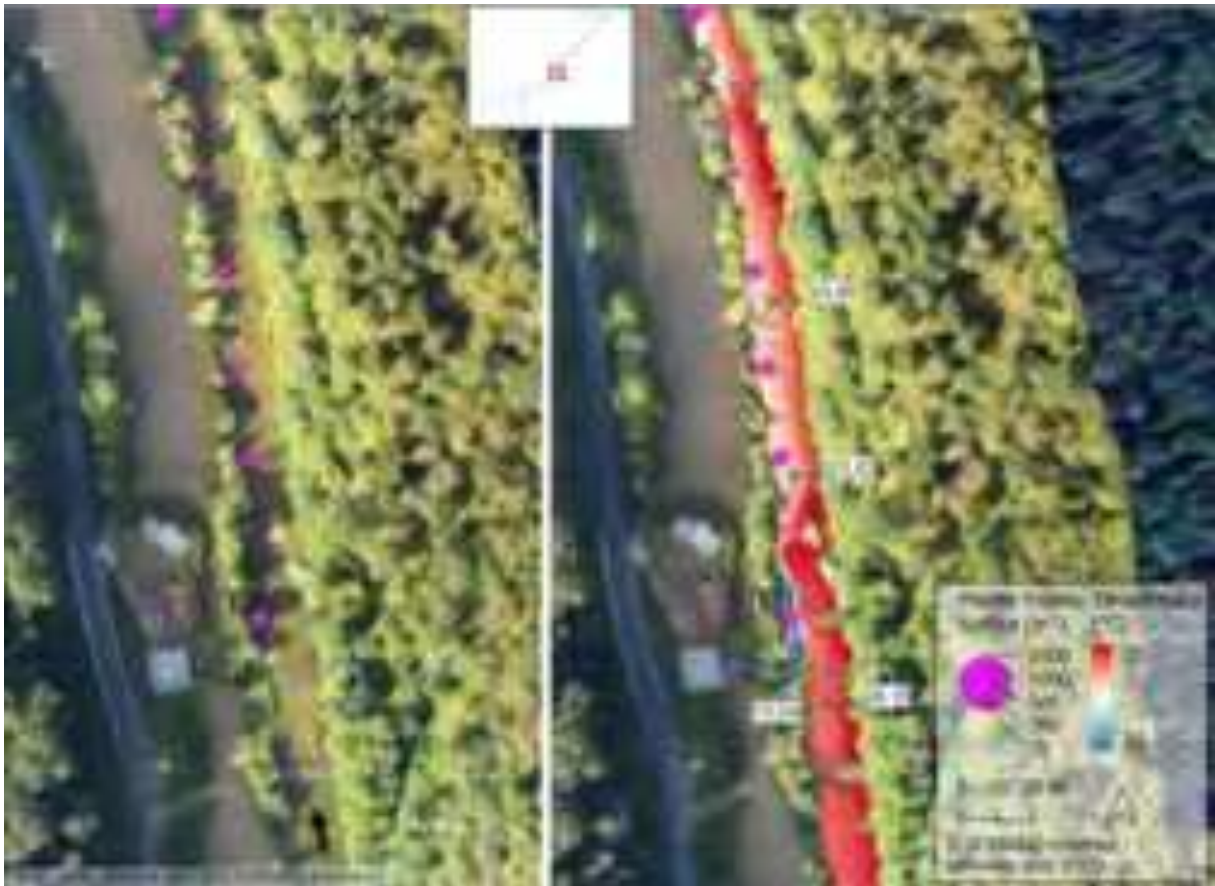


Figure 83 : Mosaïque thermique et orthophoto illustrant la plume d'eau plus froide formée à la restitution de la station de captage d'AEP de Froidefontaine.

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

Pour interpréter les conditions d'habitat thermique sur le Dessoubre vis-à-vis des salmonidés, les données spatiales obtenues par IRT-a ainsi que les données temporelles collectées par les sondes thermiques de la FDPPMA 25 au cours de l'été 2023 ont été confrontées aux exigences écologiques de la truite commune.

Comme évoqué au §3.2 (page 39), les observations thermiques sur le Dessoubre sont très particulières avec des températures au niveau du fond du lit collectées par les sondes thermiques nettement plus froides que celles collectées en surface par IRT-a, en particulier sur la moitié amont du cours d'eau.

Cette spécificité signifie que la variation spatiale des habitats thermiques vis-à-vis des salmonidés obtenue par la campagne IRT-a retranscrit uniquement les conditions proche de la surface. D'après les données stationnelles des sondes thermiques, il semble que les conditions thermiques soient bien meilleures proche du fond.

Ainsi, d'après la campagne IRT-a, les températures de surface sont défavorables à très défavorables sur la totalité du Dessoubre avec 61,7% du linéaire au-dessus du seuil de stress physiologique de 19°C et même 36,2% du linéaire qui dépasse le seuil léthal de 25°C (figures 84 et 85, tableau 3).

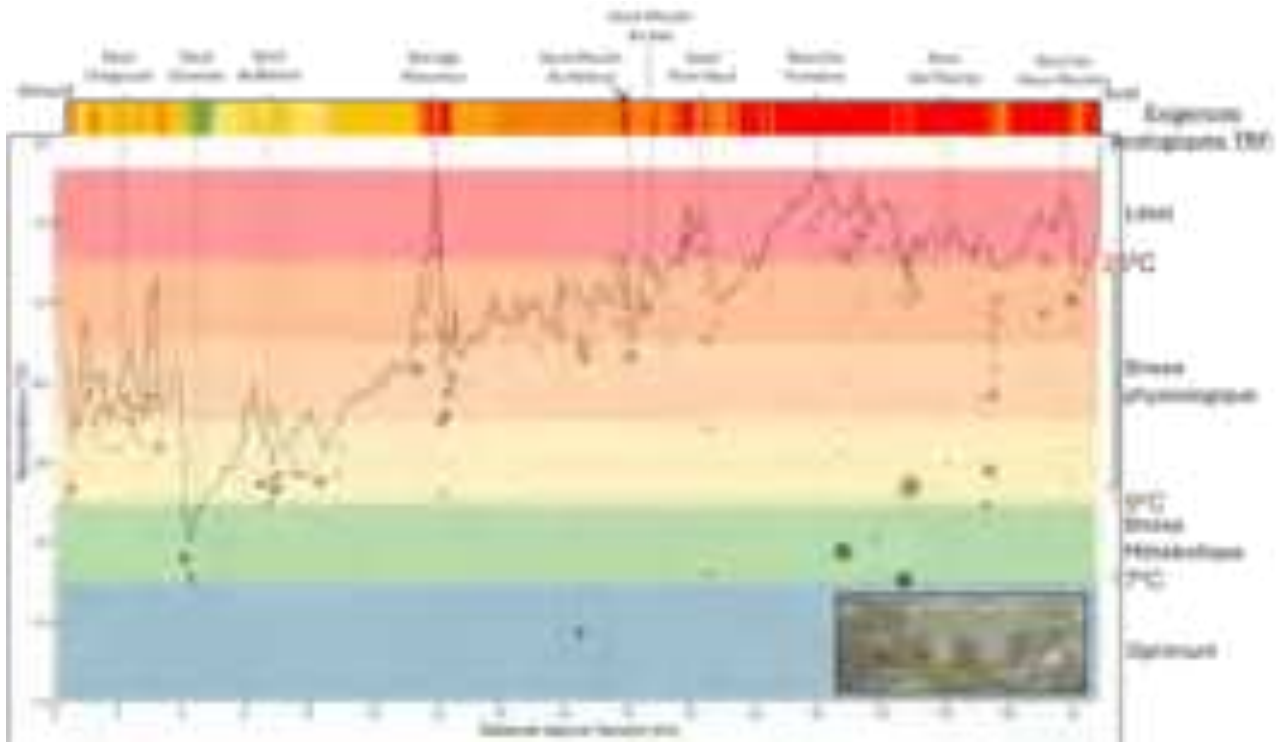


Figure 84 : Confrontation du profil thermique obtenu par IRT-a aux exigences thermiques de la truite commune et retranscription en code barre des exigences le long du linéaire du Dessoubre.

≤17°C	Optimum	0,0%	
17-19°C	Stress métabolique	2,1%	
19-21°C	Stress physiologique	9,8%	61,7%
21-23°C		21,5%	
23-25°C		30,4%	
>25°C	Létal	36,2%	

Tableau 3 : Pourcentages du linéaire du Dessoubre correspondant aux différentes exigences thermiques de la truite commune calculés à partir des températures médianes par tronçon de 100m.



Figure 85 : Linéaire des exigences thermique de la truite commune et localisation des sondes thermiques de la FDPMA25 utilisées pour l'analyse temporelle des conditions thermiques.

Les données stationnelles des sondes thermiques indiquent que les conditions sont meilleures dans la colonne d'eau ou proche du fond. Les données thermiques montrent que les conditions restent inférieures à 17°C, dans l'optimum des salmonidés, sur les deux stations de suivi amont (DESS 02 et DESS 06) ou ne dépassent pas le seuil de 19°C sur la troisième station (DESS 09). Par contre, les conditions en aval se dégradent comme l'indiquent les données des deux dernières sondes (DESS 09 et DESS 11) (figure 86 et 87).

Ces résultats indiquent que les données IRT-a ont été collectées en conditions hydro-climatiques très sévères avec des températures d'air très élevées et un débit d'étiage très faible. Elles constituent donc un jeu de données intéressant qui représentent les conditions les plus désavantageuses de l'été.

Ces résultats montrent que les échanges rivière/eaux souterraines quasi-permanents sur des linéaires importants sont primordiaux pour maintenir des conditions thermiques favorables aux salmonidés. Sans ces apports, les températures d'eau du Dessoubre, en particulier sur la moitié amont seraient proches de celles collectées par l'IRT-a ce qui changerait radicalement les habitats thermiques pour les salmonidés.

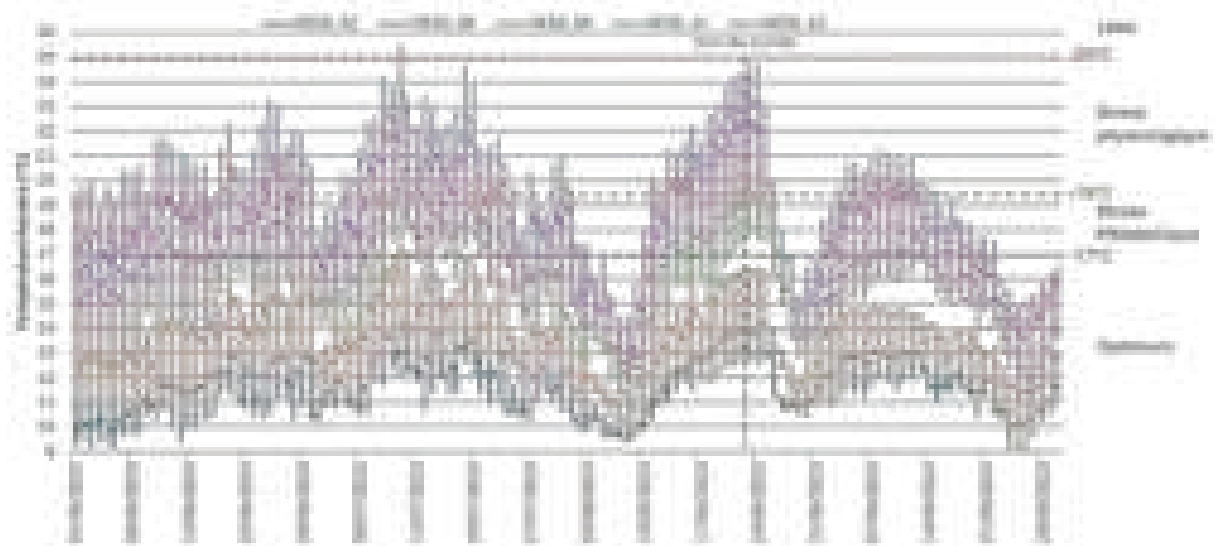


Figure 86 : Variations horaires des températures d'eau du Dessoubre au niveau de 5 stations de suivi thermique du 01 juin au 30 septembre 2023 (données FDPMA25).

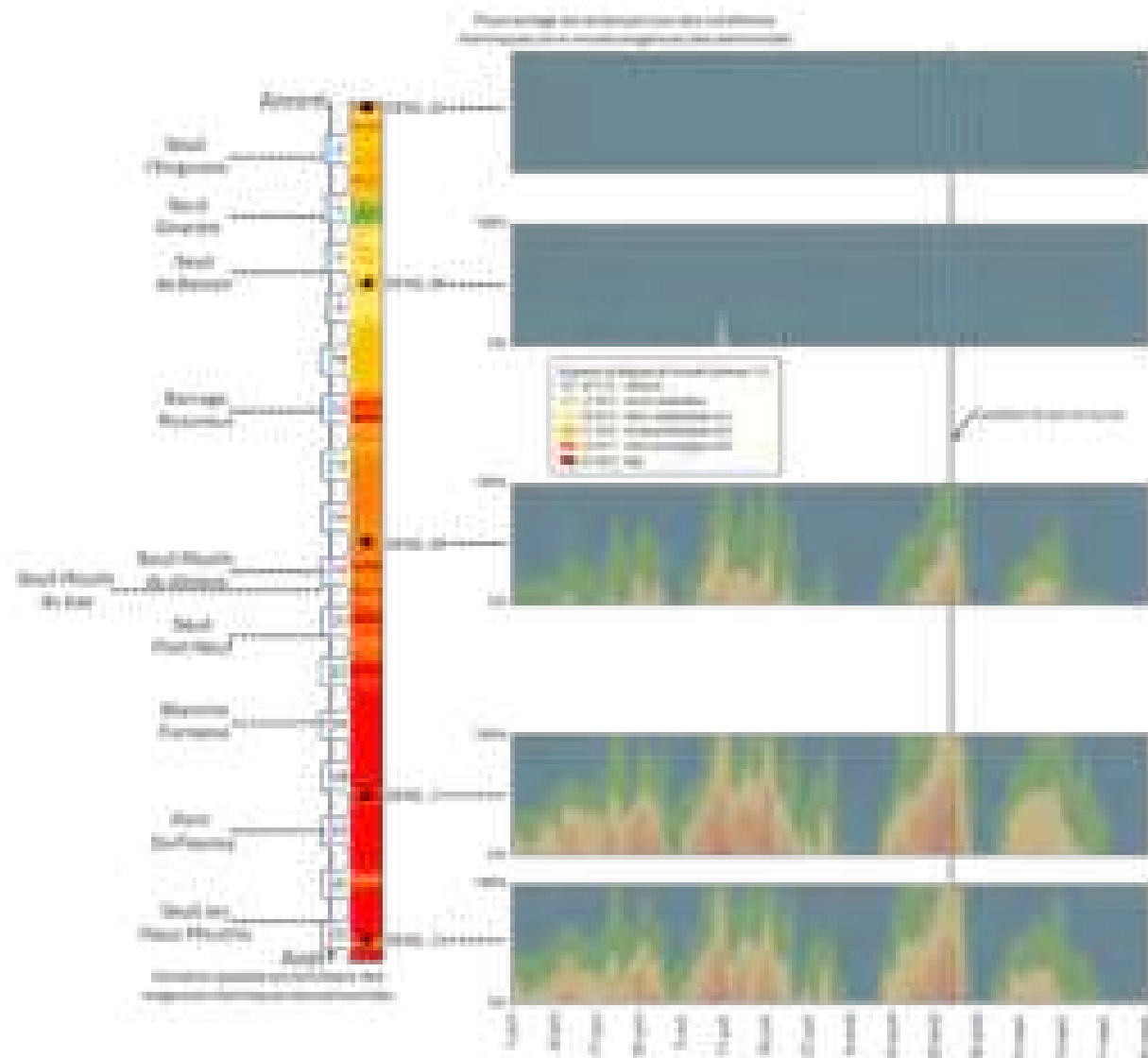


Figure 87 : Répartition spatiale à partir de l'imagerie IRT et temporelle pendant l'été à partir des 5 stations de suivi thermique utilisée (données FDPMA25) des différentes plages d'exigence thermique définies pour les salmonidés.

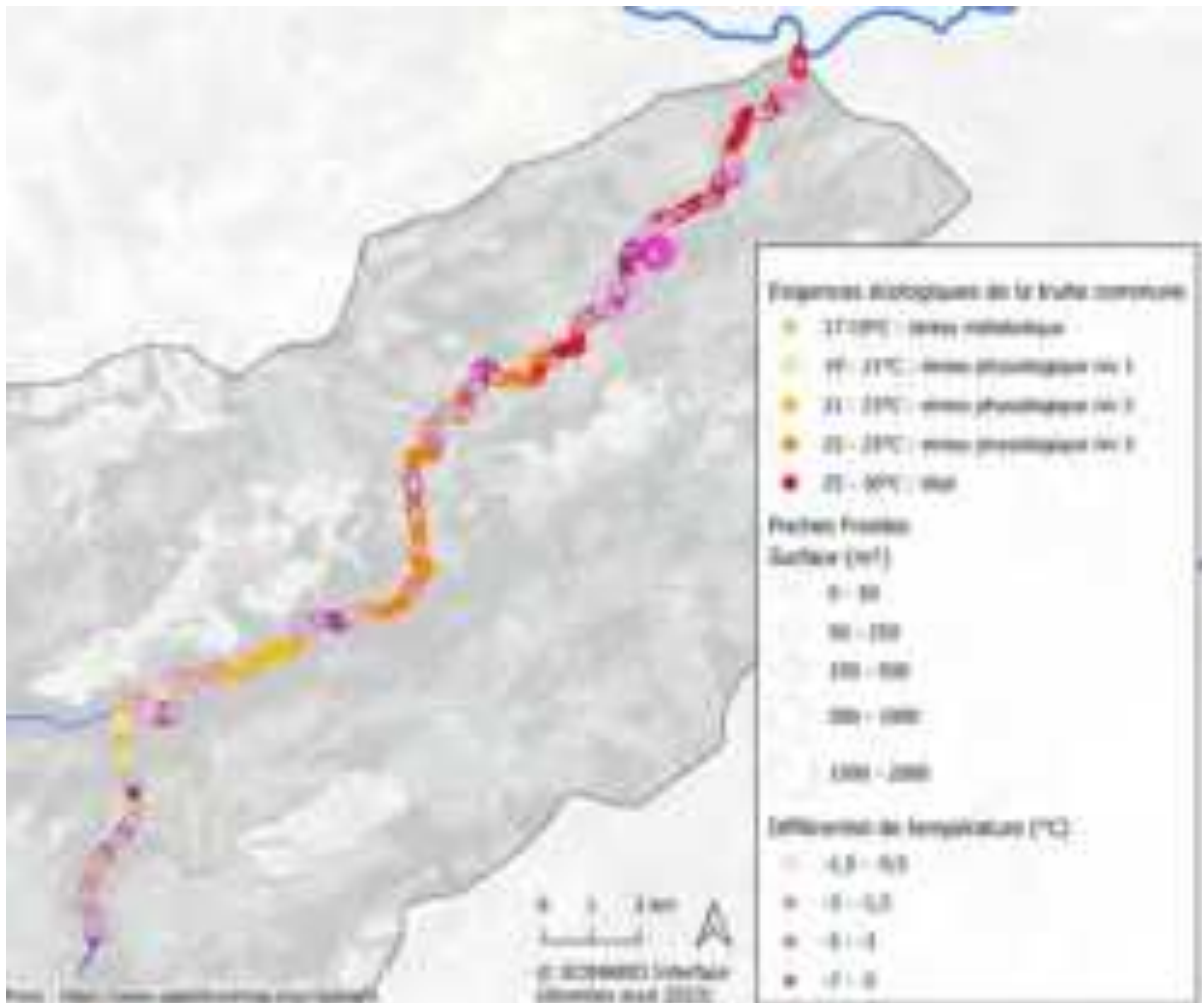


Figure 89 : Répartition et caractéristiques des poches froides sur le linéaire des conditions thermiques vis-vis des salmonidés.

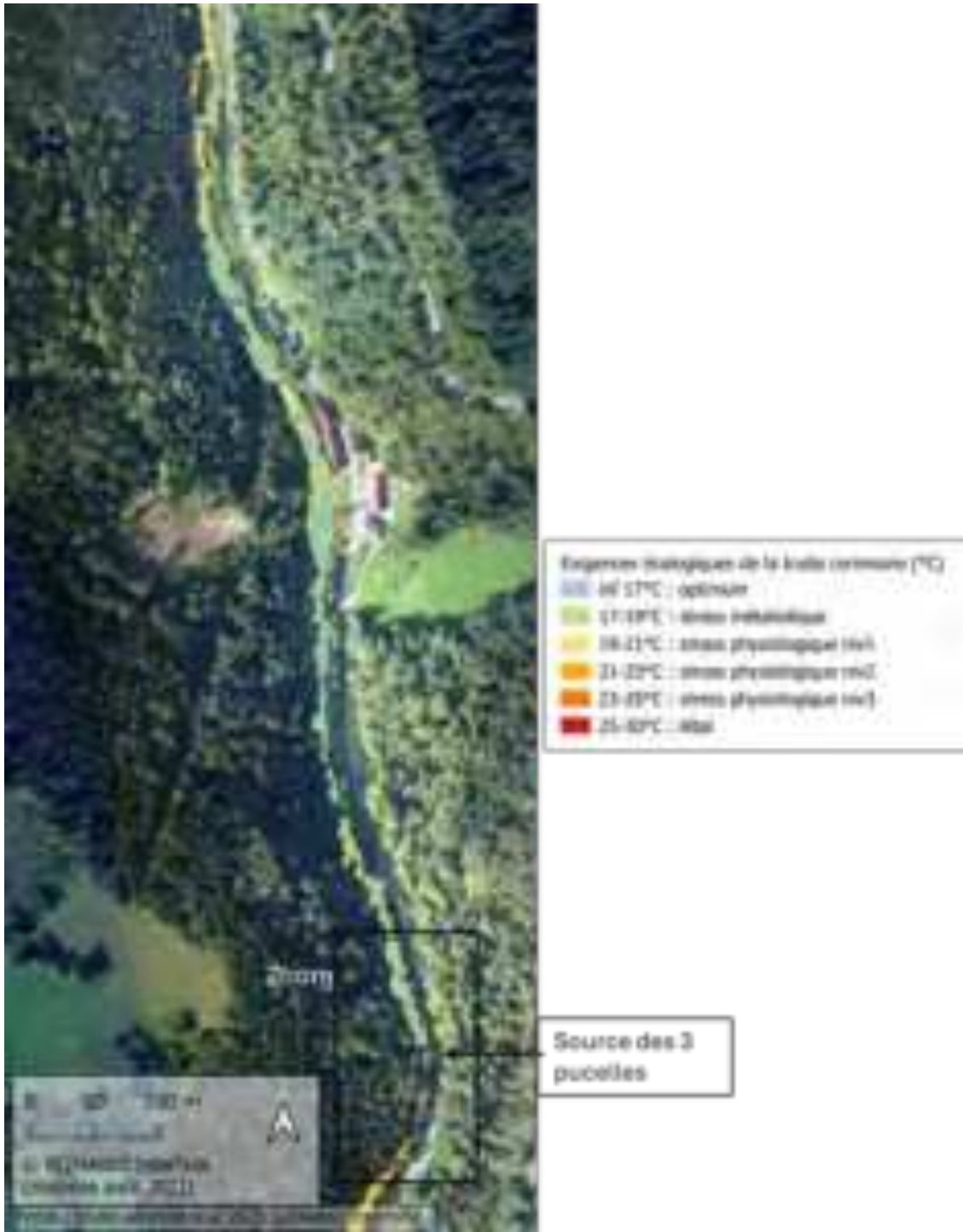


Figure 90 : Mosaïque thermique illustrant l'amélioration des conditions thermiques vis-à-vis des salmonidés sur un linéaire d'environ 700 mètres provoquées par la source des 3 pucelles.



Figure 91 : Zoom sur l'arrivée dans le Dessoubre de la source des 3 pucelles illustrant l'amélioration des conditions thermiques vis-à-vis des salmonidés (légende des couleurs voir figure 90).



Figure 92 : Mosaïque thermique orthophoto montrant une petite arrivée d'eau froide en rive droite dans le village de Rosureux qui entraîne une plume avec une amélioration locale des conditions thermiques vis-à-vis des salmonidés (légende des couleurs voir figure 90).

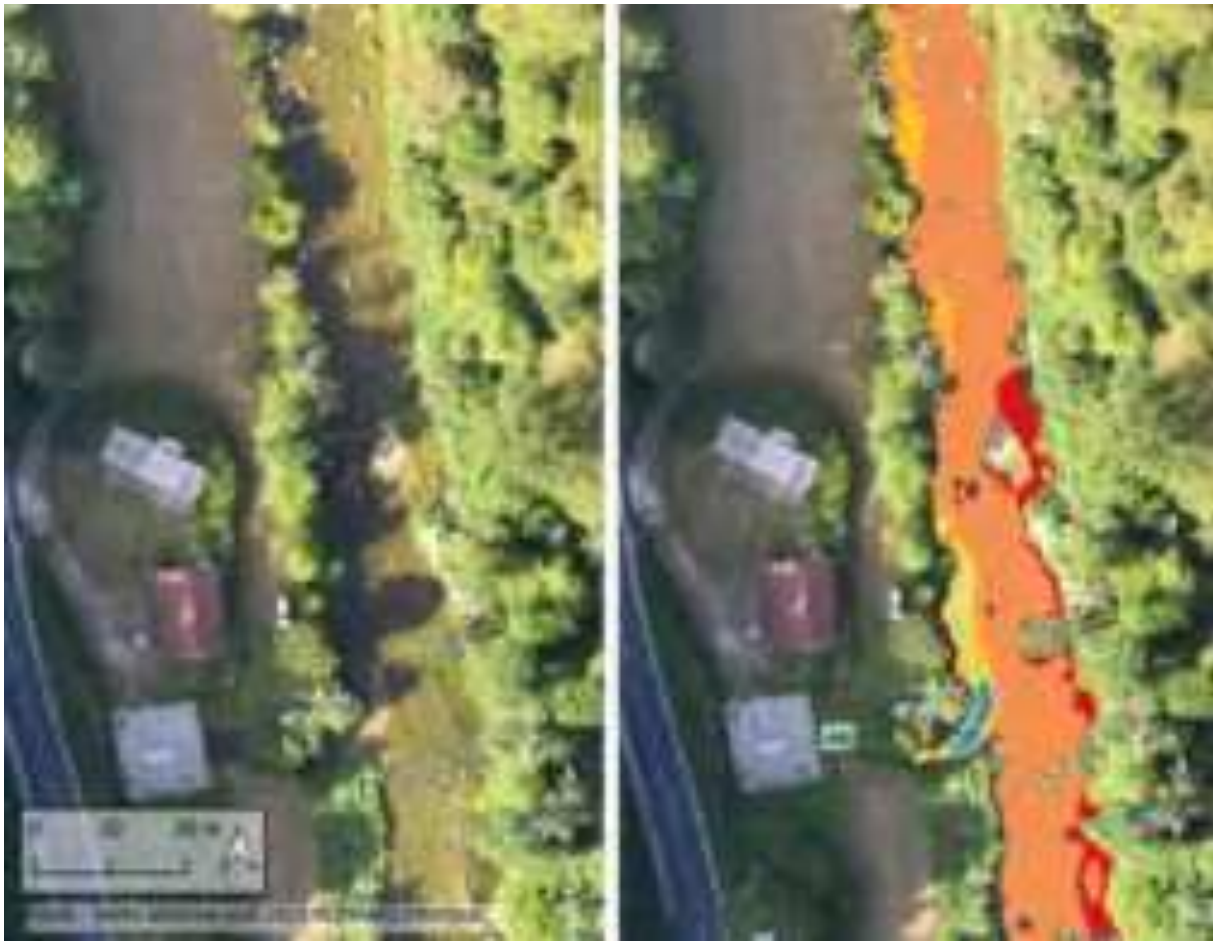


Figure 93 : Mosaïque thermique et orthophoto montrant la restitution du captage AEP de Froidefontaine qui provoque une plume avec une amélioration locale des conditions thermiques vis-à-vis des salmonidés (légende des couleurs voir figure 90).



Figure 94 : Mosaïque thermique et orthophoto montrant l'aval du seuil du moulin du dessus qui représente une zone avec une amélioration locale des conditions thermiques vis-à-vis des salmonidés (légende des couleurs voir figure 90).



Figure 95 : Mosaïque thermique et orthophoto illustrant des petites résurgences en rive droite (en aval du seuil à Pont Neuf) avec une amélioration locale des conditions thermiques vis-à-vis des salmonidés (légende des couleurs voir figure 90).

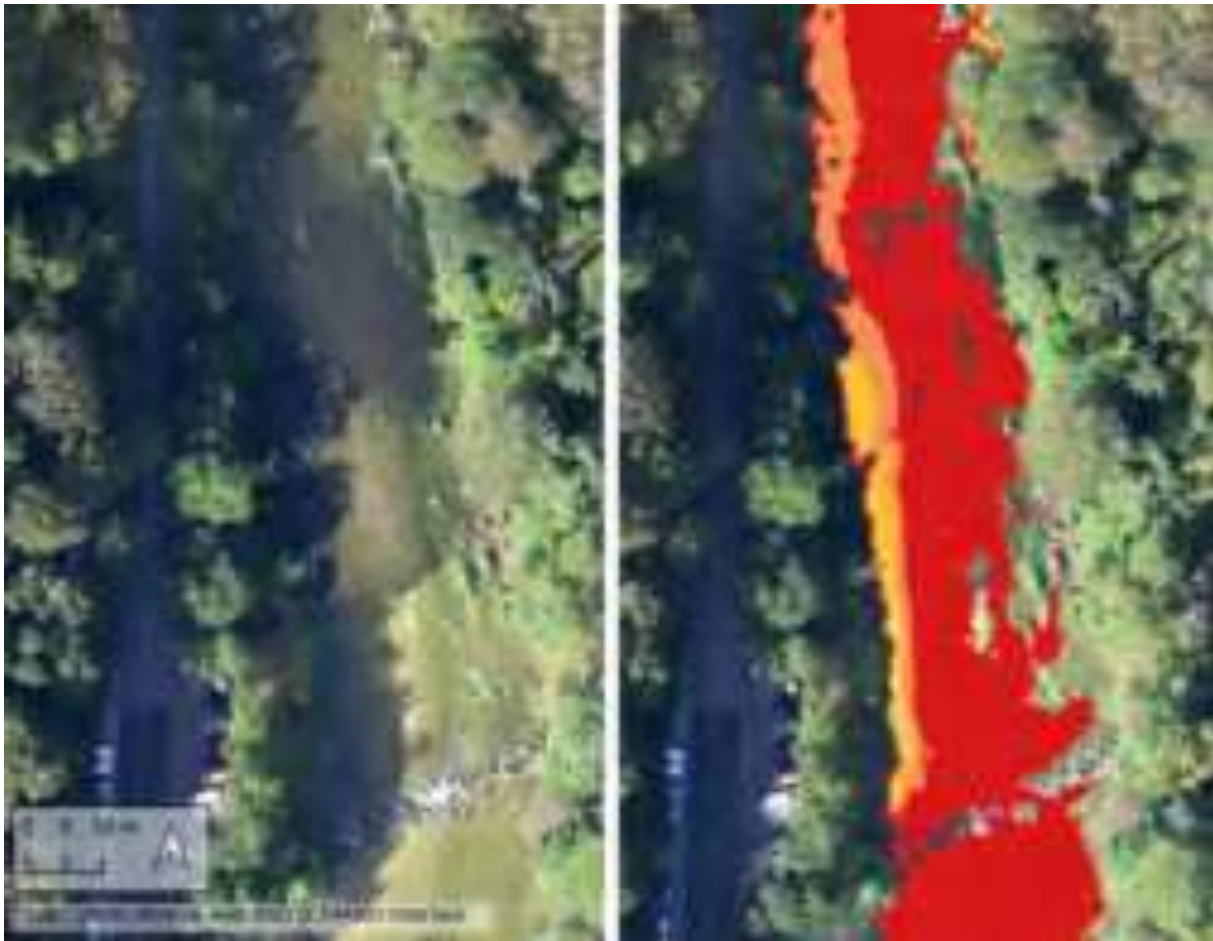


Figure 96 : Mosaïque thermique et orthophoto illustrant des petites résurgences en rive gauche (vers Blanche Fontaine) avec une amélioration locale des conditions thermiques vis-à-vis des salmonidés (légende des couleurs voir figure 90).



Figure 97 : Mosaïque thermique et orthophoto illustrant des petites résurgences en rive droite (entre Blanche Fontaine et Pont de Fleurey) avec une amélioration locale des conditions thermiques vis-à-vis des salmonidés (légende des couleurs voir figure 90).

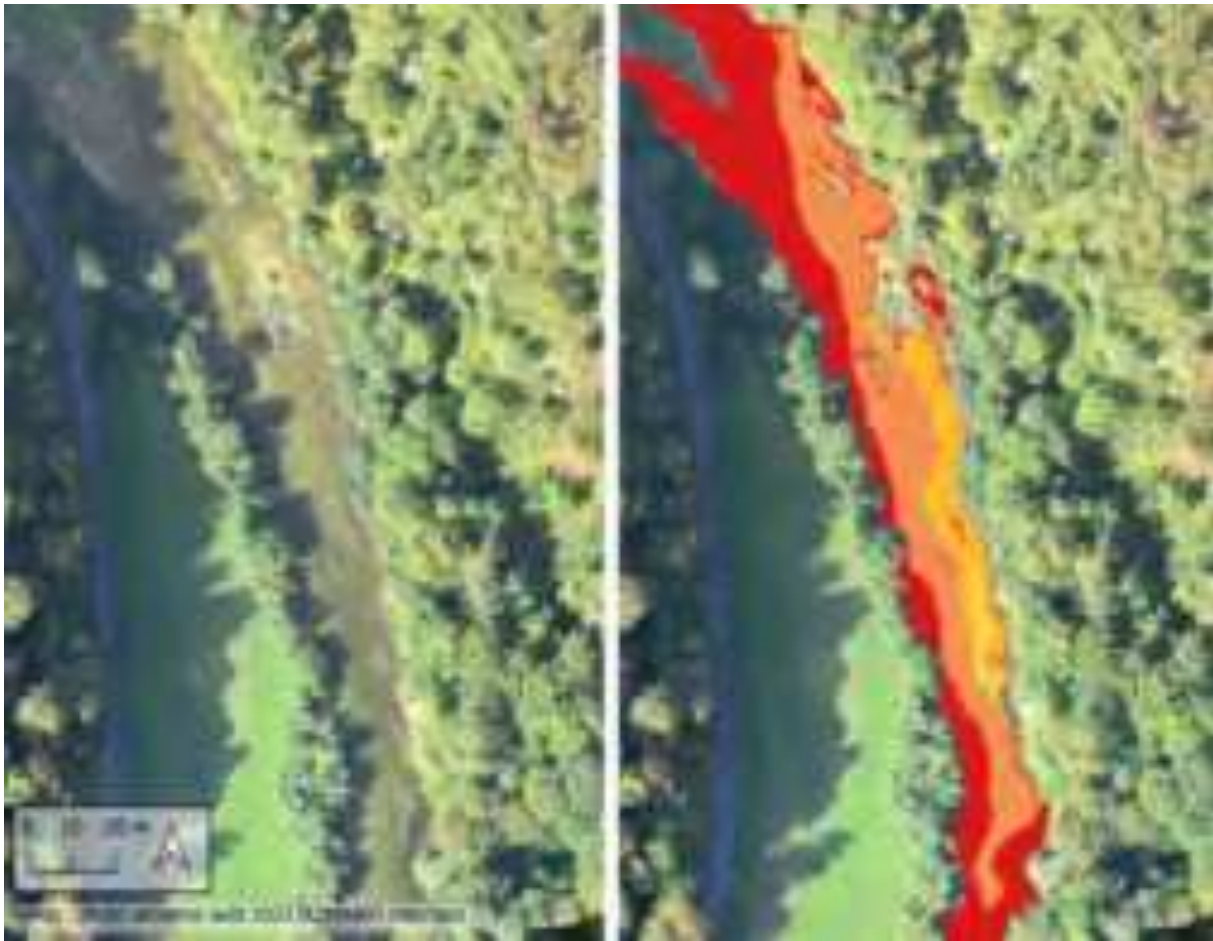


Figure 98 : Mosaïque thermique et orthophoto illustrant des petites résurgences en rive droite (entre Blanche Fontaine et Pont de Fleurey) avec une amélioration locale des conditions thermiques vis-à-vis des salmonidés (légende des couleurs voir figure 90).



Figure 99 : Mosaïque thermique et orthophoto illustrant les apports latéraux rive droite au niveau de la pisciculture de Fleurey et du Bief de Brand avec une amélioration locale des conditions thermiques vis-à-vis des salmonidés (légende des couleurs voir figure 90).

4. RÉSULTATS DE LA CARTOGRAPHIE THERMIQUE PAR IRT-A SUR LE DOUBS

Pour le Doubs amont, 1096 photographies ont été acquises et alignées pour générer une orthophoto recouvrant environ 10.4km² pour une résolution au sol de 5.3 cm/pixel. De la même manière, 1162 images thermiques ont été prises et 1142 alignées pour créer une mosaïque thermique de la même superficie, pour une résolution d'image au sol de 25.6cm/pixel.

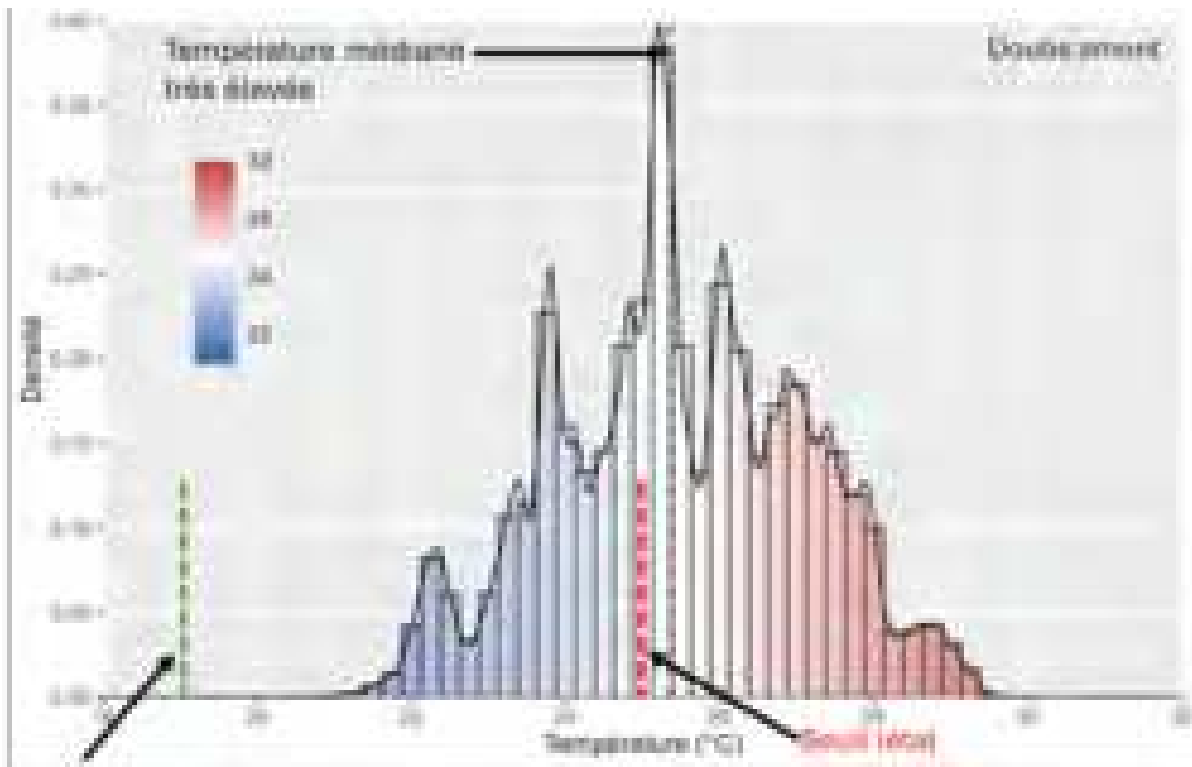
Pour le Doubs médian, 1046 photographies ont été acquises et 937 ont été alignées pour générer une orthophoto recouvrant environ 9.6km² pour une résolution au sol de 6.3 cm/pixel. De la même manière, 860 images thermiques ont été prises et 854 alignées pour créer une mosaïque thermique de la même superficie, pour une résolution d'image au sol de 30.7cm/pixel.

Il est important de garder en mémoire pour l'interprétation des résultats que la technologie IRT-a fournit une information de température de surface, et ne cartographie que ce qui est visible depuis les airs.

4.1 Diversité thermique de la rivière le jour du survol

L'histogramme des valeurs de température de l'ensemble des pixels en eau obtenu le jour du survol montre peu de diversité thermique sur les linéaires imagés du Doubs amont et du Doubs médian. La quasi-totalité des pixels sont compris entre 20°C et 30°C pour le Doubs amont et entre 25°C et 30°C sur le Doubs médian (figure 100). Les températures médianes montrent des valeurs très élevées, autour de 25,3°C pour le Doubs amont et de 28,8°C pour le Doubs médian.

Le Doubs amont, qui se situe dans un contexte salmonicole, montre, le jour du survol c'est-à-dire au cours de la période la plus chaude de l'été, des surfaces en eau majoritairement défavorables aux salmonidés avec aucune surface en dessous de 19°C et plus de 55% de la surface au-dessus de 25°C, seuil léthal pour la truite.



Seuil début stress physiologique pour la truite

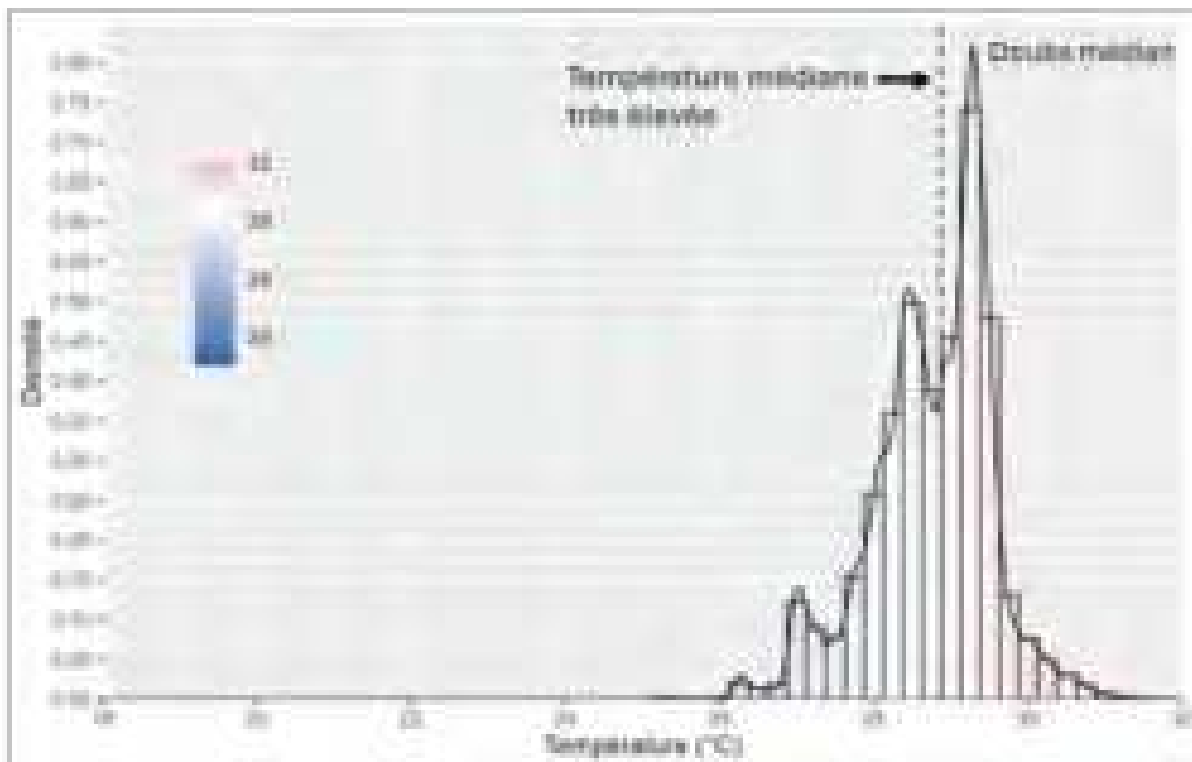


Figure 100 : Histogrammes de distribution des pixels de température sur le Doubs amont et médian obtenus le 23 août 2023. Données sur les exigences thermiques de la truite issues de Crisp (1996), Elliott et Hurley (2001).

4.2 Profils longitudinaux de température

Le profil longitudinal sur le Doubs amont montre que le profil thermique de la rivière est totalement influencé par les équipements hydro-électriques et ce dès le point de départ du relevé IRT-a localisé dans la retenue d'eau de la Rasse (figures 101 et 103). La température médiane du profil thermique

ne varie que de 21,7°C pour la valeur minimale à 28,5°C pour la valeur maximale sur les 32 km étudiés. Les températures sont systématiquement plus élevées au niveau des 4 retenues (Rasse, Refrain, Goule, Theusseret), bien identifiées par les remous thermiques obtenues, et montrent une baisse de plusieurs degrés à l'aval immédiat de chaque barrage.

Aucune arrivée importante d'eau froide ayant une influence sur le profil thermique de la rivière n'a été identifiée et les échanges nappe/rivière sont quasi-inexistants sur les tronçons courants (figure 101). Aucun apport ne permet donc de réduire l'impact thermique provoqué par les retenues qui se poursuit sur le reste du linéaire aval.

Les données de températures du fond du lit obtenues par le suivi de la FDPPMA 25 montrent un petit delta thermique avec les températures de surface obtenues par IRT-a, tout en restant élevés, autour de 21°C, au niveau des deux stations Doubs 23 et Doubs 25 (figure 101). Ces deux stations se situent sur des secteurs sur lesquels des micro-résurgences d'eau plus froide très locales ont été identifiées (figure 101). Ces données stationnelles informent donc sur les conditions thermiques susceptibles d'être observées au fond du lit à ces endroits précis mais restent très locales et donc pas forcément représentative de la température ambiante de la rivière lors de la période estivale chaude. A l'inverse, les données de la station aval Doubs 27 présente des températures de fond équivalente à celle de la surface.

Enfin, la station de suivi Doubs 20, située plus en amont du linéaire imagé par IRT-a entre l'aval de l'usine du Chatelot et la retenue de la Rasse, indique une valeur nettement plus froide à l'heure du survol, autour de 17°C. Cette station se situe à environ 3,5km en amont du début des données IRT-a qui, elles, indiquent une température médiane de plus de 24°C (figure 101). Cette information confirme que les températures supérieures à 24°C obtenues dès le début des données IRT-a sont le résultat de la retenue de la Rasse et qu'une augmentation brutale et importante des températures se produit au niveau du remous thermique de cette retenues.

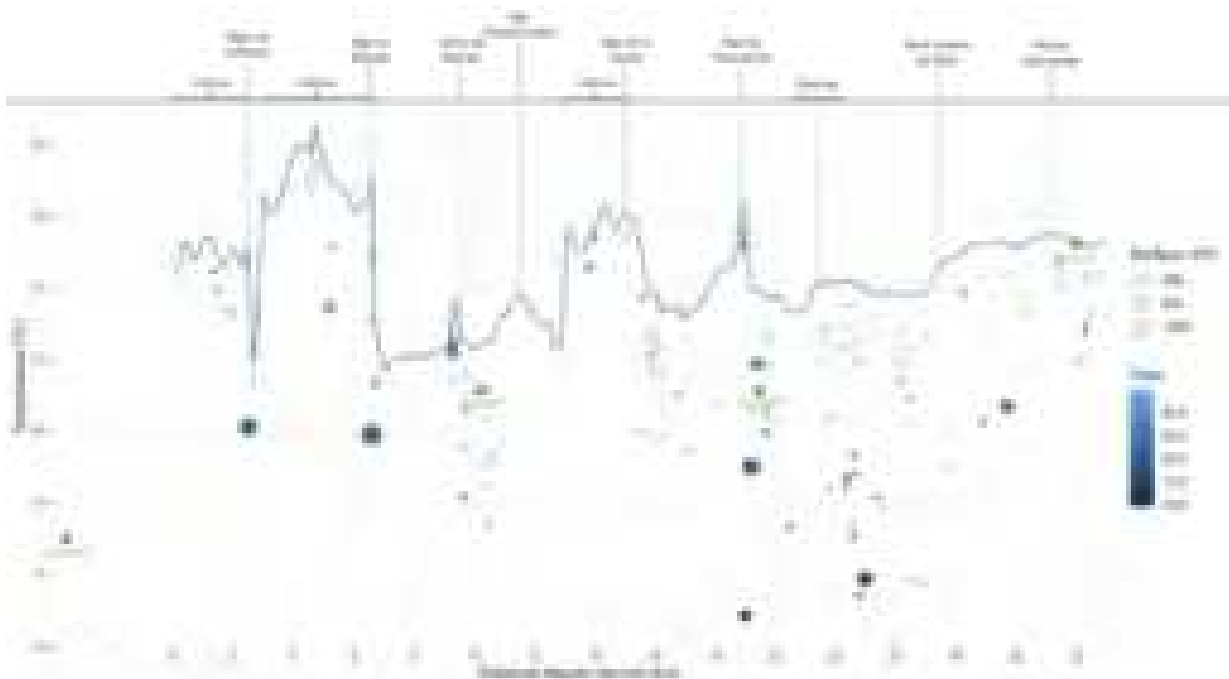


Figure 101 : Profil longitudinal des températures de surface issu de la campagne IRT-a sur le Doubs amont et localisation des arrivées de températures plus froides. Losanges verts = valeurs de température (au fond du lit) obtenues à l'heure du survol sur les 4 sondes thermiques de la FDPPMA25.

Le profil longitudinal sur le Doubs aval présente des valeurs de températures médianes comprises entre 25,2°C et 30°C sur les 24 km étudiés (figures 102 et 103).

La température est relativement constante, autour de 28,5°C sur les 5 premiers kilomètres après la frontière, entre Brémencourt et Glère. Sur ce linéaire, deux petits secteurs présentant des arrivées d'eau « plus froide », autour de 25-26°C ont été recensés. Il s'agit des seuls échanges nappe/rivière ou apports d'eau qui ont pu être identifiés sur l'ensemble du Doubs Médian (figure 102). Ensuite, le profil thermique sur le reste du linéaire est influencé par les installations hydro-électrique de Vaufrey et de Soulce-Cernay avec des élévations de température allant jusqu'à 30°C au niveau des retenues et des baissent toutes relatives à l'aval immédiat des barrages sans pourtant que ces baisses soient associées à des détection d'arrivée d'eau hyporhéiques (figures 102 et 103).

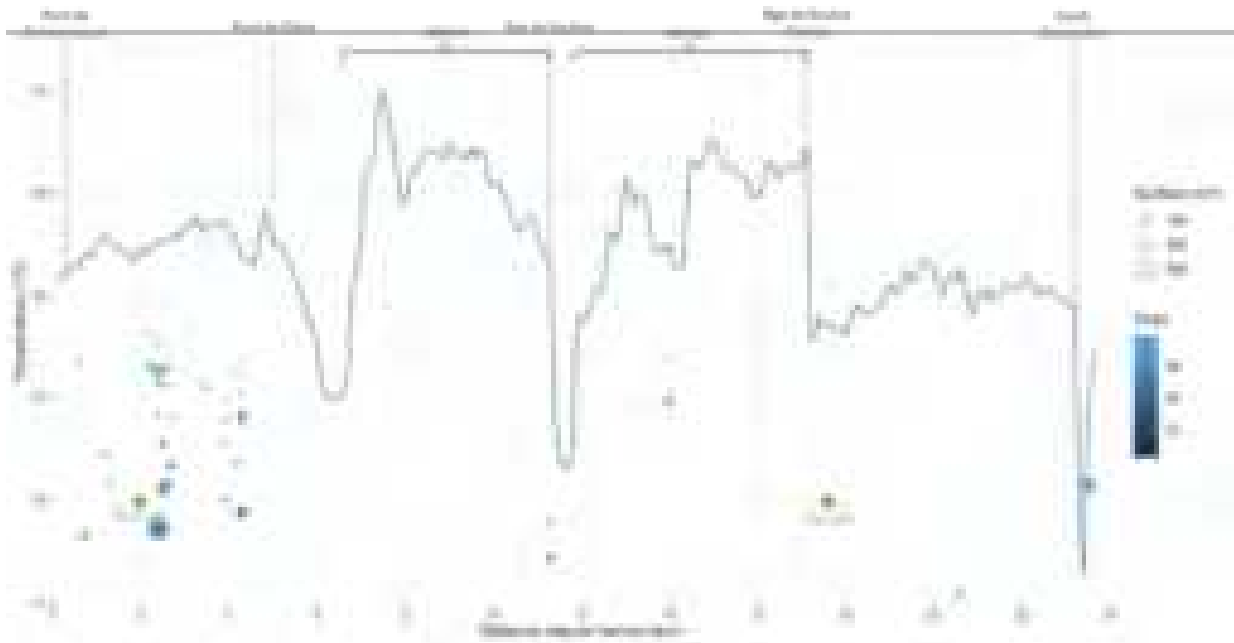


Figure 102 : Profil longitudinal des températures de surface issu de la campagne IRT-a sur le Doubs médian et localisation des arrivées de températures plus froides. Losanges vert = valeurs de température (au fond du lit) obtenues à l'heure du survol sur les 2 sondes thermiques de la FDPPMA25.

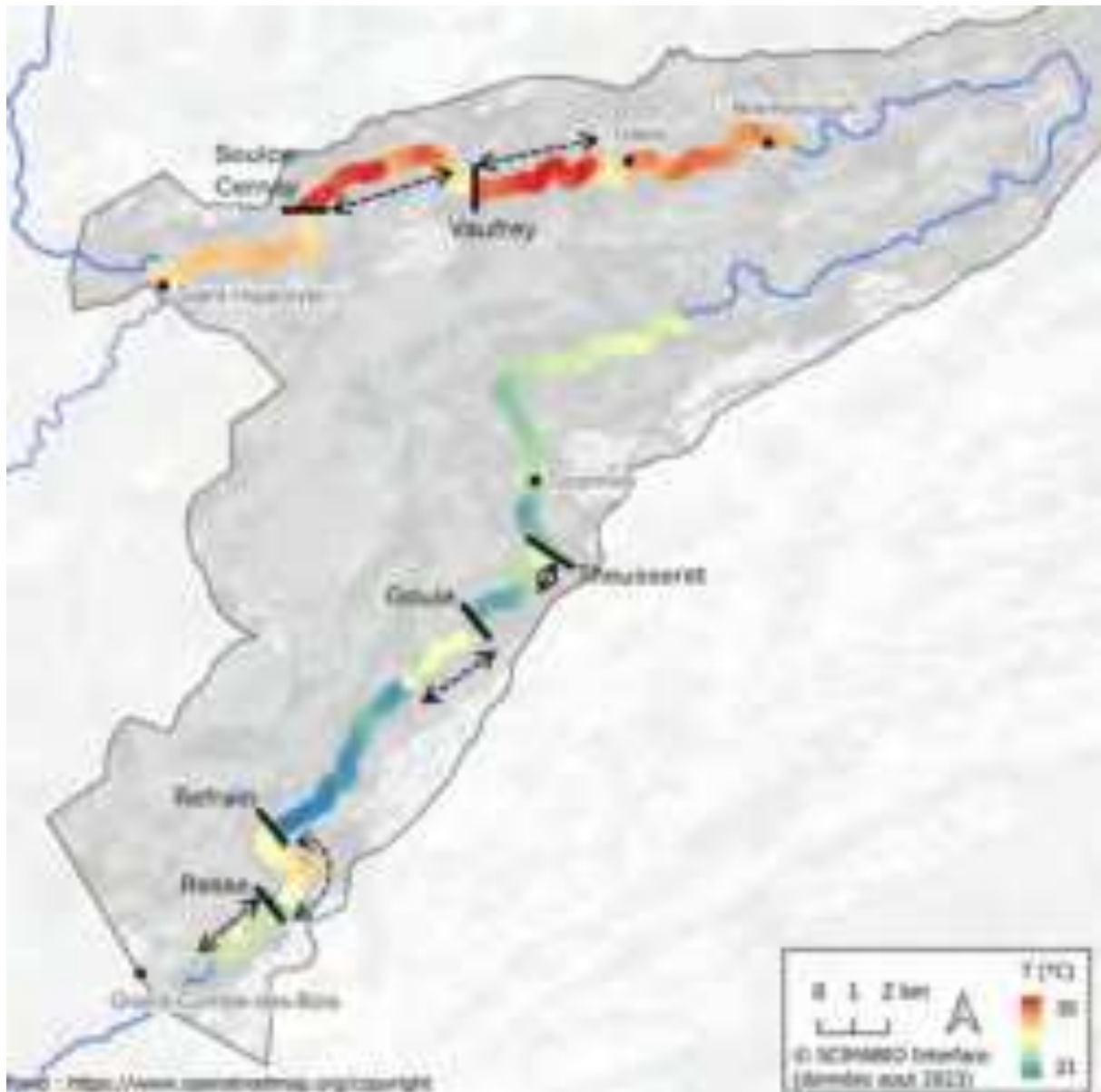


Figure 103 : Carte des températures médianes par tronçon de 100 mètres de rivière obtenues sur le Doubs amont et Médian à partir des données IRT-a.

Afin d’illustrer l’importance de l’impact des retenues sur ces tronçons du Doubs, la modification du profil en long du Doubs amont et médian par les aménagements hydroélectriques successifs est présentée par la figure 104.



Figure 104 : Profil en long naturel et aménagé du Doubs entre le Saut du Doubs et la confluence du Dessoubre localisant les principaux barrages hydro-électriques. Losange vert = stations de suivi thermiques de la FDPPMA 25. Flèche rouge = emprise de la campagne IRT-a du 23 août 2024.

4.3 Interprétation des « poches froides »

4.3.1 Sur le Doubs amont

Sur le Doubs amont, comme précisé dans le chapitre précédent, aucune arrivée importante d'eau froide ne vient influencer le profil thermique de la rivière et les échanges nappe/riwière sont quasi-inexistants sur les tronçons courants (figure 101).

Des refroidissements artificiels sont observés à l'aval immédiat des 4 barrages provoqués par un phénomène connu de déstratification de l'eau de la retenue et de restitution forcée en un point des échanges hyporhéiques qui n'ont pas pu avoir lieu plus en amont dans la retenue (figure 105).

Ensuite, les autres points plus froids identifiés sur les mosaïques thermiques sont, d'une part, très relatifs car la majorité présentent des amplitudes thermiques minimales avec la température de la rivière, et d'autre part, sont spatialement très limités. Il s'agit de quelques suintements de bancs minimes et très localisés, de la restitution de l'usine du Refrain, de la restitution de la source captée de Blanche Fontaine, de l'exutoire de la source de la Forge et de la confluence du Bief (figure 105).

Les résurgences correspondantes aux traçages karstiques ont bien été identifiées et sont peu nombreuses. Elles correspondent à la source de la Forge, la source du Paten, à la source de Blanche Fontaine et à une résurgence au niveau du bois Banal associée à la source de Blanche Fontaine (figure 106).



Figure 105 : Répartition des « poches froides » identifiées sur le linéaire du Doubs amont en fonction de leur taille (surface en m²) et de la différence de température médiane avec la rivière. Localisation des tracés karstiques connus (données DREAL Bourgogne Franche-Comté).



Figure 106 : Zoom sur les localisations des traçages karstiques connus sur le bassin du Doubs amont (données DREAL Bourgogne Franche-Comté).



Figure 107 : Mosaïque thermique et orthophoto illustrant la baisse des températures observée à l'aval du barrage de la Rasse.



Figure 108 : Mosaïque thermique et orthophoto illustrant la baisse des températures observée à l'aval du barrage du Refrain.

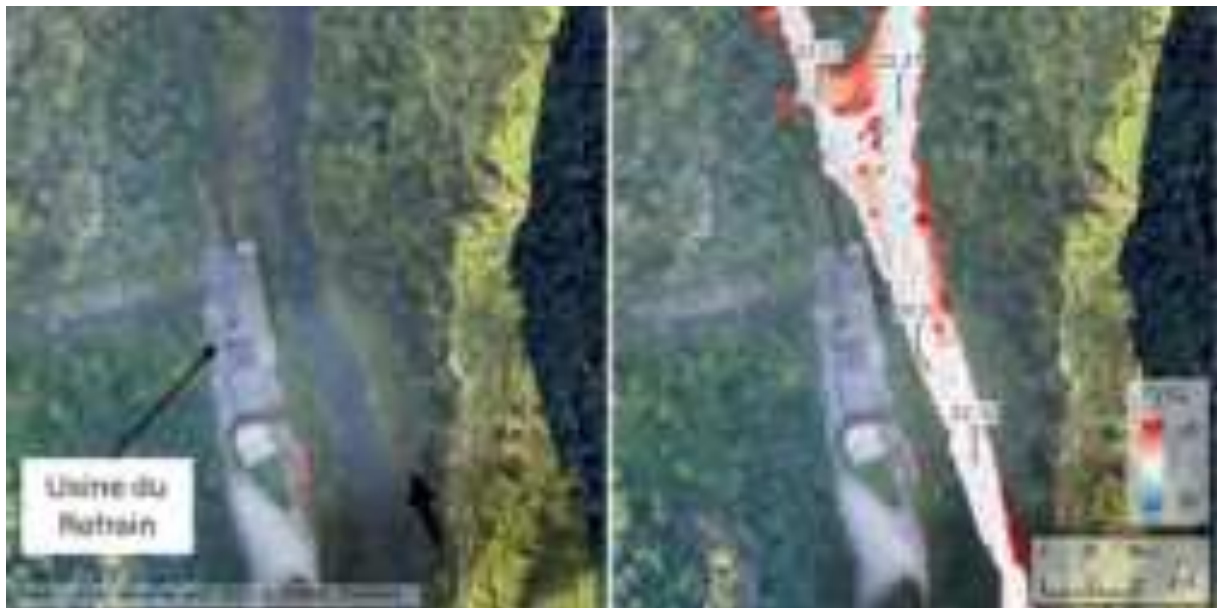


Figure 109 : Mosaïque thermique et orthophoto illustrant une baisse très localisée des températures observée au niveau de l'usine hydro-électrique du Refrain.



Figure 110 : Mosaïque thermique et orthophoto illustrant la légère baisse des températures observée au niveau du barrage de la Goule.

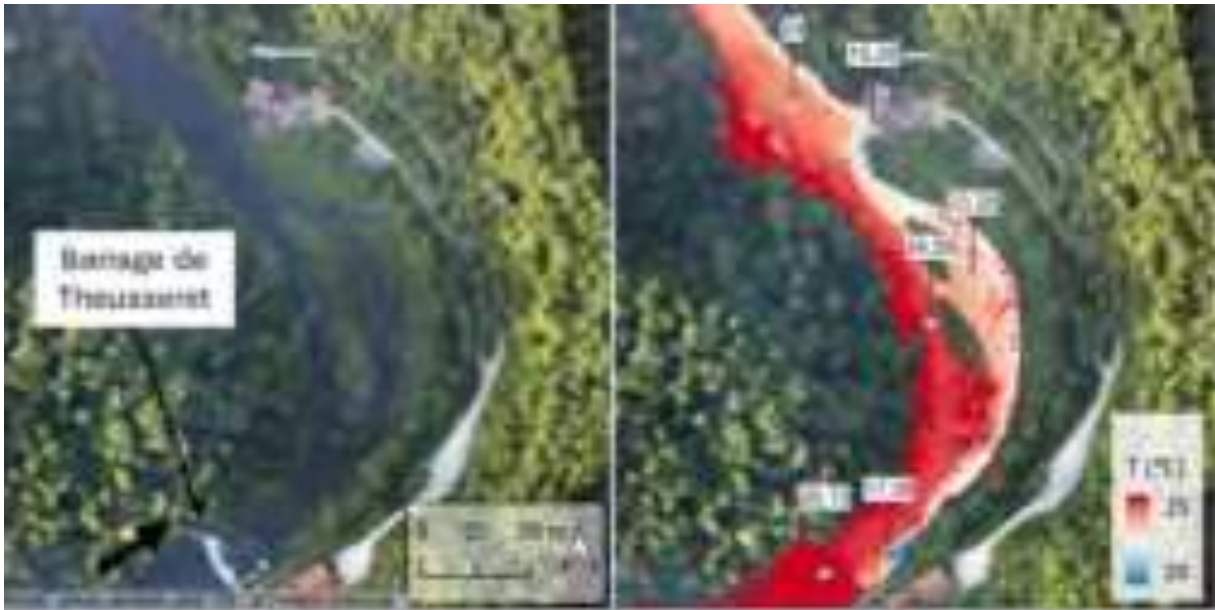


Figure 111 : Mosaïque thermique et orthophoto illustrant les baisses de températures observées localement en rive droite à l'aval du barrage de Theusseret.



Figure 112 : Mosaïque thermique et orthophoto illustrant un suintement latéral en rive gauche (point kilométrique 10.5).

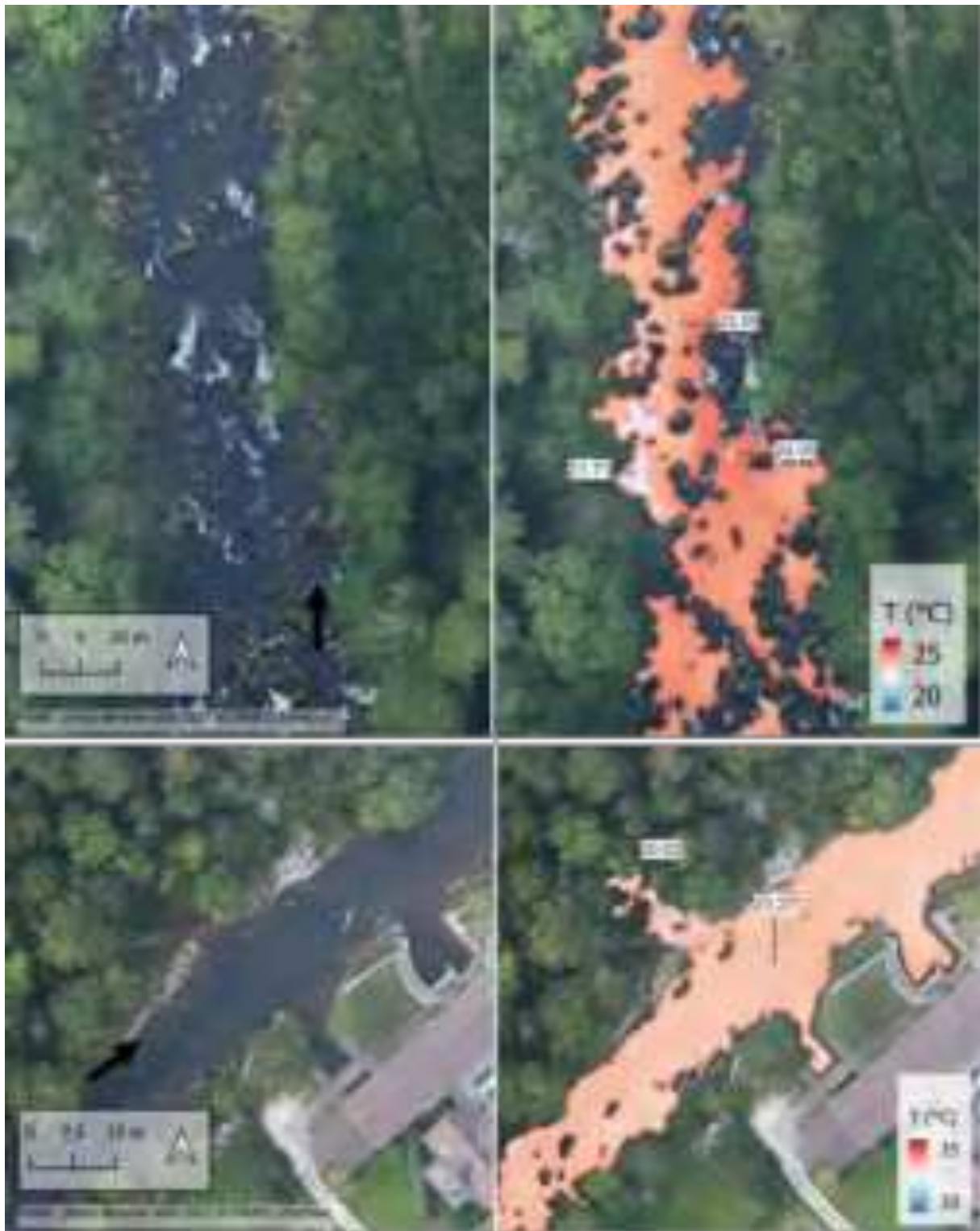


Figure 113 : Mosaïque thermique et orthophoto illustrant des suintements latéraux en rive gauche (haut : point kilométrique 16, bas : point kilométrique 16.2).

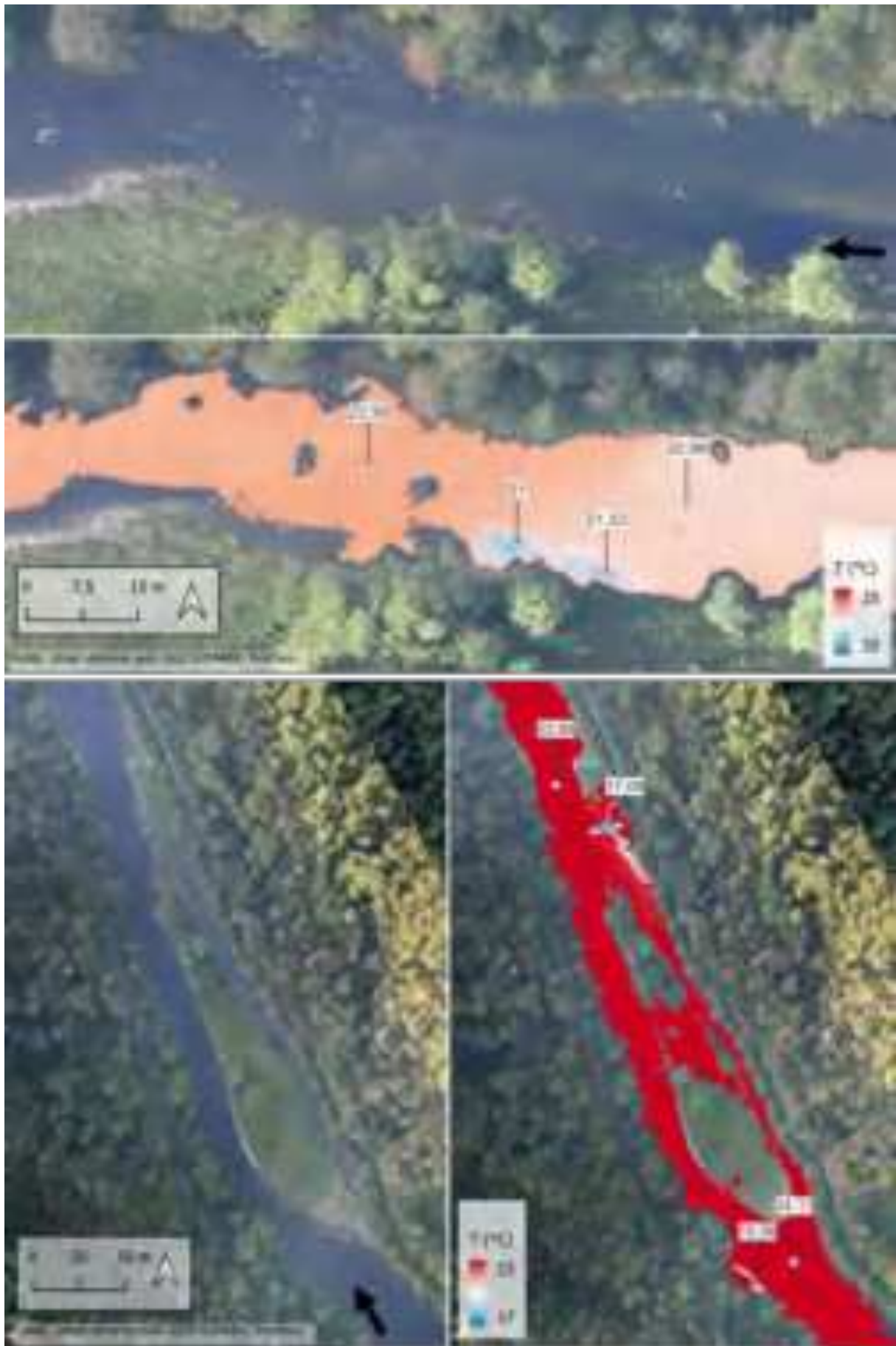


Figure 114 : Mosaïque thermique et orthophoto illustrant des suintements latéraux (haut : point kilométrique 16.8, bas : point kilométrique 22.9).



Figure 115 : Mosaïque thermique et orthophoto illustrant des suintements latéraux (haut : point kilométrique 25, bas : point kilométrique 27.7).



Figure 116 : Mosaïque thermique et orthophoto illustrant des exfiltrations de banc très localisées (haut : point kilométrique 10.8, bas : point kilométrique 19.7).



Figure 117 : Mosaïque thermique et orthophoto illustrant des exfiltrations de banc très localisées (haut : point kilométrique 21.8, bas : point kilométrique 26.9).



Figure 118 : Mosaïque thermique et orthophoto illustrant l'arrivée d'eau plus fraîche observée au niveau de la source de la Forge (point kilométrique 22.5).



Figure 119 : Mosaïque thermique et orthophoto illustrant l'arrivée d'eau plus fraîche observée au niveau du captage AEP de la source de Blanche Fontaine (point kilométrique 24.5).



Figure 120 : Mosaïque thermique et orthophoto illustrant l'arrivée d'eau plus fraîche observée au niveau du Bief de Fuisse (point kilométrique 30.2).

4.3.2 Sur le Doubs médian

Les seuls échanges nappe/rivière identifiés concernent deux petites zones de suintements latéraux en rive droite situées entre Brémoncourt et Glère.

La résurgence connue par traçage de la source de Ronde Fontaine a bien été repérée sur les images IRT mais l'apport d'eau plus froide est sans effet sur la rivière puisqu'il arrive dans la retenue de Soulce-Cernay.

Enfin, une petite arrivée locale d'eau plus froide est visible au niveau de l'affluent de la Forge (figure 121).

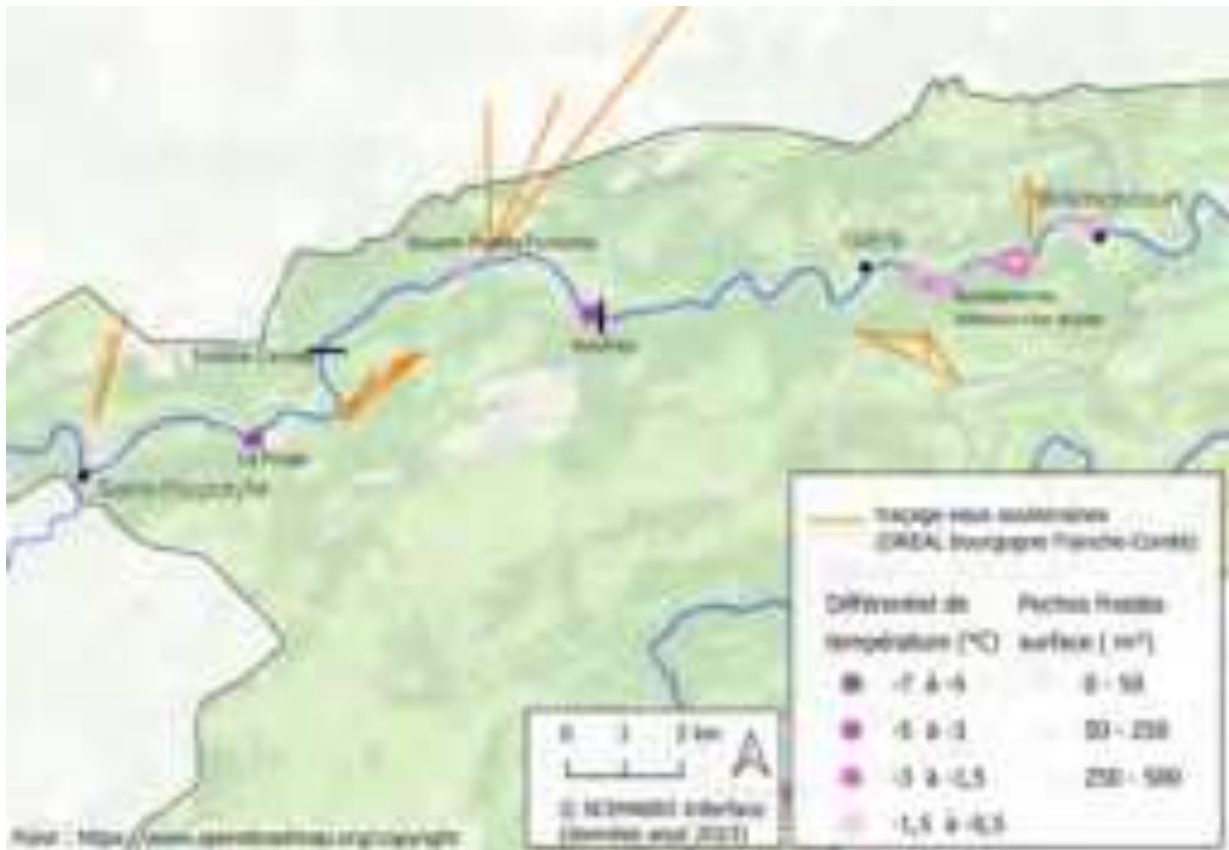


Figure 121 : Répartition des « poches froides » identifiées sur le linéaire du Doubs amont en fonction de leur taille (superficie en m²) et de la différence de température médiane avec la rivière. Localisation des tracages karstiques connus (données DREAL Bourgogne Franche-Comté).



Figure 122 : Mosaïque thermique et orthophoto illustrant les deux zones de suintements latéraux rive gauche observée entre Brémencourt et Glère (haut : point kilométrique 0.8, bas : point kilométrique 2.4).



Figure 123 : Mosaïque thermique et orthophoto du tronçon compris entre les barrages de Vaufrey et de Soulce-Cernay montrant l'emprise de la retenue de Soulce-Cernay et la légère baisse de température à l'aval du barrage de Vaufrey. En bas : zoom sur l'aval du barrage de Vaufrey.



Figure 124 : image thermique et orthophoto sur l'emprise totale montrant l'observation de petite résurgences plus froides au niveau de l'arrivée du traçage de la source de Ronde Fontaine.

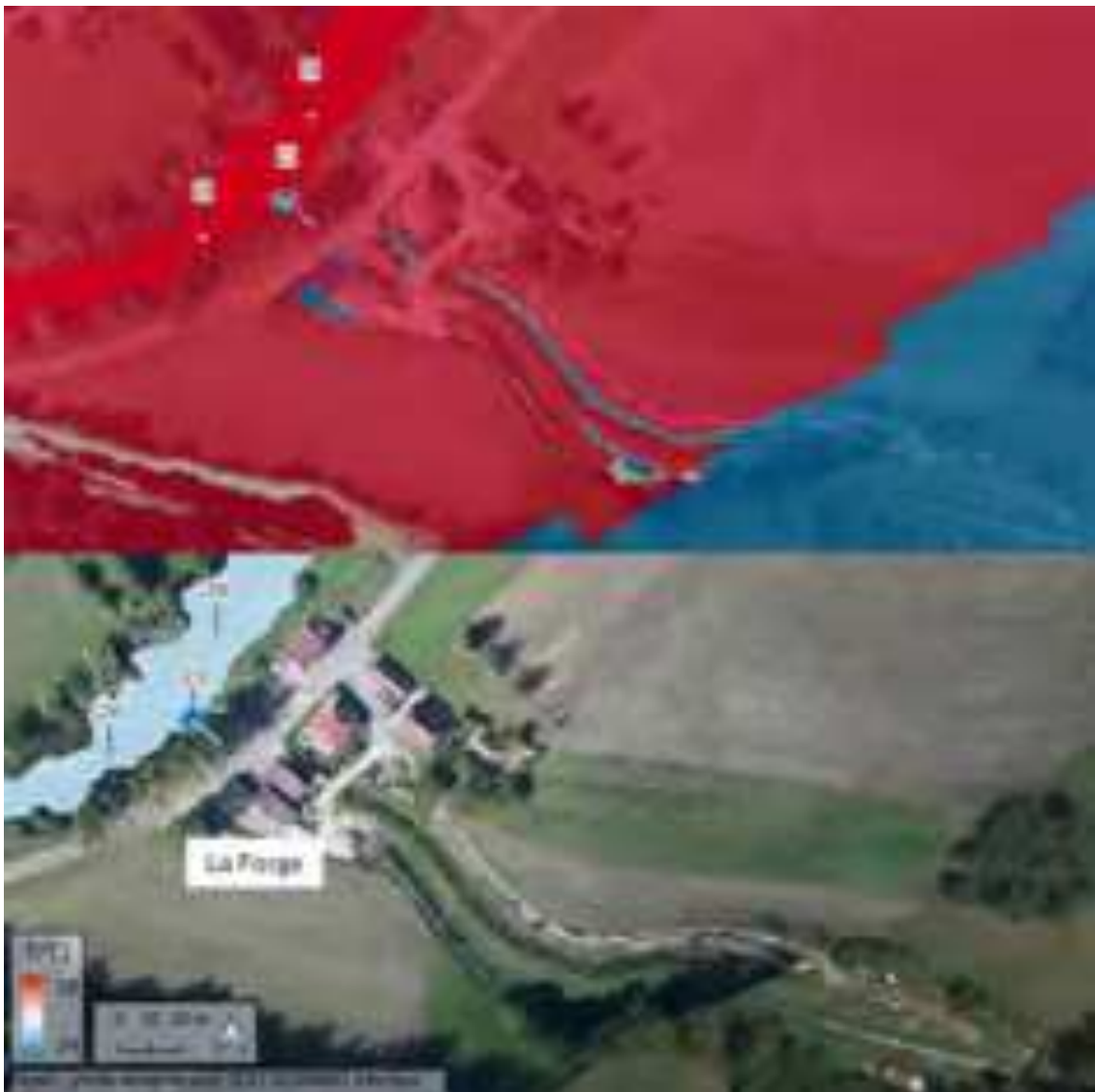


Figure 125 : image thermique sur l'emprise totale (haut) et mosaïque thermique et orthophoto (bas) illustrant l'arrivée d'eau plus froide observée au niveau de la source de la Forge.



Figure 126 : mosaïque thermique et orthophoto de la confluence Doubs - Dessoubre.

4.1 Variations spatio-temporelles des habitats thermiques vis à vis des salmonidés sur le Doubs amont

Pour interpréter les conditions d'habitat thermique sur le Doubs amont vis-à-vis des salmonidés, les données spatiales obtenues par IRT-a ainsi que les données temporelles collectées par les sondes thermiques de la FDPPMA 25 au cours de l'été 2023 ont été confrontées aux exigences écologiques de la truite commune.

Comme expliqué dans le §1.2 (page 6), le survol IRT en 2023 a été réalisé dans des conditions critiques de température et de débit. Les données ont été collectées lors d'une journée les plus chaudes de l'été et aux débits d'étiages les plus bas. Ces conditions hydro-climatiques particulières n'ont duré que 3 jours pendant l'été 2023. Ainsi, la répartition spatiale des habitats thermiques vis-à-vis des salmonidés obtenus par IRT représente les conditions les plus impactantes mais n'est pas représentative des conditions moyennes observées au cours de l'ensemble de l'été.

D'après la campagne IRT-a, les températures de surface le jour du survol sont défavorables à très défavorables sur la totalité du linéaire puisque toutes les températures médianes se situent au-dessus de 22°C (figures 127 et 128, tableau 4). Plus de 37% du linéaire dépasse le seuil légal de 25°C (tableau 4).



Figure 127 : Linéaire des exigences thermique de la truite commune et localisation des sondes thermiques de la FDPMA25 utilisées pour l'analyse temporelle des conditions thermiques.

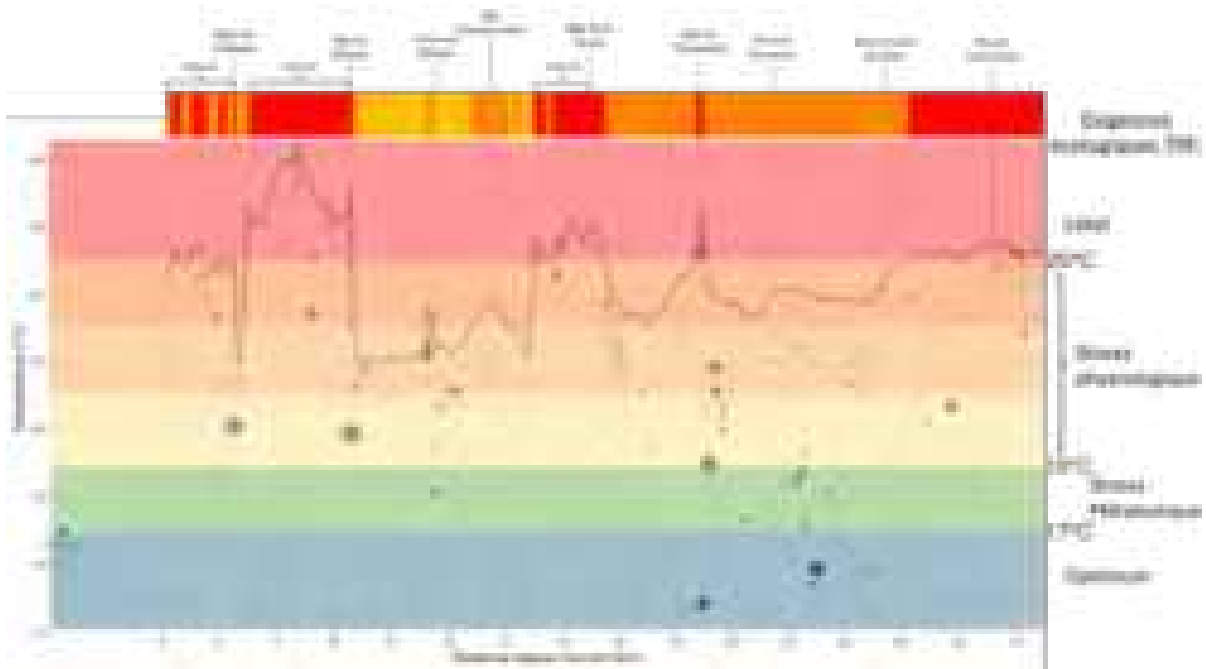


Figure 128 : Confrontation du profil thermique obtenu par IRT-a aux exigences thermiques de la truite commune et retranscription en code barre des exigences le long du linéaire du Doubs amont.

≤17°C	Optimum	0,0%	
17-19°C	Stress métabolique	0,0%	
19-21°C	Stress physiologique	0,0%	57,7%
21-23°C		13,8%	
23-25°C		43,9%	
>25°C	Létal	37,4%	

Tableau 4 : Pourcentages du linéaire du Doubs amont correspondant aux différentes exigences thermiques de la truite commune calculés à partir des températures médianes par tronçon de 100m.

En réalité, les conditions thermiques au cours de l'été, étudiées à partir des sondes thermiques apparaissent plus favorables aux salmonidés que celles obtenues par IRT au cours des heures les plus chaudes de la journée et lors des 3 jours les plus chauds (figure 129).

Ainsi, la sonde Doubs 23 montrent des valeurs majoritairement dans l'optimum des salmonidés, inférieures à 17°C. La période la plus défavorable se situe entre le 12 et le 26 août 2023 avec des valeurs pouvant être jusqu'à 50% du temps au-dessus du seuil de 19°C. Cependant, au cours de cette période, les températures redescendent en dessous de 19°C pendant plusieurs heures consécutives au cours de la journée (figure 130).

La sonde Doubs 25 présente une majorité de temps au-dessus de 17°C. Entre le 12 et le 26 août 2023, les durées au-dessus de 19°C représentent 80 à 100% du temps ce qui représente des conditions nettement défavorables pour les salmonidés (figure 130).

La sonde Doubs 27 montre que sur l'aval du secteur étudié, les conditions thermiques deviennent très problématiques pour les salmonidés avec une majorité du temps pendant l'été au-dessus de 19°C. Pendant 15 jours consécutifs, entre le 12 et le 26 août 2023, les températures ne redescendent jamais en dessous de 19°C et atteignent même le seuil de 25°C pendant plusieurs heures (figure 130).

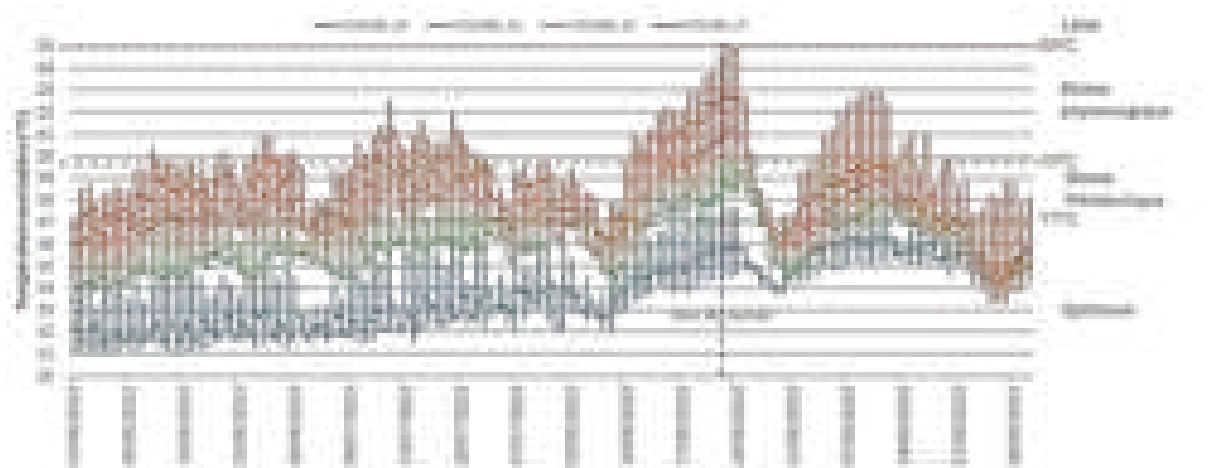


Figure 129 : Variations horaires des températures d'eau du Doubs amont au niveau de 4 stations de suivi thermique du 01 juin au 30 septembre 2023 (données FDPMA25).

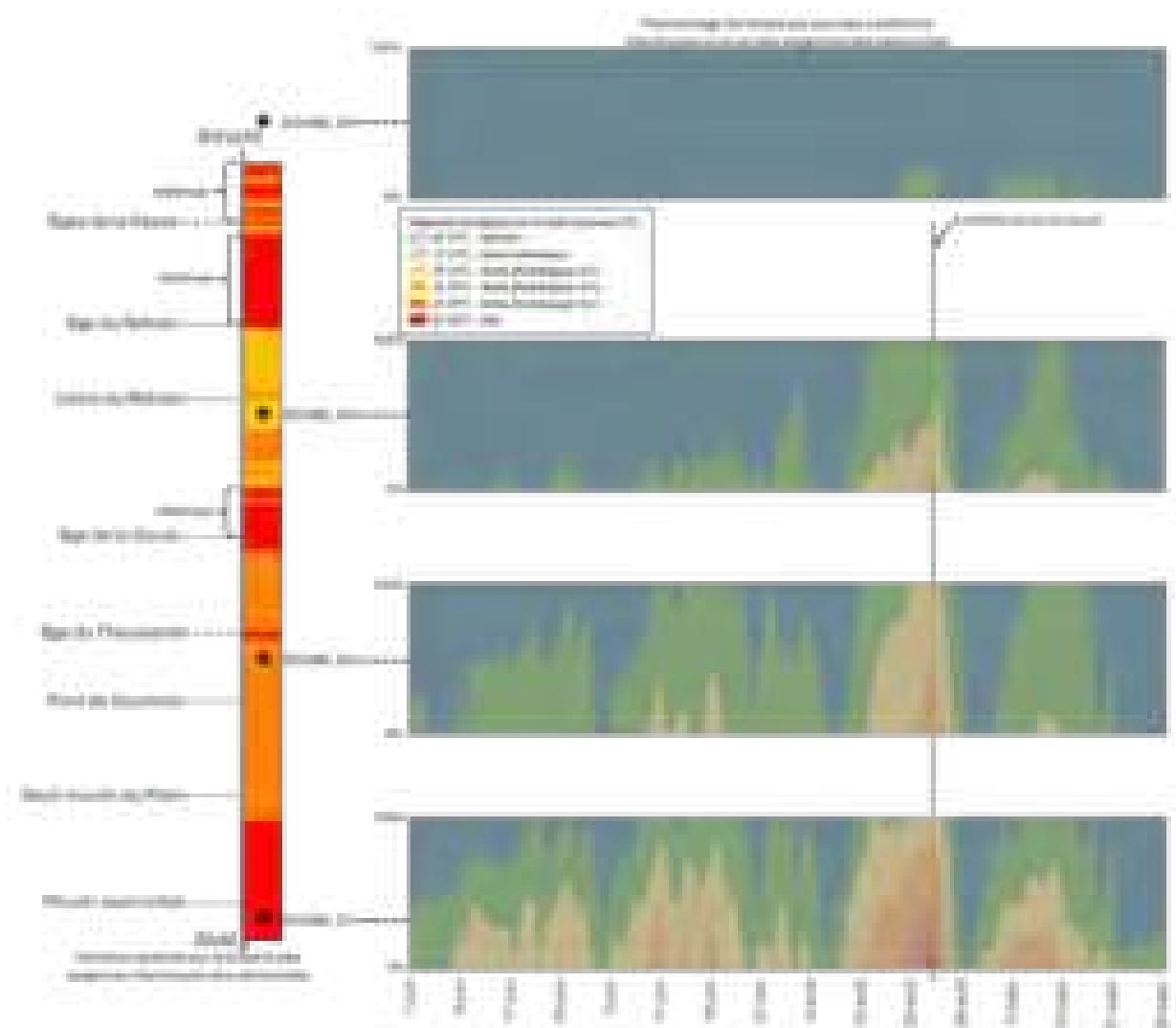


Figure 130 : Répartition spatiale à partir de l'imagerie IRT et temporelle pendant l'été à partir des 4 stations de suivi thermique utilisée (données FDPMA25) des différentes plages d'exigence thermique définies pour les salmonidés.

5. SYNTHÈSE

Conditions d'acquisition des cartographies thermiques

Il est important de rappeler que le survol a été réalisé au cours des jours les plus chauds de l'été 2023 et au moment où les débits d'étiages étaient les plus sévères. Les conditions hydro-climatiques observées le jour du survol ne se sont répétées que 3 jours sur les 4 mois d'été de juin à septembre. Les conditions d'acquisition ont donc été optimales pour repérer les contrastes thermiques au sein des rivières et ainsi identifier les arrivées d'eau plus froides. Elles ont permis aussi de caractériser la période la plus critique pour les habitats thermiques vis-à-vis des salmonidés. Ainsi les conditions thermiques décrites par IRTa correspondent aux périodes les plus défavorables pour les salmonidés mais ne sont pas représentatives des conditions moyennes observées pendant l'ensemble de la période estivale. Les données stationnelles collectées par les réseaux de sondes thermiques existants ont permis de compléter la cartographie thermique par des données temporelles.

Le Cusancin

Sur le Cusancin, 7 zones d'échauffement (anomalies thermiques chaudes) ont été identifiées dont les causes principales sont :

- les obstacles formant des remous hydrauliques comme le seuil de la Taillanderie, le seuil de Pont-les-Moulins et le barrage des Pipes.
- Les zones lenticules provoquées par des successions de nassis naturels ou réaménagés présentant en plus une lacune en ripisylve ce qui accentue l'échauffement par le rayonnement solaire.

De nombreuses poches froides ont été identifiées témoignant d'un fonctionnement hydromorphologique satisfaisant avec l'existence de nombreux échanges nappe/rivière et d'apports karstiques essentiels. Quatre zones de refroidissement majeures ont pu être identifiées en aval de Cusance (apports d'eaux souterraines), à l'aval immédiat des seuils de la Taillanderie et de Pont-des-Moulins (apports hyporhéiques) et au niveau de la résurgence de la Refroidière (apports d'eaux souterraines).

Concernant les conditions d'habitats thermiques vis-à-vis des salmonidés, ceux-ci sont nettement plus défavorables sur la moitié aval du cours d'eau, à partir de Pont-les-Moulins, alors qu'ils restent dans le préférendum sur la moitié amont. Plusieurs poches froides pouvant jouer un rôle de refuges thermiques ponctuels mais essentiels ont été localisés sur cette partie aval plus défavorable. Dans tous les cas, la moitié amont représente un refuge climatique majeur pour permettre aux salmonidés de faire face aux évolutions de la température d'eau provoquées par les changements climatiques.

En termes de propositions sur le Cusancin, il peut être envisagé les actions suivantes :

- Protéger les poches froides essentielles pouvant servir de refuges thermiques sur la moitié du linéaire aval (protection réglementaire en application de l'article L.432-3 du code de l'environnement) ;
- Travailler sur la restauration du lit, en démantelant les obstacles à l'écoulement (barrages) et les seuils successifs (nassis aménagés) pour réduire les faciès lenticules et pour redistribuer les échanges nappe/rivière (éviter l'effet concentration en pied de seuil) ;
- Initier une replantation d'arbres en berge sur les tronçons lacunaires pour créer une ripisylve efficace en termes d'ombrage ;
- Rendre accessibles aux salmonidés le linéaire amont plus favorable en travaillant sur le franchissement en période d'étiage du seuil de Pont-les-Moulins.

Le Dessoubre

La campagne IRTa couplée aux données des sondes thermiques a permis de révéler une information importante sur le fonctionnement hydro-géomorphologique particulier du Dessoubre. Sur la moitié amont de son cours, le Dessoubre bénéficie de petits apports d'eaux souterraines réguliers. Ces apports sont essentiels pour l'écologie de la rivière car elles permettent de limiter le réchauffement de l'eau par les échanges air/eau de surface et ainsi de maintenir une température au fond de la rivière plus fraîche et plus favorable aux salmonidés.

Plusieurs zones d'échauffement ont été recensées dont les principales causes sont :

- Les obstacles provoquant des retenues d'eau (remous hydrauliques) en particulier les seuils de l'Engoulot, de Rosureux, de Belvoir, de Moulin du Bas et des Vieux-Moulins ;
- L'absence d'échanges nappe/ri vière sur 4 tronçons présentant des linéaires assez longs, entre 1 et 2km ;
- La confluence de la Réverotte qui apporte une eau plus chaude que celle du Dessoubre.

Onze zones de refroidissements majeurs ont été localisées. Ces refroidissements sont générés grâce aux poches froides présentes en quantité sur la moitié du linéaire amont (apports de fond ou résurgences latérales), aux apports hyporhéiques qui ressortent en aval des ouvrages et à des sources karstiques déjà connues (sources des 3 pucelles, de Froidefontaine et Bief de Brand associé à la pisciculture de Fleurey).

Les températures observées au fond de la rivière, contrairement à celles de surface, restent favorables pour les salmonidés pendant toute la période estivale sur la partie amont du Dessoubre, jusqu'à environ Rosureux, uniquement grâce aux nombreux apports d'eau froide dont bénéficie le cours d'eau. Sans ces apports essentiels, les habitats thermiques seraient nettement plus défavorables pour les salmonidés dès l'amont du cours d'eau. A l'aval de Rosureux, les températures de surface dépassent systématiquement les 21°C et même 25°C en aval de Pont-Neuf et les températures de fond montrent des durées importantes au-dessus du seuil de 19°C.

La qualité des habitats thermiques sur le Dessoubre peut être améliorée par les propositions suivantes :

- Limiter les prélèvements dans la ressource en eau, en particulier sur l'ensemble des nappes et apports karstiques de la moitié amont afin de protéger les apports d'eau froide existants qui apparaissent comme essentiels pour la vie salmonicole ;
- Protéger les refuges thermiques recensés en classant les linéaires de rivières précisément identifiés dans l'étude (protection réglementaire en application de l'article L.432-3 du code de l'environnement) ;
- Restaurer le lit et ses abords sur les linéaires artificialisée et démanteler chaque fois que possible les obstacles à l'écoulement (barrages et seuils) afin de réduire les zones d'échauffement ;
- Assurer, en période d'étiage estival, la libre circulation des salmonidés vers le linéaire amont plus favorable thermiquement.

Le Doubs amont et médian

Les profils thermiques longitudinaux du Doubs amont et médian sont totalement artificialisés par la présence des aménagements hydroélectriques. Ainsi, dès l'amont, les retenues des barrages constituent des anomalies thermiques chaudes provoquant un échauffement important de l'eau, avec des valeurs au-delà de 25°C. Ce réchauffement de l'eau perdure sur l'ensemble du linéaire étudié. Aucun refroidissement conséquent n'a été identifié. D'une part, les eaux restitués à l'aval des barrages

ou des usines présentent des températures moins chaudes que celles des retenues mais restent dans des valeurs élevées comprises entre 22°C et 24°C. D'autre part, aucune résurgence d'eau froide naturelle importante n'a été identifiée. Seuls de petits suintements latéraux ou exfiltrations de banc très localisés ont été repérés, mais ces derniers n'exercent aucune influence sur le profil thermique de la rivière et leur superficie n'est pas suffisante pour jouer un rôle de refuge thermique pour les salmonidés.

Le seul tronçon qui semble encore présenter des conditions thermiques acceptables pour les salmonidés se situent entre l'usine du Chatelot en amont (restitution des eaux du barrage du Chatelot) et la retenue de la Rasse en aval. Cependant sur ce secteur, la retenue de la Rasse vient réduire de plusieurs kilomètres l'habitat thermique des salmonidés.

En raison de l'artificialisation du profil thermique du Doubs par les aménagements hydroélectriques, seules les actions destinées à réduire l'impact des barrages et des retenues et à créer des refuges thermiques peuvent apporter un gain thermique significatif.

A moyen terme, deux niveaux d'actions complémentaires peuvent être proposées :

- La suppression des retenues du barrage de Theusseret et de la Rasse permettrait une première amélioration sur les tronçons amont et aval du Doubs amont, ce qui augmenterait de plusieurs kilomètres le linéaire favorable aux salmonidés. D'une part, le remous hydraulique formé par le barrage de Theusseret provoque une augmentation brutale de la température de 2°C et modifie les écoulements hyporhéiques évitant des apports d'eau froides sur le linéaire. L'enlèvement de cette retenue entraînerait un effet bénéfique sur le profil thermique sur environ 2km. D'autre part, la retenue de la Rasse réduit fortement le linéaire favorable aux salmonidés ; le remous thermique provoque une augmentation de l'ordre de 8°C faisant passer la température de l'eau de 17°C à 25 °C. La suppression de cette retenue permettrait de retrouver un profil « rivière » sur environ 4 km avec des conditions d'habitats physiques et thermiques favorables aux salmonidés.
- La création de plusieurs refuges thermiques « artificiels » pour les salmonidés sur le linéaire situé entre le barrage de Theusseret et la frontière Suisse semble être la seule solution pour limiter l'impact de l'échauffement de l'eau sur la faune piscicole. La création de nouveaux refuges thermiques sur des secteurs lacunaires permettant de compenser la perte des apports naturels est actuellement en pleine réflexion dans la littérature scientifique et des premiers tests ont vu le jour très récemment sur des sites pilotes en Amérique du Nord (Kurylyk et al. 2015, K. Smith 2023). Dans cet esprit, une réflexion peut être initiée pour étudier la possibilité de créer des forages en nappe profonde et de restituer temporairement à la rivière des eaux plus froides en période critique pour améliorer les conditions thermiques vis-à-vis des salmonidés.

6. RÉFÉRENCES CITÉES

- 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.
- 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.
- Isaak, D.J. and Young, M.K., 2023. Cold-water habitats, climate refugia, and their utility for conserving salmonid fishes. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 80(7), pp.1187-1206.
- Kurylyk BL, Macquarrie KTB, Linnansaari T, Cunjak RA, Curry RA. 2015. Preserving, augmenting, and creating cold-water thermal refugia in rivers: Concepts derived from research on the Miramichi River, New Brunswick (Canada). *Ecohydrology* 8 : 1095–1108. DOI: 10.1002/eco.1566.
- Marteau B, Michel K, Piégay H. 2022. Can gravel augmentation restore thermal functions in gravel-bed rivers? A

need to assess success within a trajectory-based before–after control–impact framework. *Hydrological Processes* 36 : 1–21. DOI: 10.1002/hyp.14480.

Smith, K. A., O'Sullivan, A. M., Kennedy, G., Benz, S. A., Somers, L. D., & Kurylyk, B. L. 2023. Shallow groundwater temperature patterns revealed through a regional monitoring well network. *Hydrological Processes*, 37(9), e14975.

Sullivan CJ, Vokoun JC, Helton AM, Briggs MA, Kurylyk BL. 2021. An ecohydrological typology for thermal refuges in streams and rivers. *Ecohydrology* 14 : 1–15. DOI: 10.1002/eco.2295.

Vollmer M, Möllmann K-P. 2018. *Infrared Thermal Imaging - Fundamentals, Research and Applications* . 2nd Edition. Vollmer M and Möllmann K-P (eds). Wiley-VCH, Weinheim, Germany : 769p.