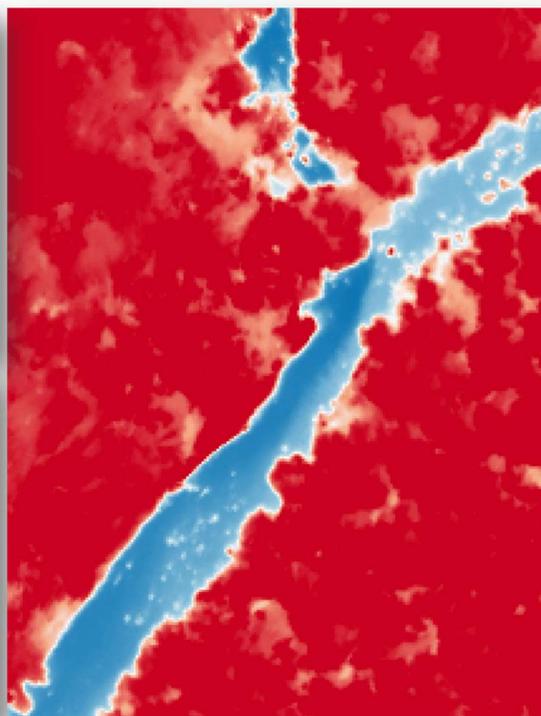


Cartographie et caractérisation des habitats thermiques de l'Allondon sur le canton de Genève

Rapport final



Synthèse des résultats et rapport final

Rédaction	Décembre 2022	Baptiste Marteau (SCIMABIO Interface, EVS) Alexandre Richard (SCIMABIO Sàrl)
Relecture	Décembre 2022	Dimitri Jaquet (Office Cantonal de l'Eau) Alexandre Wisard (Office Cantonal de l'Eau)
Correction	Mai 2023	Baptiste Marteau (SCIMABIO Interface, EVS) Alexandre Richard (SCIMABIO Sàrl)
Validation	Juin 2023	-

Citation : Marteau B. & Richard A., 2023. Cartographie et caractérisation des habitats thermiques de l'Allondon sur le canton de Genève : synthèse des résultats et rapport final. *Rapport de projet, Office Cantonal de l'Eau de Genève*, 48p.

TABLE DES MATIERES

1.	Contexte général de l'étude	6
2.	Site d'étude et contextualisation.....	7
3.	Etude thermique estivale 2022.....	8
3.1	Matériels	8
3.2	Méthodes.....	9
3.2.1	Reconstruction des chroniques manquantes	9
3.2.2	Sélection des refuges potentiels	9
3.2.3	Autres jeux de données utilisés.....	10
3.3	Résultats	12
3.3.1	Conditions météorologiques	12
3.3.1	Hydrologie de l'été 2022	13
3.3.2	Analyse des chroniques de l'été 2022	14
3.3.3	Refuges thermiques potentiels 2022	16
4.	Cartographie thermique par IRT-a de l'Allondon.....	20
4.1	Description de la méthode.....	20
4.2	Description de la campagne.....	21
4.3	Résultats	22
4.3.1	Diversité thermique de la rivière en période estivale	22
4.3.2	Profil longitudinal de température.....	23
4.4	Détection des poches froides.....	26
4.5	Interprétation hydrogéologique et hydromorphologique des résultats.....	31
5.	Mise en relation avec les données biologiques	33
5.1	Présentation des données piscicoles	33
5.1.1	Résultats des comptages en plongée 2022	34
5.1.2	Intégration des données de plongée pluriannuelles	35
5.1.3	Prospections par pêches électriques 2022.....	37
5.2	Confrontation des données biologiques aux données thermiques	39
6.	Discussion & Conclusion	42
6.1	Enseignements principaux de la cartographie IRT-a	42
6.2	Interprétation biologique des résultats	42
6.3	Le secteur des Feuilletières : un point stratégique sous-évalué ?.....	43
6.4	Perspectives de gestion et de conservation.....	44
7.	Références bibliographiques	47

Photo page de garde : photo du refuge thermique du Crettaz (mai 2022, ©SCIMABIO), photo d'un ombre commun (<https://www.federation-peche-allier.fr/project/ombre-commun/>), et image thermique de la confluence de l'Allemogne avec l'Allondon (juillet 2022, ©SCIMABIO).

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Carte de localisation des stations de mesure de la température sur l'Allondon.....	7
Figure 2. a) Thermographe HOBO Pendant® utilisé dans cette étude, b) installation d'un capteur dans son étui de protection PVC, c) arrimage du capteur et de son étui sur un bloc en béton et d) fixation de l'ensemble à la berge à l'aide d'un câble métallique (Photos SCIMABIO Interface©, 2021).....	9
Figure 3. Moyenne mensuelle des températures journalières de l'air à la station de Cointrin, ainsi que les valeurs relevées pour les années 2021 et 2022. Données de janvier 2018 à juin 2022 validées, mais données de juillet à octobre 2022 brutes et non validées (Source : MétéoSuisse).	12
Figure 4. Statistiques des températures estivales (juillet-septembre) de l'eau (à gauche) et de l'air (à droite) des années 2018 à 2022 qui caractérisent les conditions thermiques de l'Allondon (Limites des boîtes à moustaches : D10, D25, médiane, D75 et D90 des valeurs de température journalière).....	12
Figure 5. Chroniques de débit (station de Dardagny) et de température de l'eau de l'Allondon (station de Moulin Fabry) sur la période avril-septembre 2022. Les lignes verticales symbolisent le jour où les différentes campagnes d'acquisition de données ont eu lieu.....	13
Figure 6. Chroniques de température de l'Allondon durant l'été 2022. a) Température instantanée (horaire) ; b) température moyenne journalière et c) boîte à moustaches représentant les statistiques des températures instantanées, sur les 5 stations de suivi (Moulin Fabry, Les Granges, Aval du Roulave, et Les Iles dans l'ordre amont-aval, et l'Allemagne).	15
Figure 7. Photographies et représentations des refuges thermiques potentiels équipés en 2022 (Crédit : SCIMABIO, 2022).16	
Figure 8. Orthophoto (gauche) et mosaïque thermique (droite) du panache en rive droite généré par un bras latéral au niveau du secteur de Crettaz. La flèche désigne l'emplacement de la sonde, tandis que le panache froid est visible depuis le bloc vers l'aval.	17
Figure 9. Caractérisation thermique des refuges instrumentés durant l'été (juillet-septembre en 2021 (figures a) et c) et 2022 (figures b) et d)). Les figures a) et b) présentent les températures absolues, tandis que c) et d) présentent les températures relatives à la rivière à la station de suivi la plus proche (voir Figure 1).	18
Figure 10. A) Eurocopter EC120 ayant servi au survol. B) Capteurs optique et thermique installés sur le côté de l'hélicoptère pour la prise de vue aéroportée. (Crédit : Helimap CH©).	21
Figure 11. Relation entre la température radiante (issue des images thermiques) et la température réelle de la rivière (issue des thermographes), enregistrées pendant le survol.....	21
Figure 12. Histogramme de distribution des pixels de température sur la rivière Allondon issus de la campagne IRT-a de juillet 2022. La température médiane observée le 14 juillet 2022 est de 21,2°C. Données sur l'optimum de l'ombre commun issues de (Küttel et al., 2002).	22
Figure 13. Carte des températures médianes représentées le long de la ligne centrale du chenal actif. Les flèches noires représentent les secteurs pour lesquels les gradients thermiques ont été calculés.	24
Figure 14. Profil longitudinal de température issu de la campagne IRT-a. Les points rouges représentent les affluents (leur positionnement en y reflétant leur température à l'exutoire) et les points bleus représentent les thermographes utilisés pour la validation des images thermiques (cf. Figure 11). Les valeurs de gradients thermiques sont données pour les secteurs représentés par les flèches grises.	25
Figure 15. Orthophoto (à gauche) et mosaïque thermique (à droite) illustrant l'échauffement observé en amont des Feuilletières.....	25
Figure 16. Orthophoto (à gauche) et mosaïque thermique (à droite) du secteur en amont des Feuilletières illustrant l'émergence du chenal latéral phréatique le long de la marge alluviale. Lorsque ce chenal rejoint l'Allondon, il génère une chute brusque de la température (-3,0°C).	26
Figure 17. Distribution des taches froides recensées sur le linéaire étudiée de l'Allondon. La taille des cercles reflète la superficie visible sur les images des taches froides, et leur positionnement sur l'axe-y représente la température médiane de la tache froide.	27
Figure 18. Nomenclature utilisée pour la classification hydromorphologique de tache froide. (Source :modifiée et traduite de Sullivan et al. (2021), construite à partir des classifications proposées par Torgersen et al. (2012), Dugdale et al. (2015), Marteau et al. (2022)). Une illustration sur des images thermiques de cette nomenclature est proposée en Annexe 1.....	27
Figure 19. Différentiel thermique des poches froides recensées sur l'Allondon par IRT-a, classées selon la nomenclature présentée en Figure 19.....	28

Figure 20. Localisation de la « source » recensée sur l’Allondon, qui représente une exfiltration d’eau froide au milieu d’un banc alluvial en aval du lieu-dit des Feuilletières. 29

Figure 21. Orthophoto (à gauche) et mosaïque thermique (à droite) illustrant le panache généré par la confluence de l’Allemogne avec l’Allondon. 29

Figure 22. Orthophoto (à gauche) et mosaïque thermique (à droite) illustrant le panache généré par la confluence de du chenal latéral de Crettaz avec l’Allondon. 30

Figure 23. Distribution longitudinale des taches froides cartographiées par IRT-a, et classification de ces taches, basée sur la nomenclature précédente (Figure 18). 31

Figure 24. Profil altitudinal de l’Allondon avec représentation des secteurs d’infiltration et d’exfiltration de nappe issue du rapport d’hydrogéologie (Hottinger, 1998). 32

Figure 25. Largeur des structures alluviales de la bande active de l’Allondon. Données issus de la classification des orthophotos à haute résolution. 33

Figure 26. Représentation graphique des effectifs d’ombres communs recensés sur l’Allondon par GREN entre 2008 et 2022. 34

Figure 27. Distribution longitudinale des poissons observés lors des comptages en plongée de 2022. Les effectifs d’ombres sont subdivisées en adultes, sub-adultes et juvéniles selon les critères proposés par GREN dans leur rapport (GREN, 2022). La zone grisée représente le secteur non prospecté en plongée 35

Figure 28. Histogramme des densités moyennes annuelles et modèle d’abondance des différentes classes de taille issues des données de comptage en plongée. Le graphique du bas reprend les 3 modèles d’abondance issus de l’analyse des données estivales de 2008 à 2022. Le secteur grisé représente la zone d’étude couverte par la campagne IRT-a mais qui ne fait pas partie du secteur couvert par les comptages en plongée..... 36

Figure 29. Localisation des stations de pêches électriques réalisées en 2022. 1- Parking Baillets (longueur de la station = 92m), 2- Aval Baillet (57m), 3- Amont pont de Russin (182m), 4- Les Moulins (110m)..... 37

Figure 30. Localisation des stations de pêches électriques de juillet 2022 sur le profil de température IRT-a de juillet 2022. La taille des carrés noirs numérotés de 1 à 4 reflète la longueur des secteurs prospectés. La taille des cercles verts et rouges reflète la densité de poissons inventoriés sur ces secteurs (en nb/100m linéaire) en un unique passage. 38

Figure 31. Nombre et répartition des ombres (stades adultes, sub-adultes et juvéniles), truites (tous stades confondus) et barbeaux fluviatiles (tous stades confondus) observés lors des plongées de juin et d’octobre 2022, projetés sur le profil longitudinal de température issu de la campagne IRT-a de juillet 2022. 40

Figure 32. Modèles d’abondance des 3 classes de taille de l’ombre commun projetés sur le profil longitudinal de température issu de la campagne IRT-a. La flèche noire et le point d’interrogation font référence à l’hypothèse de différence de sensibilité thermique des juvéniles et des adultes pour expliquer l’écart des modèles d’abondance (voir texte). 41

Figure 33. Orthophotos de 2020 (à gauche) et 2022 (à droite) sur secteur des Feuilletières. Le point rouge montre l’emplacement de la sonde lors des suivis de 2021 et 2022. 44

Figure 34. La présence d’un bloc en amont de la confluence du chenal du Crettaz semble générer un élargissement du panache vers le milieu de la rivière. 45

Figure 35. Proposition de « restauration » de refuge thermique par la pose de déflecteurs (blocs, troncs) à la confluence d’un affluent pour augmenter la taille de la poche froide (Source : Kurylyk et al., 2015)..... 45

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Preferenda thermiques et seuils de tolérance de température de l’ombre commun et de la truite de rivière (Max. : limite maximale, Opt. sup. : optimum supérieur, Opt. inf. : optimum inférieur, Min. : limite minimale). 8

Tableau 2. Nom, description et poissons recensés dans les refuges potentiels instrumentés en été 2021 et 2022 (Source : Rapport GREN 2020, « Suivi de la population d’ombres de l’Allondon en 2020 »). Les lignes en vert désignent les refuges potentiels uniquement équipés en 2021, tandis que les lignes en rouge désignent ceux uniquement équipés en 2022. 10

Tableau 3. Statistiques de débits moyens journaliers estivaux (juillet-septembre) de l’Allondon à la station des Granges. 13

Tableau 4. Statistiques de température des 4 stations permanentes mesurée durant les étés 2021 et 2022 (juin – septembre)..... 14

Tableau 5. Comparatif des comptages en plongée de poissons réalisés en 2020, 2021 et 2022 sur les refuges potentiels instrumentés durant l'été 2021 et 2022 pour cette étude. (ID = identifiant du site selon rapports GREN 2020, GREN 2021 et GREN 2022 ; OBR = ombre, TRF = truite, BEF = barbeau fluviatile, CHE = chevesne, VAI = vairon)..... 19

Tableau 6. Récapitulatif des données (dates et nombre d'individus) issues des comptages en plongée, réalisées par GREN entre 2008 et 2022 (GREN, 2020, 2021, 2022). La colonne « Modèle ? » répertorie les données qui ont servi à créer le modèle d'abondance, voir §5.1.2). 34

Tableau 7. Synthèse des résultats issus de la pêche électrique de juillet 2022. A noter qu'un seul passage a été réalisé. L'indice de densité est calculé en nombre d'individus par 100 m linéaire. 39

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1. Illustration sur des images thermiques des différents types de taches froides répertoriées dans la nomenclature proposée en Figure 18 et utilisée dans cette étude. A noter que tous les types n'ont pas été observés sur l'Allondon (source : Marteau et al. (2022)). 48

1. CONTEXTE GENERAL DE L'ETUDE

L'Allondon fait l'objet d'un suivi quasi-continu de la température de l'eau depuis 2018. Cette étude a été initiée à la suite de relevés réalisés en 2017 démontrant que la température des 30 jours consécutifs les plus chauds peut excéder 17°C au niveau de certaines stations (*Moulin Fabry* et *Pont des Bailleys*), température qui est potentiellement favorable au développement de la Maladie Rénale Proliférative (MRP) chez la truite (SCIMABIO, 2019). Le gradient de température amont-aval apparaissait alors globalement « inversé » par rapport à ce qui pourrait être attendu, avec des températures plus élevées à l'amont (*Moulin Fabry*) qu'à l'aval (*Russin*). En outre, les étiages sévères et prolongés observés ces dernières années sont susceptibles d'accentuer le réchauffement de l'eau et le stress induit sur les organismes aquatiques.

C'est donc pour comprendre les raisons et les enjeux liés à ces dynamiques thermiques, notamment estivales, que l'étude sur la température de l'Allondon a été lancée. Cette étude est également motivée par la présence d'une population d'ombres communs (*Thymallus thymallus* L.) sur le déclin, avec une tendance à la baisse des indicateurs d'abondance (frayères, comptages) ces dernières années (GREN, 2020, 2021, 2022). Cette situation, commune à la France et à la Suisse (Paquet, 2002), nécessite donc de s'intéresser aux facteurs de stress de cette espèce sensible et notamment à son habitat thermique en été.

Un premier rapport d'état a été rendu en 2021, reprenant les principaux enseignements obtenus grâce au suivi thermique temporel initié en 2018, et augmenté en 2020 puis 2021 avec l'installation de stations de mesure sur l'Allondon à l'aval du Roulave (2020) et sur l'Allemagne juste en amont de sa confluence avec l'Allondon (2021). Ce rapport fut également l'occasion de reconstruire les chroniques de température manquantes sur certaines stations, d'étudier les chroniques annuelles existantes et de la confronter à un référentiel thermique connu pour une analyse comparée, et d'initier l'étude de refuges thermiques potentiels grâce à l'installation de thermographes sur quelques secteurs préalablement identifiés (SCIMABIO, 2021).

L'élément central de cette étude de caractérisation des habitats thermiques de l'Allondon était la cartographie des températures de surface par infrarouge thermique aéroporté (IRT-a). Initialement prévue en 2021, cette campagne de mesure de la température par télédétection a été reportée à 2022 à cause de conditions météorologiques et hydrologiques défavorables pour ce type de relevé en 2021. La campagne d'acquisition a donc eu lieu le 14/07/2022, sur un linéaire de presque 10 km entre la confluence du Lion et l'embouchure avec le Rhône. Les résultats de cette étude IRT-a constituent donc l'essentiel de ce rapport, auxquels viennent s'ajouter des données complémentaires issues d'études hydrogéologiques ainsi que des données biologiques permettant une interprétation écologique des observations de télédétection.

Ainsi, les objectifs de ce rapport sont les suivants :

- Décrire les résultats de suivi de refuges thermiques potentiels et les comparer aux résultats de 2021 ;
- Présenter les résultats majeurs de la cartographie IRT-a de l'Allondon ;
- Expliquer la distribution des habitats thermiques de l'Allondon au regard des données hydrogéologiques et hydromorphologiques ;
- Mettre en relation les résultats de l'étude thermique par IRT-a avec les données biologiques piscicoles disponibles ;
- Proposer des pistes de restauration « thermique » susceptibles d'aider au maintien de la population d'ombres sur l'Allondon.

2. SITE D'ETUDE ET CONTEXTUALISATION

Le suivi chronique de la température de l'Allondon est établi entre le lieu-dit « Moulin Fabry » à l'amont et la confluence avec le Rhône à l'aval. Le linéaire étudié dans le cadre de la campagne de télédétection de la température inclut l'ensemble de ce secteur et remonte jusqu'à l'amont de la confluence du Lion (Figure 1). Ainsi, le linéaire faisant l'objet de cette étude est de 9,6 km, soit la totalité du tronçon suisse, sur les quelques 17 km que parcourt la rivière.

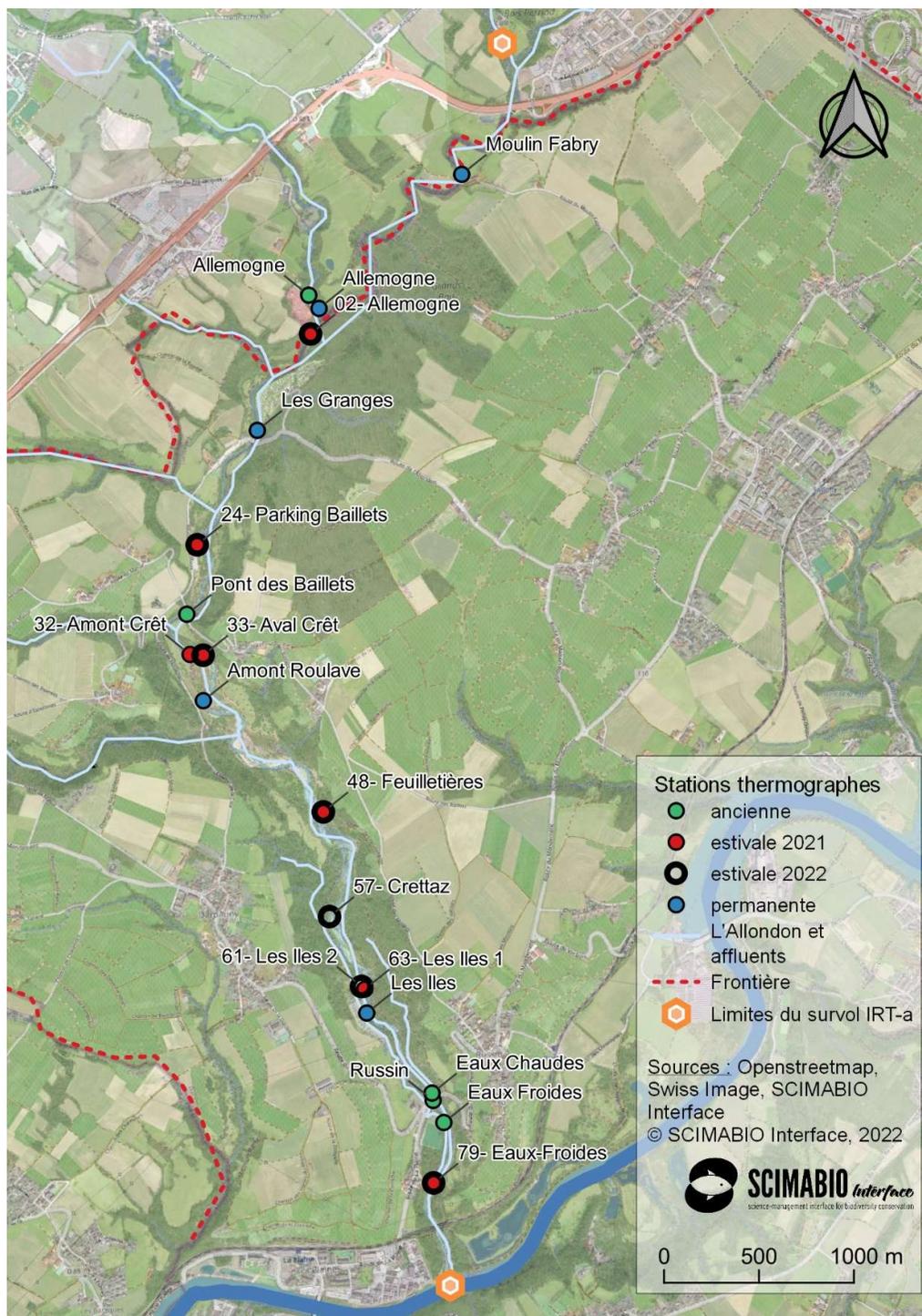


Figure 1. Carte de localisation des stations de mesure de la température sur l'Allondon.

Quatre stations de suivi thermique sont installées sur l’Allondon, auxquelles vient s’ajouter une station sur l’Allemogne installée en septembre 2021. Un suivi y avait été réalisé en 2017 (mars-octobre), révélant un comportement thermique différent de celui de l’Allondon ainsi qu’une influence potentielle majeure sur son régime thermique (SCIMABIO, 2021). Ces 5 stations « permanentes » sont toujours en place et leur suivi et maintenance sont désormais assurés par les agents de l’Office Cantonal de l’Eau du canton de Genève.

L’habitat thermique de l’ombre commun : quelques éléments.

L’objet de cette étude portant sur la température et les refuges thermiques potentiels d’une rivière abritant des populations d’ombres communs et de truites ; il est important de tenir compte des *preferenda* thermiques de ces espèces, recensés dans la littérature (Küttel et al., 2002; Elliott et al., 2001) :

Tableau 1. *Preferenda* thermiques et seuils de tolérance de température de l’ombre commun et de la truite de rivière (Max. : limite maximale, Opt. sup. : optimum supérieur, Opt. inf. : optimum inférieur, Min. : limite minimale).

Seuil de température (°C)	Oeufs				Juvéniles				Adultes				Reproduction			
	Max.	Opt. sup.	Opt. inf.	Min.	Max.	Opt. sup.	Opt. inf.	Min.	Max.	Opt. sup.	Opt. inf.	Min.	Max.	Opt. sup.	Opt. inf.	Min.
Ombre commun	16	14	7	0	-	-	-	-	26	18	4	0	15	10	6	4
Truite de rivière	13	12	7	0	23	15	1,5	0	25	19	4	0	13	10	7	1

3. ETUDE THERMIQUE ESTIVALE 2022

L’étude thermique estivale de l’Allondon en 2022 utilise la même méthode (et le même matériel) que le suivi réalisé en 2021. Les grandes lignes sont rappelées ci-dessous.

3.1 MATERIELS

Les thermographes utilisés pour la mesure en continu de la température sont des HOBO Pendant® 64K (Figure 2a). Ces capteurs submersibles peuvent mesurer dans une gamme comprise entre -20 et +70°C avec une résolution de 0,14°C et une précision de ±0,53°C. Lors de leur déploiement en rivière, ils sont placés dans un étui PVC perforé afin de les protéger des objets en suspension (notamment lors des crues) mais aussi d’éventuels rayonnements solaires directs (Figure 2b). L’étui PVC est ensuite solidement arrimé à un bloc de béton (Figure 2c), lui-même fixé à la berge ou à un bloc par un câble métallique (Figure 2d). Enfin, lorsque nécessaire, le bloc est également maintenu par un fer à béton enfoncé dans le lit de la rivière. Les thermographes enregistraient à un pas de temps horaire depuis 2018, puis un pas de temps de 30 min depuis l’été 2021. Les capteurs sont relevés régulièrement pour décharger les données, ainsi que vérifier l’état de la batterie et du système de fixation. Les relevés de l’été 2022 ont eu lieu les 31/05, 13/07 et 27/09.



Figure 2. a) Thermographe HOBO Pendant® utilisé dans cette étude, b) installation d'un capteur dans son étui de protection PVC, c) arrimage du capteur et de son étui sur un bloc en béton et d) fixation de l'ensemble à la berge à l'aide d'un câble métallique (Photos SCIMABIO Interface®, 2021).

3.2 METHODES

3.2.1 RECONSTRUCTION DES CHRONIQUES MANQUANTES

La méthode de reconstruction des chroniques manquantes a été présentée dans le rapport de 2021 (SCIMABIO, 2021). Pour l'année 2022, la défaillance d'une batterie sur la sonde installée à Moulin Fabry a nécessité la reconstitution de la chronique journalière de température entre le 10/03 et le 31/05.

3.2.2 SELECTION DES REFUGES POTENTIELS

A défaut de connaître la répartition des refuges thermiques au moment de l'instrumentation de la rivière (juin 2022), le choix des refuges thermiques potentiels s'est focalisé sur les comptages en plongée réalisés en 2020 et 2021 (GREN, 2020, 2021, 2022), couplé à une prospection pédestre lors de l'instrumentation de la rivière.

En 2021, 12 stations avaient été recensées comme utilisées par des ombres, dont 10 susceptibles d'offrir une zone de refuge (les deux autres étant décrites comme « peu profondes » ou en « veine de courant »). Cinq stations ont été choisies parmi ces 10, dont les plus « peuplées » (ref_24, 7 ombres ; ref_63, 5 ombres, ref_48, 2 ombres, etc., Tableau 2). A ces stations en rivière ont été ajoutées 2 stations aux confluences de l'Allemogne (ref_02) et du ruisseau des Eaux Froides (ref_79). Bien qu'aucun ombre n'ait été recensé sur ces stations, l'intérêt se portait sur le comportement thermique du panache des affluents, dont le rôle de refuge thermique est régulièrement mis en avant dans la littérature (Dugdale et al., 2013).

En 2022, une partie de ces refuges potentiels a été rééquipée (cf. Tableau 2). Le refuge nommé « refuge 32 », situé à l'amont du ruisseau du Crêt (en rive droite) a été abandonné car jugé peu intéressant d'un point de vue thermique en 2021 et ayant subi une modification morphologique à la suite des crues de l'hiver 2021. De même, le « refuge 63 », généré par une arrivée phréatique en rive gauche dans le secteur des îles (i.e. photo de couverture du rapport de 2021) a été complètement remodelé par l'évolution morphologique du lit. Ainsi, un autre refuge potentiel a été instrumenté, légèrement plus en amont et en rive droite (« refuge 61 »). Enfin, le panache issu d'une arrivée phréatique en rive droite sur le secteur de Crettaz a été nouvellement équipé en 2022.

L'analyse des données a principalement été réalisée d'un point de vue relatif, c'est-à-dire en considérant l'écart de température entre le refuge potentiel et la masse d'eau principale. La période couverte par l'instrumentation des refuges potentiels s'étend de juin à septembre 2022.

Tableau 2. Nom, description et poissons recensés dans les refuges potentiels instrumentés en été 2021 et 2022 (Source : Rapport GREN 2020, « Suivi de la population d'ombres de l'Allondon en 2020 »). Les lignes en **vert** désignent les refuges potentiels uniquement équipés en 2021, tandis que les lignes en **rouge** désignent ceux uniquement équipés en 2022.

ID Nom	Description	Poissons recensés en août 2020
ref_02 aval Allemogne	Panache d'eau issu de la confluence de l'Allemogne avec l'Allondon	· NA
ref_24 fosse RD parking Baillets	Refuge n°24. Zone profonde sous blocs et gros saule en RD, sortie de grand plat courant	· 6 ombres adultes (>35 cm) · 1 ombre sub-adulte (30cm) · 1 chabot
ref_32 fosse RD (aval Rau du Crêt)	Refuge n°32. Petite fosse, pied de falaise en RD	· 1 ombre adulte (40 cm) · 1 truite (35 cm) · 1 barbeau (50 cm)
ref_33 fosse RG (aval Rau du Crêt)	Refuge n°33. Grande fosse profonde en RG, sous saulaie	· 1 ombre adulte (35 cm) · 1 truite (40 cm) · 18 barbeaux · 1 chevaine (20 cm)
ref_48 fosse RG Feuilletières	Refuge n°48. Grande fosse profonde et très large, fosse d'érosion en RG, sous et autour de saules	· 2 ombres (> 30cm) · 2 truites (20 cm) · 1 barbeau (40 cm) · 6 chevaines (40 cm)
ref_57 panache Crettaz RD	Refuge n°57. Panache d'un chenal latéral froid, secteur de Crettaz	· NA
ref_61 arrivée phréatique RD amont des Iles	Refuge n°62. Fosse RD longue et large, sortie d'un chenal phréatique, sous saules et branchages	· 2 ombres adultes (>35 cm) · 2 ombres sub-adultes (30 cm)
ref_63 arrivée phréatique RG amont des Iles	Refuge n°63. Fosse RG longue et large, sortie d'un chenal phréatique.	· 2 ombres adultes (>35 cm) · 2 ombres sub-adultes (30 cm)
ref_79 Aval Eaux Froides	Panache d'eau issu de la confluence du ruisseau des Eaux Froides avec l'Allondon	· NA

3.2.3 AUTRES JEUX DE DONNEES UTILISES

D'autres jeux de données et rapports existants ont été utilisés pour l'analyse et l'interprétation des résultats thermiques. Ces différentes sources sont listées et présentées ci-dessous.

3.2.3.1 Données de débit

De la même manière que pour le rapport de 2021, les données de débit de l'Allondon mesuré par la sonde OFEV de Dardagny - Les Granges (station n°2490, <https://www.hydrodaten.admin.ch/>) ont été compilées pour l'année hydrologique 2022. A noter qu'une partie de ces données est provisoire et n'a pas encore été validée par l'OFEV.

3.2.3.2 Données de température de l'air

La température de l'air a été mesurée à Cointrin, acquise par MétéoSuisse et fournie par l'Office Cantonal de l'Eau. A noter que les données pour l'été 2022 sont brutes et n'ont pas été validées. Ces

données ont servi à la reconstruction d'une partie des chroniques de température de l'eau manquantes (Moulin Fabry, entre mars et mai 2022), ainsi qu'à la contextualisation des relevés de l'été 2022. La reconstruction des données manquantes a suivi la même méthode que présentée dans le rapport précédent (SCIMABIO, 2021).

3.2.3.3 Etude hydrogéologique de la nappe alluviale de l'Allondon

La cartographie thermique par IRT-a permet de déceler les échanges entre la rivière et sa nappe alluviale. L'interprétation des résultats thermiques a été approfondie en s'appuyant sur l'analyse hydrogéologique de la nappe alluviale de l'Allondon réalisée en 1998 (Hottinger, 1998). Cette étude combine des données de forages, de sondages géophysiques (RMT), de jaugeage, de pompage et d'analyses chimiques pour pallier à un manque de connaissances sur l'état qualitatif et quantitatif de la ressource souterraine du val d'Allondon.

3.2.3.4 Données biologiques

Les données biologiques utilisées dans ce rapport sont issues de deux sources principales : des données de pêches électriques, et des données d'observations en plongée.

Les pêches électriques ont été réalisées par l'équipe du secteur pêche de l'Office Cantonal de l'Eau et SCIMABIO les 12 et 13/07/2022. L'objectif de ces pêches était triple : capturer des ombres adultes pour une étude génétique, recenser la densité de poissons sur les 4 stations étudiées et valider les observations en plongée. Ces pêches n'ont fait l'objet que d'un seul passage.

Les observations en plongée ont été réalisées par le bureau d'études GREN, dont les premiers recensements remontent à 2008. Ces suivis en plongée ont été réalisés chaque année entre 2011 et 2022, avec des objectifs pouvant varier d'une année à l'autre (ex. comptage des juvéniles, effet des opérations d'abaissement des retenues, succès de la reproduction naturelle; GREN, 2021). Ils sont réalisés en journée (plongée dite « diurne »), entre l'Allemogne et l'embouchure du Rhône, dans des conditions de débit faible (entre 0.5 et 2 m³.s⁻¹), avec une bonne visibilité (c'est-à-dire faible turbidité) et sur deux journées consécutives. Ces données ont été gracieusement mises à disposition pour la rédaction de ce rapport sous la forme de tableaux recensant :

- le nombre d'ombres (divisés en 3 classes de taille : adultes [≥ 35 cm], sub-adultes [35-20 cm] et juvéniles [< 20 cm]) ;
- le nombre de truites, de barbeaux fluviatiles et de chabots (ici non-différenciés en classes de taille) ;
- une information relative sur la présence/absence (voire densité relative) de vairons.

A noter que le travail de reconstitution des données manquantes (ex. coordonnées de certaines stations sur certaines années) a été réalisé, sur la base des informations disponibles, par SCIMABIO dans l'objectif de cette étude. Certaines informations pourraient légèrement différer des observations faites par GREN.

3.2.3.5 Données cartographiques récentes et historiques

Afin d'aider à l'interprétation des résultats IRT-a, des fonds de cartes récents et historiques de l'Office Fédéral de topographie ont été utilisés. Ces données, disponibles en libre accès, ont été utilisées en flux WMS sur QGIS. Ont notamment été exploitées :

- Les orthophotos « SwissImage » issues des images satellites SPOT-5 ;
- Les cartes géologiques « Geologisher Atlas GA25 » donnant des informations sur les couches superficielles du sous-sol, ainsi que la version vectorisée « GeoCover V3 ».

3.3 RESULTATS

3.3.1 CONDITIONS METEOROLOGIQUES

L'été 2022 a connu des conditions météorologiques particulièrement chaudes (avec une température de l'air maximum de 37,2°C le 17/07/2022, Figure 3) et sèches (voir § Hydrologie). Ces conditions météorologiques ont été très différentes de celles de 2021 qui avaient obligé au report de la campagne de télédétection IRT-a. En 2022, la température moyenne mensuelle à la station de Cointrin a été supérieure à la médiane de 2018-2022 pour les mois de mai à août (Figure 3).

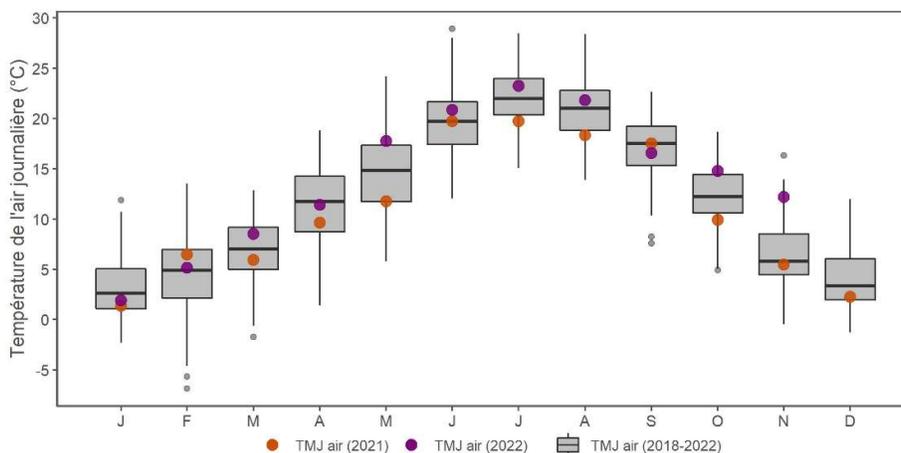


Figure 3. Moyenne mensuelle des températures journalières de l'air à la station de Cointrin, ainsi que les valeurs relevées pour les années 2021 et 2022. Données de janvier 2018 à juin 2022 validées, mais données de juillet à octobre 2022 brutes et non validées (Source : MétéoSuisse).

Cette augmentation des températures de l'air par rapport aux années précédentes est donc en grande partie responsable de la hausse des températures de l'eau sur cette même période (Figure 4). Néanmoins, les faibles précipitations sur la période d'avril à début septembre ont également eues un effet multiplicateur sur ces phénomènes d'échauffements estivaux de la température de l'eau.

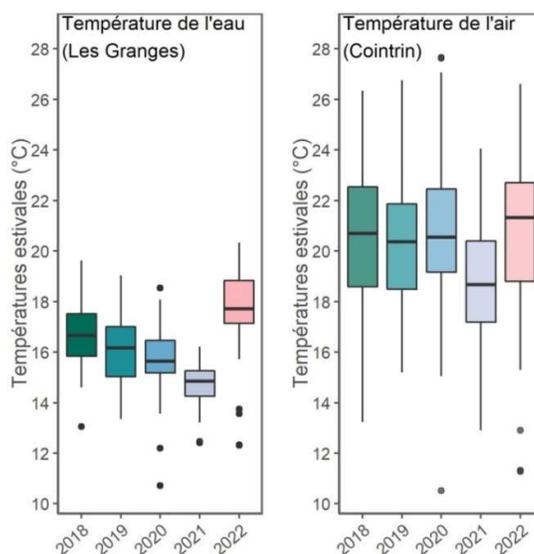


Figure 4. Statistiques des températures estivales (juillet-septembre) de l'eau (à gauche) et de l'air (à droite) des années 2018 à 2022 qui caractérisent les conditions thermiques de l'Allondon (Limites des boîtes à moustaches : D10, D25, médiane, D75 et D90 des valeurs de température journalière).

3.3.1 HYDROLOGIE DE L'ÉTÉ 2022

L'hydrologie de l'Allondon au cours de l'été 2022 a également été différente de l'été 2021. Alors que 2021 était caractérisée par des débits relativement élevés pour la période estivale, avec un débit d'étiage (Q_{347} , débit moyen journalier interannuel atteint ou dépassé 347 jours par an) jamais atteint en juillet-août et seulement pendant 14 jours en septembre (SCIMABIO, 2021), c'est le phénomène inverse qui a été observé en 2022 : le débit d'étiage a été atteint dès la fin juin et 100% du temps au cours des mois de juillet-août (Figure 5), ainsi que 89% du temps sur juillet-août-septembre (Tableau 3). L'étiage estival de 2022 a même atteint des conditions très sévères, avec un débit minimal de $0,124 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ observé le 13/08/2022, ce qui a d'ailleurs conduit à la mise à ban de secteurs de l'Allondon par les autorités dès le début du mois de juillet.

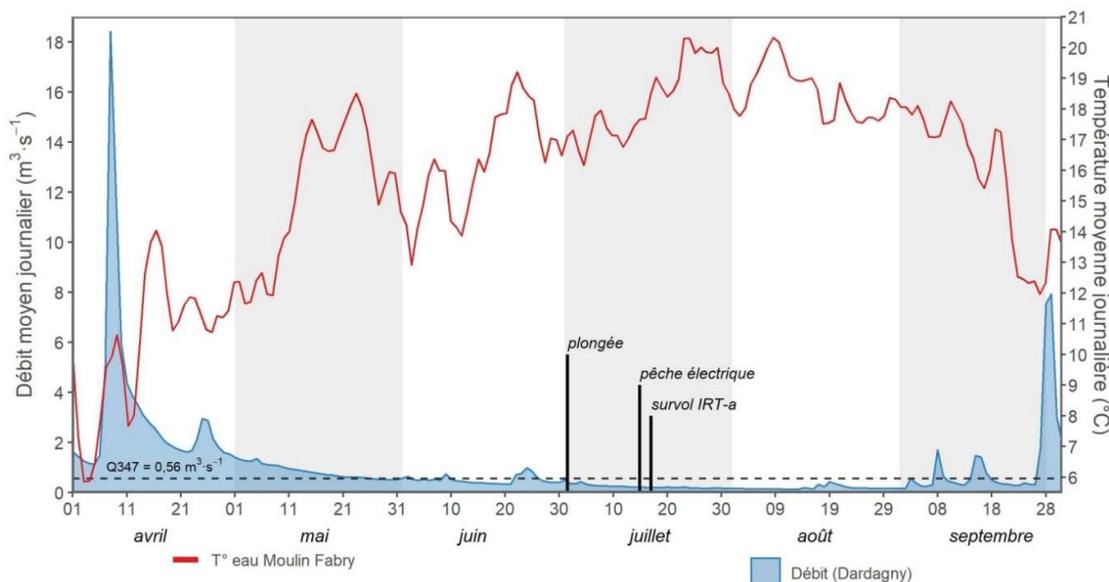


Figure 5. Chroniques de débit (station de Dardagny) et de température de l'eau de l'Allondon (station de Moulin Fabry) sur la période avril-septembre 2022. Les lignes verticales symbolisent le jour où les différentes campagnes d'acquisition de données ont eu lieu.

Les conditions de débit et de température de l'eau le jour des relevés (comptage en plongée, pêche électrique et campagne IRT-a) ont été suffisamment proches pour permettre une analyse cohérente des résultats (Figure 5). A noter cependant que les conditions thermiques et hydrologiques se sont dégradées à la suite de la campagne IRT-a, la température moyenne journalière de l'eau à la station de Moulin Fabry dépassant les 18°C (contre $\sim 16^\circ\text{C}$ le 14/07/2022) et les débits continuant à chuter ($0,124 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ au 13/08/2022, contre $0,213 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ le 14/07/2022). Les conditions d'étiage les plus sévères de l'été 2022 et donc les plus critiques pour les poissons ont été observées un mois après la campagne IRT-a.

Tableau 3. Statistiques de débits moyens journaliers estivaux (juillet-septembre) de l'Allondon à la station des Granges.

Année	QJ moy	QJ min	QJ max	Nb QJ < Q_{347}	% du temps QJ < Q_{347}
2018	0,511	0,248	1,37	60	65%
2019	0,710	0,326	4,97	40	43%
2020	0,529	0,214	2,75	68	74%
2021	1,91	0,480	12,3	14	16%
2022	0,510	0,124	7,93	81	89%

3.3.2 ANALYSE DES CHRONIQUES DE L'ÉTÉ 2022

L'analyse des chroniques de température de l'été 2022 inclut les 5 stations permanentes en place actuellement sur l'Allondon et l'Allemogne. Comme en 2021, la température à la station des *Granges* est plus faible qu'au niveau de la station située à l'amont (*Moulin Fabry*) et de celle située à l'aval (*Aval du Roulave*). L'Allemogne est un affluent connu pour apporter des eaux fraîches en été, et le suivi estival le montre (Tableau 4). En revanche, son comportement estival est plus marqué que la station des Îles par exemple, où la température semble plus tamponnée que l'affluent (température minimale plus élevée et température maximale plus faible). La température estivale moyenne à la station des Îles est très proche des valeurs de 2021 (l'amplitude journalière y était même plus grande en 2021, Tableau 4), tandis que les valeurs de toutes les autres stations sont significativement plus élevées.

Tableau 4. Statistiques de température des 4 stations permanentes mesurée durant les étés 2021 et 2022 (juin – septembre).

Station	2021					2022				
	Temp. instantanée (°C)		Temp. moyenne journalière (°C)			Temp. instantanée (°C)		Temp. moyenne journalière (°C)		
	min	max	min	moy	max	min	max	min	moy	max
Moulin Fabry	10,8	17,6	11,6	14,7	16,8	10,7	22,1	12,0	17,2	20,3
Les Granges	9,9	16,9	10,5	13,7	15,4	9,5	22,2	11,1	16,1	19,2
Aval du Roulave	9,9	18,1	10,6	14,0	15,9	9,3	24,6	11,3	17,4	21,4
Les Îles	10,4	18,9	11,1	14,2	16,1	11,7	17,8	12,4	14,3	16,0
Allemogne	-	-	-	-	-	9,6	19,3	10,8	14,7	17,2

Cette dynamique « tamponnée » à la station des Îles est également observable à l'échelle horaire et journalière (Figure 6). A l'inverse, la station *Aval du Roulave* (située juste à l'amont) subit des variations journalières et saisonnières les plus importantes. Ainsi, la température y a atteint 24,6°C au moment le plus chaud de l'été 2022, soit 6,5°C de plus que le maximal atteint en 2021. Ces températures très élevées sont également observées sur les deux autres stations amont (*Moulin Fabry* et *Les Granges*, >22°C).

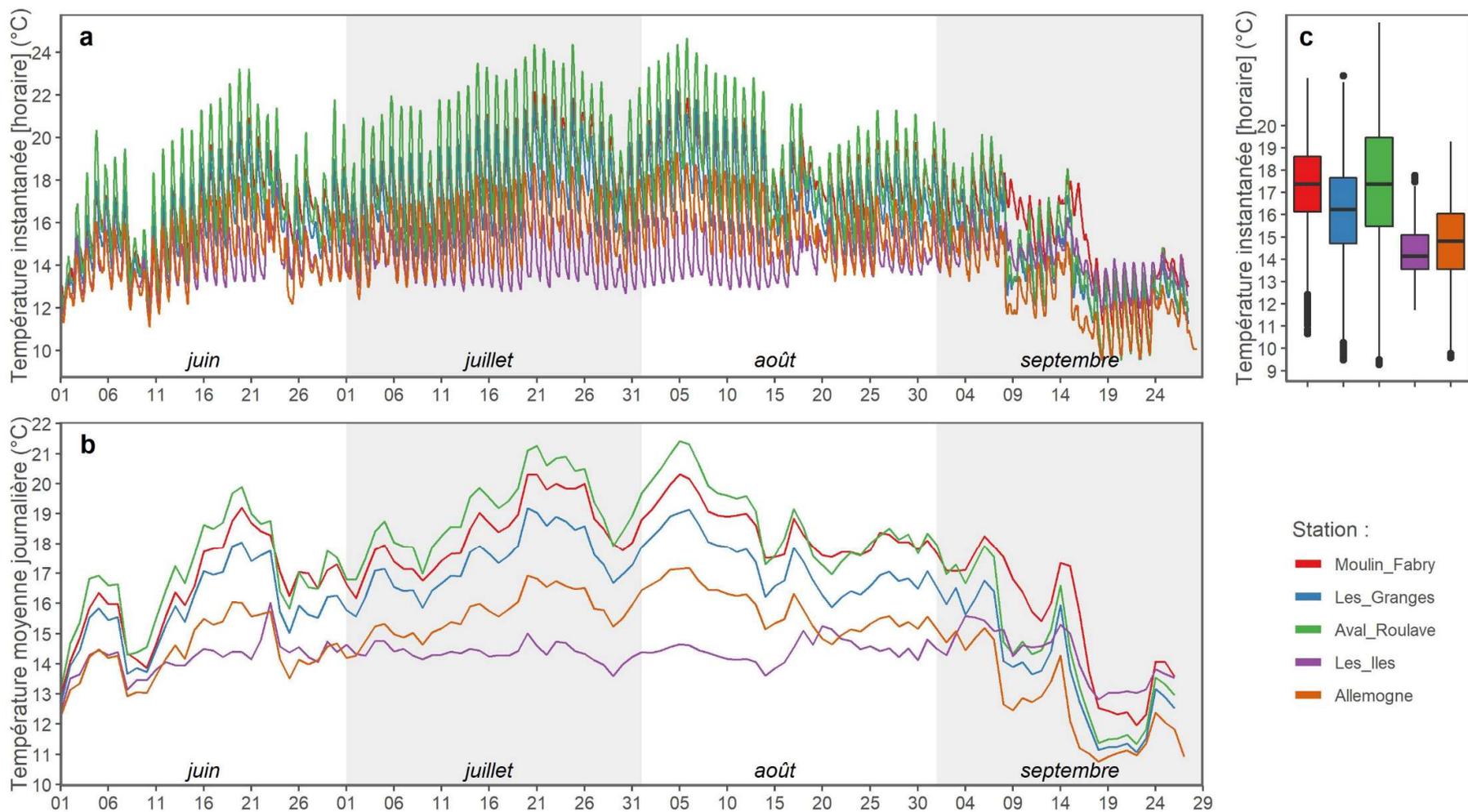


Figure 6. Chroniques de température de l'Allondon durant l'été 2022. a) Température instantanée (horaire) ; b) température moyenne journalière et c) boîte à moustaches représentant les statistiques des températures instantanées, sur les 5 stations de suivi (Moulin Fabry, Les Granges, Aval du Roulave, et Les Iles dans l'ordre amont-aval, et l'Allemogne).

3.3.3 REFUGES THERMIQUES POTENTIELS 2022

Les thermographes placés au niveau des 7 refuges potentiels ont été installés et relevés à la même période (31 mai - 27 septembre 2022). Leur positionnement est présenté sur la Figure 1 et photographié en Figure 7.

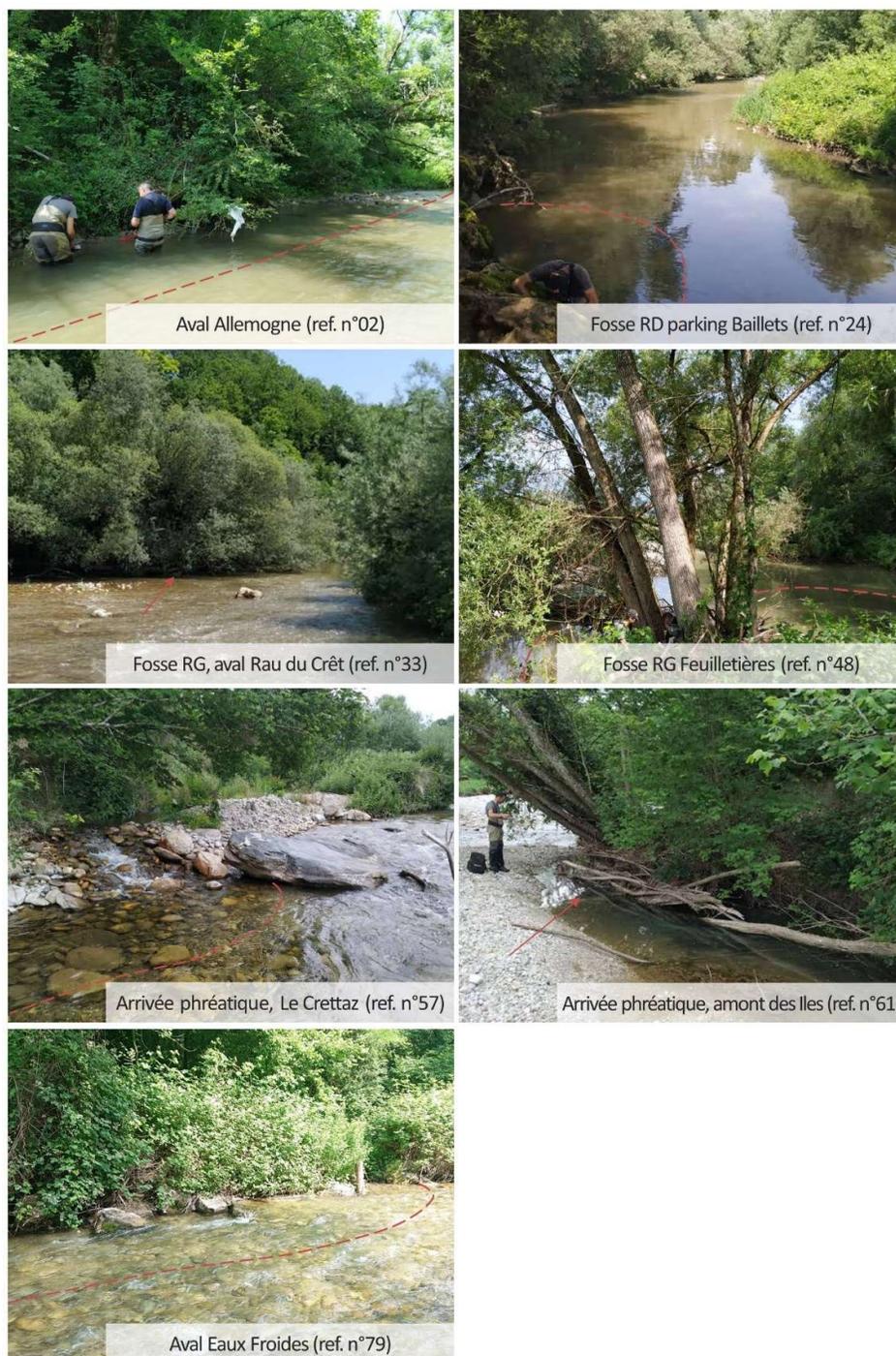


Figure 7. Photographies et représentations des refuges thermiques potentiels équipés en 2022 (Crédit : SCIMABIO, 2022).

Parmi ces 7 refuges potentiels, 5 sont identiques à l'étude de 2021 et 2 ont été modifiés ou déplacés (n°57 et n°61). Les résultats sont globalement les mêmes qu'en 2021, avec 3 refuges potentiels présentant des caractéristiques s'apparentant au comportement de refuges thermiques, c'est-à-dire avec un écart moyen avec la masse d'eau principale toujours négatif (Figure 9). Le panache de l'Allemagne, affluent en rive droite de l'Allondon, relativement important d'un point de vue hydrologique (SCIMABIO, 2019), apparaît comme constamment plus frais que l'Allondon (différence moyenne sur l'été : $-0,68^{\circ}\text{C}$). De la même manière, le refuge n°61 (secteur des îles) a présenté une température estivale en moyenne $4,1^{\circ}\text{C}$ plus faible que la rivière. De plus, son comportement est proche de celui des nappes en termes de dynamiques journalières, avec une température constante et peu de variations sur l'ensemble de la saison (température moyenne en été 2021 = $10,23^{\circ}\text{C}$, $\sigma = 0,56^{\circ}\text{C}$). Le choix de ce site s'est fait à la suite de la modification morphologique du lit au niveau du refuge n°63 équipé en 2021, rendant son instrumentation peu intéressante. Situé un peu plus à l'amont et en rive droite, ce refuge potentiel n°61 se caractérise par une fosse relativement profonde ($>60\text{ cm}$) et toujours en eau (Figure 7), alimentée par des apports phréatiques en rive droite. Il présente donc toutes les caractéristiques pour jouer un réel rôle de refuge thermique estival.

Un troisième site équipé en 2022 présente des propriétés proches de celles d'un refuge thermique : situé au niveau de Crettaz, il correspond au panache d'un chenal latéral apportant des eaux froides et protégé du courant amont de l'Allondon par un bloc (Figure 7). Le delta moyen de température par rapport à la rivière est plutôt important ($-0,85^{\circ}\text{C}$), bien que sa variabilité soit plus importante que les autres refuges thermiques ($\sigma = 2,01^{\circ}\text{C}$, Figure 9). Cette forte variabilité s'explique par le positionnement de la sonde par rapport au panache (Figure 8). L'eau arrivant du chenal latéral est en partie protégée par un large bloc lorsqu'elle atteint la rivière. L'effet hydraulique généré par ce bloc a des avantages (cf. § « Discussion & perspectives ») mais il crée également des conditions qui changent avec le débit de la rivière. La sonde a été installée à l'aval immédiat du bloc, dans le ressaut hydraulique qu'il génère. Ainsi, en fonction des débits de la rivière, la sonde a pu se retrouver ponctuellement immergée dans de l'eau provenant de l'Allemagne et non du panache d'eau froide.



Figure 8. Orthophoto (gauche) et mosaïque thermique (droite) du panache en rive droite généré par un bras latéral au niveau du secteur de Crettaz. La flèche désigne l'emplacement de la sonde, tandis que le panache froid est visible depuis le bloc vers l'aval.

Les zones équipées mais ne présentant pas de comportement typique d'un refuge thermique montrent les mêmes caractéristiques qu'en 2021. Les conclusions du rapport précédent (SCIMABIO, 2021) sont reprises ci-dessous :

- refuge n°24 (fosse RD parking Bailleys): celui sur lequel le plus grand effectif d'ombres a été recensé en août 2020 (6 adultes et 1 sub-adulte, Tableau 5). Les comptages de 2021 ont également révélé la présence d'ombres et/ou de truites à différentes périodes. On pouvait donc s'attendre à y observer des dynamiques de température particulières. Il n'est pas exclu, étant donné la configuration de cette fosse plutôt profonde dans un secteur assez lent, qu'une stratification thermique puisse se mettre en place au moment le plus chaud de la saison. En revanche, les mesures de 2021 et de 2022 ne permettent pas de confirmer cette hypothèse.
- refuges n°33 (fosse RG aval Ruisseau du Crêt) et 48 (fosse RG Feuilletières) : des fosses grandes et profondes, où beaucoup de poissons ont été recensés en août 2020, des ombres, truites, et d'autres espèces (barbeaux et chevaines) mais beaucoup moins d'individus ont été comptabilisés en été 2021. Ces grandes fosses n'apportent aucun avantage en termes de température. Leur utilisation par les ombres relèverait plutôt de caractéristiques physiques de ce faciès profond, propices au repos et à l'alimentation.

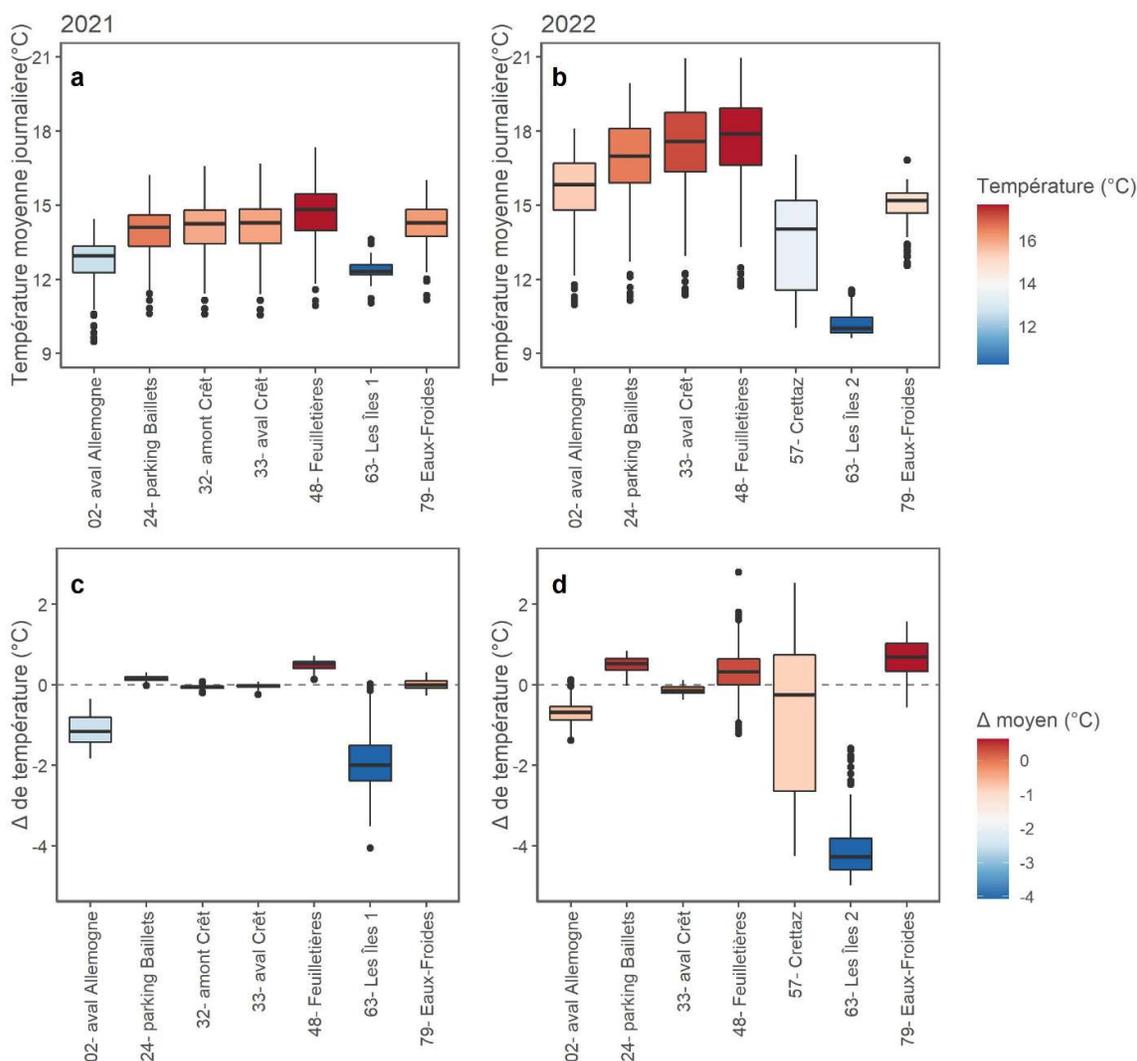


Figure 9. Caractérisation thermique des refuges instrumentés durant l'été (juillet-septembre en 2021 (figures a) et c) et 2022 (figures b) et d)). Les figures a) et b) présentent les températures absolues, tandis que c) et d) présentent les températures relatives à la rivière à la station de suivi la plus proche (voir Figure 1).

- *refuge n°79 : le panache issu du ruisseau des Eaux Froides présente une température moyenne estivale similaire à celle de l'Allondon, mais une dynamique journalière légèrement différente. En effet, un décalage temporel du pic de température par rapport à l'Allondon a été observé durant l'été 2021 (de 1h30 à 2h plus tôt pour les Eaux Froides¹). Un phénomène similaire a été observé sur l'Allemagne (décalage d'environ 1h). Il semblerait que ce décalage soit propre à chaque affluent, possiblement lié aux propriétés du sous-bassin versant, voire peut-être proportionnel à sa taille relative. A la lecture des comptages d'ombres effectués en 2021, il semble que la zone soit propice à l'ombre et la truite, sur et autour de la station instrumentée. Ainsi, de nombreux individus ont été comptabilisés à proximité de la confluence des Eaux Froides en août 2021 (5 ombres et 31 truites et quelques truites en octobre 2022 (Tableau 5).*

Avec le recul de 3 années de comptage (pour 5 campagnes de plongée), il apparaît que peu d'habitats au sein desquels des ombres avaient été recensés en août 2020 ont de nouveau hébergé des individus les années suivantes. Le refuge n°48 fait figure d'exception, puisque des ombres y ont été trouvés tous les ans et à pratiquement chaque comptage en 2021 et 2022 (Tableau 5). Cette fosse profonde et large, située au niveau des Feuilletières, ne présente pas les caractéristiques thermiques d'un refuge thermique estival. Elle semble pourtant être un habitat apprécié des ombres et d'autres espèces piscicoles (ex. truites et barbeaux en 2020 et 2021). L'analyse du profil longitudinal de température produit grâce à l'IRT-a permettra d'apporter des éléments de réponse à ces interrogations.

Tableau 5. Comparatif des comptages en plongée de poissons réalisés en 2020, 2021 et 2022 sur les refuges potentiels instrumentés durant l'été 2021 et 2022 pour cette étude. (ID = identifiant du site selon rapports GREN 2020, GREN 2021 et GREN 2022 ; OBR = ombre, TRF = truite, BAF = barbeau fluviatile, CHE = chevesne, VAI = vairon).

ID 2020	Août 2020	ID 2021	Mars 2021	Juin 2021	Août 2021	ID 2022	Juin 2022	Octobre 2022
02	-	04	1 OBR	-	-	02	-	-
24	7 OBR, 1 CHA	~21	1 OBR, 4 TRF	1 OBR	2 TRF	19	-	-
32	1 OBR, 1 TRF, 1 BAF	27	-	VAI ++	3 TRF	25/26	-	1 TRF
33	1 OMB, 1 TRF, 18 BAF, 1 CHE	28	6 BAF	-	1 OBR	27	-	1 TRF, 3 BAF, VAI ++
48	2 OBR, 2 TRF, 1 BAF, 6 CHE	39/42	1 OBR, 1 TRF	5 OBR, 1 BAF	3 OBR, 2 TRF	39/40	-	1 OBR
57	1 TRF	47/50	-	-	-	46	1 TRF	-
61	1 TRF	53/55	-	-	-	50	-	-
63	5 OBR	56	1 TRF	-	-	52	-	-
79	-	67/68	-	2 CHE	5 OBR, 31 TRF	64/61	VAI++	3 TRF

¹ A noter que la fréquence de mesure des sondes a été fixée à 30 min.

4. CARTOGRAPHIE THERMIQUE PAR IRT-A DE L'ALLONDON

4.1 DESCRIPTION DE LA METHODE

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

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

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

L'orthophoto ainsi réalisée permet également de définir le chenal en eau de la rivière afin d'en extraire uniquement les pixels « en eau » de la mosaïque thermique correspondante. La détermination du chenal en eau a été réalisée par classification d'image avec l'outil Orfeo Toolbox² 8.1.0. L'orthophoto a également servi à définir une « ligne centrale » le long de laquelle l'ensemble des observations ont été projetées, afin d'utiliser un seul et unique référentiel linéaire commun à toutes les analyses.

La température médiane, extraite tous les 50 m au sein d'une zone tampon de 1,8 m autour de cette ligne centrale, a été utilisée pour construire le profil longitudinal de température. A partir de ce profil, une carte de température médiane locale a été générée par interpolation spatiale (outil de *Pondération Inverse à la distance IDW*³). La comparaison de la mosaïque thermique avec cette carte nouvellement établie de la température médiane locale a fait ressortir des poches d'eau plus froide que la masse d'eau générale. Un seuil de température a été défini en-deçà duquel une poche d'eau est considérée comme significativement plus froide que l'eau de la rivière. 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). Ainsi, le seuil de détection pour cette étude a été calculé égal à 0,60°C. Enfin, un seuil de taille a été choisi pour éliminer les structures pouvant être générées lors de la création de la mosaïque

² <https://www.orfeo-toolbox.org/>

³ IDW : *Inverse Distance Weighting*

thermique : pour être comptabilisée, une tache 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.

4.2 DESCRIPTION DE LA CAMPAGNE

La campagne d'acquisition IRT-a sur l'Allondon a été réalisée en hélicoptère par la société Helimap⁴ le 14 juillet 2022, entre 14h30 et 15h45. Les images thermiques ont été acquises à l'aide d'une caméra FLIR® SC655 (résolution 480 x 640 pix, focale = 25 mm), et les photographies ont été prises à l'aide d'une caméra PhaseOne IXU-RS1000 (résolution 11608 x 8708 pix, focale = 50 mm). Le vol a été réalisé avec un Eurocopter EC120 (Figure 10), à une altitude de 255 m et à une vitesse moyenne de 15 m·s⁻¹.



Figure 10. A) Eurocopter EC120 ayant servi au survol. B) Capteurs optique et thermique installés sur le côté de l'hélicoptère pour la prise de vue aéroportée. (Crédit : Helimap CH©).

Le matin du vol, 15 thermographes (HOBO® Water Temp Pro v2, précision de ±0,21°C, résolution de 0,02°C) ont été déployés le long du linéaire d'étude, avant d'être récupérés une fois le vol terminé. Leur positionnement a été choisi afin de maximiser la diversité des conditions de température observées. En effet, plus la gamme de température utilisée pour la validation/calibration est grande, plus la certitude de la mesure augmente. Ainsi, la droite de régression représentant la relation entre température « radiante » et la température réelle montre une représentation satisfaisante ($R^2 = 0.97$) sur une gamme de température d'environ 17 à 25°C (Figure 11).

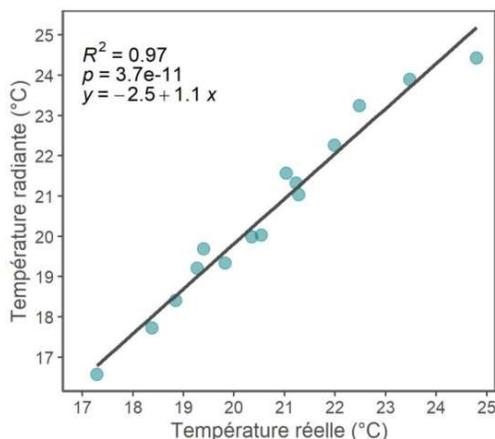


Figure 11. Relation entre la température radiante (issue des images thermiques) et la température réelle de la rivière (issue des thermographes), enregistrées pendant le survol.

⁴ <https://helimap.ch/fr/>

4.3 RESULTATS

Au total, 507 photographies ont été acquises et alignées pour générer une orthophoto recouvrant environ 2,9 km² pour une résolution au sol de 2.2 cm·pix⁻¹. De la même manière, 1198 images thermiques ont été prises pour créer une mosaïque thermique d'environ 2,7 km², pour une résolution d'image au sol de 30 cm·pix⁻¹. Il est important de garder en mémoire pour l'interprétation des résultats que la technologie IRT-a fournit une information de température de surface, et ne cartographie que ce qui est visible depuis les airs.

4.3.1 DIVERSITE THERMIQUE DE LA RIVIERE EN PERIODE ESTIVALE

Une première approche dans l'analyse des résultats issus de la cartographie thermique consiste à regarder l'histogramme des valeurs de température de l'ensemble des pixels en eau (Figure 12). L'histogramme présente la particularité d'être multimodal, avec :

- Un mode autour de la médiane qui montre une forte densité de secteurs dont la température se situe entre 21 et 22°C, ce qui, connaissant le seuil optimal supérieur de l'ombre commun adulte (18°C, Tableau 1), apparaît comme relativement élevé ;
- Un deuxième mode centré sur une température moyenne de 20°C, qui de par l'étendue de ce mode (~19-20°C), représente également une large portion des habitats thermiques disponibles dans la rivière, et des conditions thermiquement plus adaptées à de nombreuses espèces rhéophiles ;
- Un troisième mode autour de températures plus fraîches (~18°C), représentant majoritairement les poches froides ou les secteurs les plus froids de la rivière et jouant potentiellement un rôle clé de refuge thermique en période estivale (i.e. similaires aux conditions le jour du survol IRT-a). En effet, ces zones se trouvent dans le *preferendum* thermique de l'ombre commun.

Enfin, la queue de l'histogramme qui s'étale vers les températures les plus élevées est relativement longue (>26°C) et démontre la présence de secteurs nombreux, voire de secteurs étendus, où l'échauffement estival est important.

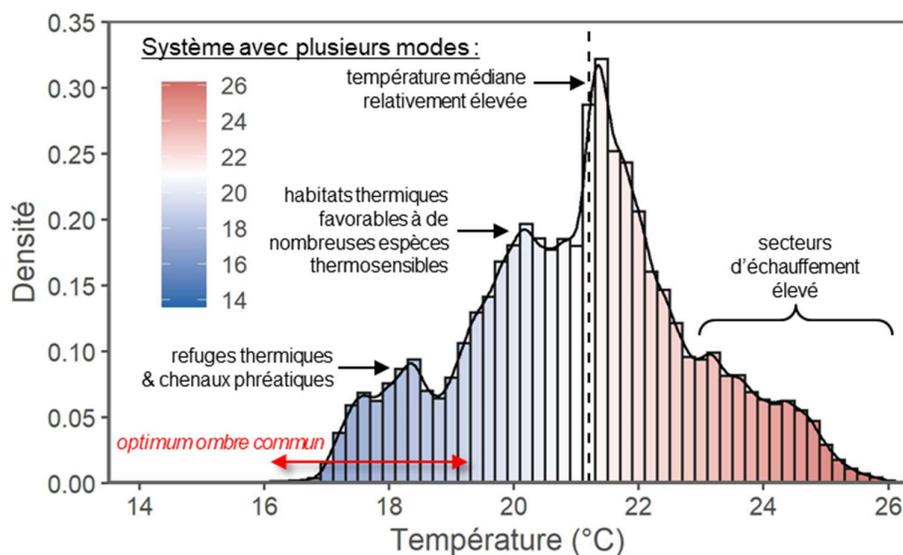


Figure 12. Histogramme de distribution des pixels de température sur la rivière Allondon issus de la campagne IRT-a de juillet 2022. La température médiane observée le 14 juillet 2022 est de 21,2°C. Données sur l'optimum de l'ombre commun issues de (Küttel et al., 2002).

4.3.2 PROFIL LONGITUDINAL DE TEMPERATURE

Le profil longitudinal de température permet d'illustrer en grande partie les motifs assez marqués dans la répartition de ces différents habitats thermiques sur le continuum (Figure 13 & Figure 14). Globalement, le gradient thermique sur le secteur d'étude est légèrement négatif ($-0,17^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$). En revanche, la variabilité sur les 9,7 km de rivière est forte, avec une gamme de température allant de $17,2$ à 25°C ⁵. Entre les confluences du Lion et de l'Allemogne, le gradient est légèrement positif ($+0,26^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$) avec une forte variabilité locale, qui peut être en partie attribuée à la présence d'un ombrage important. La présence d'une canopée relativement dense joue deux rôles majeurs sur la détermination du profil en long de température : (1) elle limite le nombre de pixels « purs » (c'est-à-dire uniquement en eau) et donc augmente la variabilité intrinsèque de la mesure, mais (2) elle augmente également la variabilité naturelle de la température en limitant les rayonnements solaires capables d'atteindre la surface de l'eau. Ces deux facteurs sont difficilement dissociables sur le secteur en amont de l'Allemogne.

L'Allemogne apporte une eau plus froide que l'Allondon, et avec un volume conséquent notamment en période d'étiage. Ici, l'effet de l'Allemogne sur la température médiane de l'Allondon est un refroidissement quasi-immédiat de $1,5^{\circ}\text{C}$. Ainsi, pour un débit mesuré au pont des Granges de $0,213 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ le jour du survol, le différentiel thermique entre l'amont ($21,4^{\circ}\text{C}$) et l'aval ($19,9^{\circ}\text{C}$) de la confluence, ainsi que la température moyenne de l'affluent ($19,3^{\circ}\text{C}$) permettent d'estimer le ratio de débit entre l'Allondon et son affluent au moment de la mesure : environ $0,061 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ provenant de l'amont de l'Allondon et environ $0,152 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ provenant de l'Allemogne (soit un ratio de $1/2,5$).

Entre la confluence de l'Allemogne et le lieu-dit des Feuilletières, qui correspond au pic de température observé sur l'Allondon (km 6,3), le gradient thermique est positif et relativement élevé ($+1,40^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$). L'échauffement est particulièrement fort sur le dernier kilomètre de ce secteur (km 5,4 → km 6,3), car la rivière est fortement exposée aux rayonnements solaires et la lame d'eau se retrouve étalée et plutôt fine par endroit, rendant la rivière plus sensible à l'échauffement (Figure 15). L'amincissement de la lame d'eau observé sur l'orthophoto peut également être un signe de perte depuis la rivière vers la nappe alluviale.

La brusque chute de température observée au niveau des Feuilletières (km 6,4) s'explique par des apports très importants, en rive droite d'eau issue de chenaux phréatiques. Les apports sont conséquents (volume d'eau supérieur au débit provenant de l'amont) et génèrent un refroidissement instantané de $3,0^{\circ}\text{C}$ (Figure 16). La diminution de la température est ensuite très marquée jusqu'au km 8,2 (gradient thermique de $-2,93^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$).

Enfin, le tronçon le plus à l'aval, entre l'amont du pont de Russin et la confluence avec le Rhône, voit sa température de nouveau augmenter de manière assez forte ($+1,93^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$).

⁵ On notera que cette gamme correspond au spectre pris en compte dans la phase de validation/calibration des données (Figure 11)

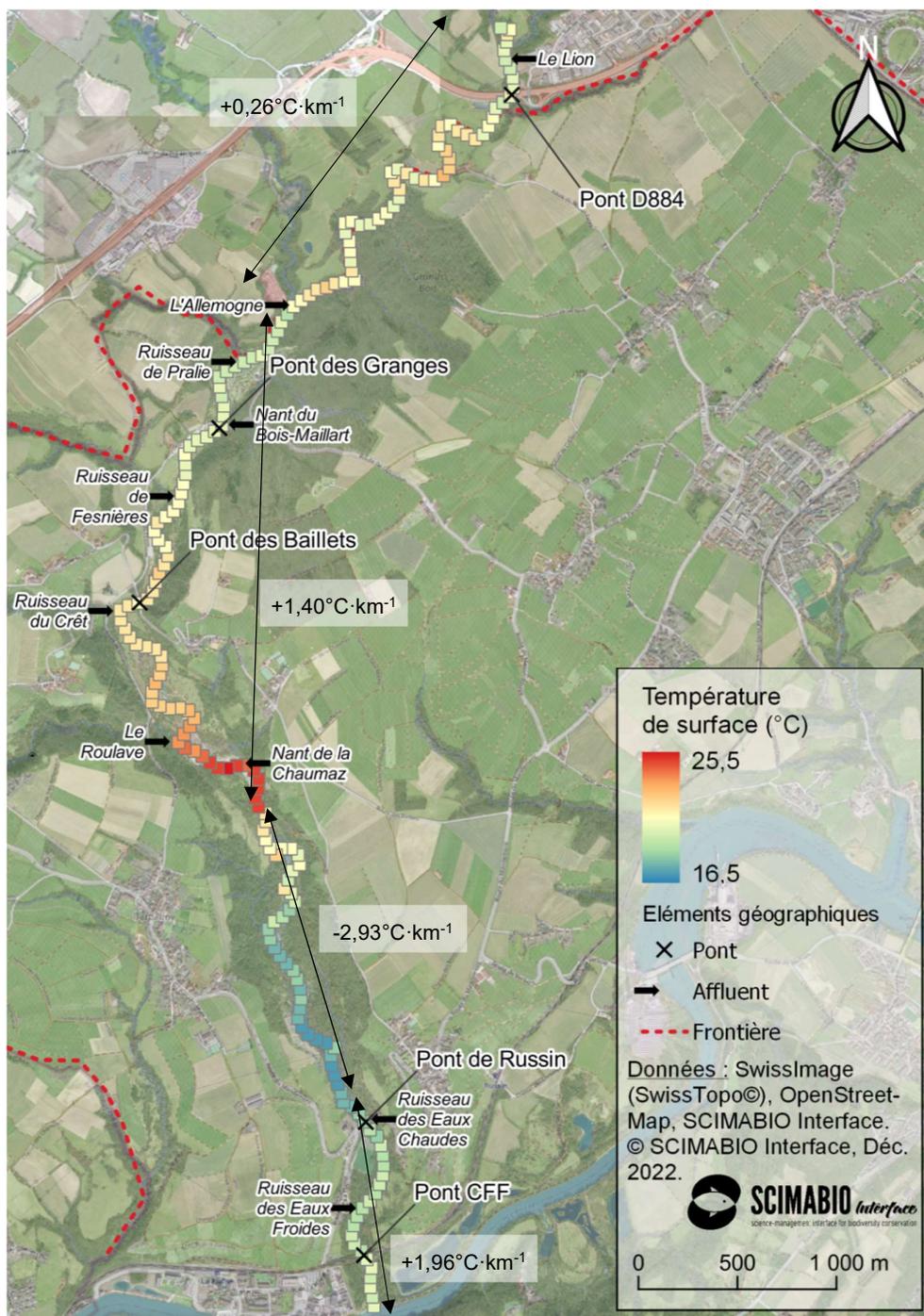


Figure 13. Carte des températures médianes représentées le long de la ligne centrale du chenal actif. Les flèches noires représentent les secteurs pour lesquels les gradients thermiques ont été calculés.

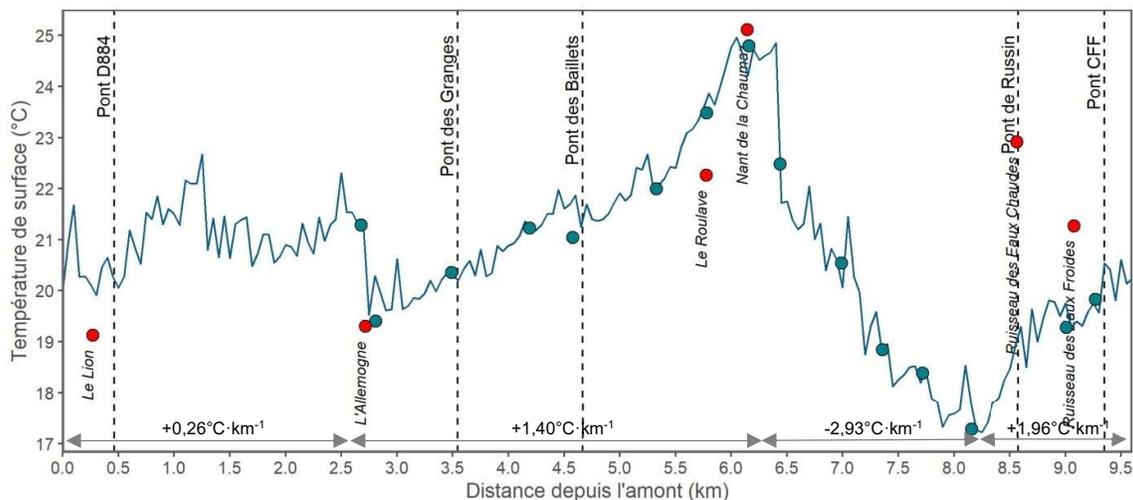


Figure 14. Profil longitudinal de température issu de la campagne IRT-a. Les points rouges représentent les affluents (leur positionnement en y reflétant leur température à l'exutoire) et les points bleus représentent les thermographes utilisés pour la validation des images thermiques (cf. Figure 11). Les valeurs de gradients thermiques sont données pour les secteurs représentés par les flèches grises.

Ainsi, alors que le gradient général sur l'ensemble du secteur d'étude est relativement faible, les contrastes thermiques le long du continuum fluvial apparaissent très marqués. Cette diversité thermique longitudinale est particulièrement forte par rapport à la longueur du secteur d'étude (<10 km) et aux caractéristiques hydromorphologiques plutôt naturelles de la rivière. Des brusques chutes de température de l'ordre de plusieurs °C sont fréquemment observées sur des rivières barrées par des barrages ou des retenues sur cours. Cette variabilité longitudinale se retrouve également dans la répartition des poches froides le long du linéaire.



Figure 15. Orthophoto (à gauche) et mosaïque thermique (à droite) illustrant l'échauffement observé en amont des Feuilletières.

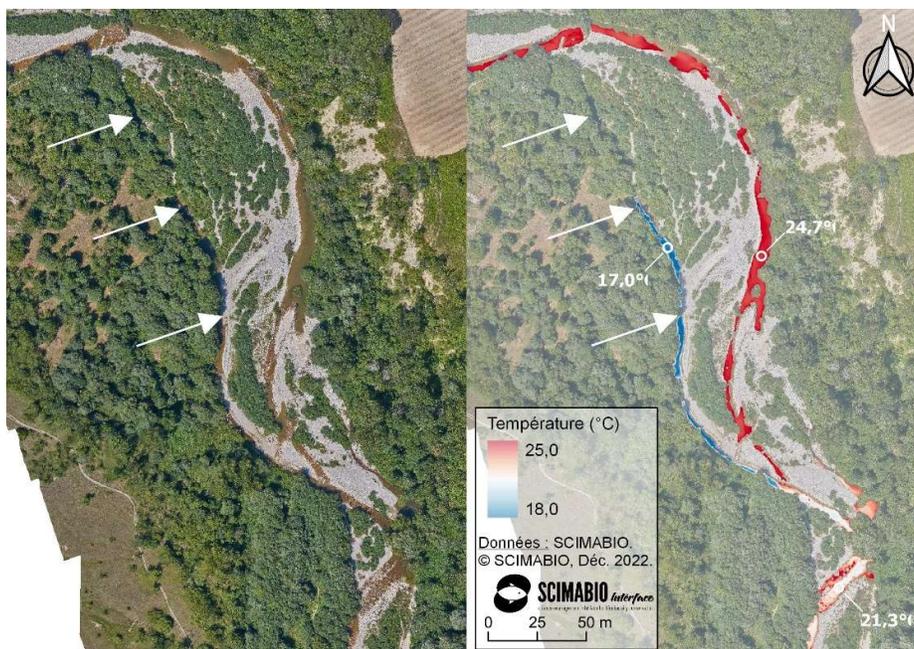


Figure 16. Orthophoto (à gauche) et mosaïque thermique (à droite) du secteur en amont des Feuilletières illustrant l'émergence du chenal latéral phréatique le long de la marge alluviale. Lorsque ce chenal rejoint l'Allondon, il génère une chute brusque de la température (-3,0°C).

4.4 DETECTION DES POCHEs FROIDES

La méthode de détection semi-automatique des poches froides a permis de recenser un total de 132 structures le long des 9,6 km du linéaire d'étude. Parmi ces structures, il est impossible pour 20 d'entre elle de les distinguer d'un effet de l'ombrage ; elles ne sont donc pas représentées dans l'analyse. La taille des 112 structures restantes varie de 0,36⁶ à 432 m², pour des écarts de température avec la rivière pouvant atteindre -5,2°C (Figure 17).

Leur distribution le long de la rivière est relativement inégale. Un nombre à peu près constant de poches froides est observé entre la confluence du Lion et la confluence de l'Allemogne, avec des tailles petites à moyennes et des écarts de température compris entre -0,6 et -1,25°C. C'est au niveau de l'Allemogne que la première poche froide et de grande taille est observée (120m², delta = -1,8°C). Entre les km 3,0 et 5,7, c'est-à-dire entre la confluence de l'Allemogne et celle du Roulave, un nombre très faible de poches froides a été recensé. A partir du km 5,9 (aval de la confluence du Roulave), la densité de taches froides augmente fortement (environ 35 par km), jusqu'à l'amont du pont de Russin au km 8,0. De nombreuses structures sont présentes sur le secteur très échauffé en amont des Feuilletières, bien que les taches les plus froides soient recensées en aval des Feuilletières, après l'arrivée des apports phréatiques latéraux majeurs décrits précédemment (Figure 16). Pour finir, quelques taches froides sont visibles entre le pont de Russin et le pont CFF, puis juste avant la confluence de l'Allondon avec le Rhône, mais en nombre limité.

Il est important de rappeler que la présence d'un nombre limité de poches froides traduit certes une fonctionnalité hydromorphologique limitée, mais n'aura pas nécessairement la même traduction biologique, puisque ces quelques poches froides peuvent représenter un enjeu biologique d'autant plus important qu'elles sont rares sur un secteur donné.

⁶ Note : ceci correspond au seuil minimal de taille défini dans la méthode.

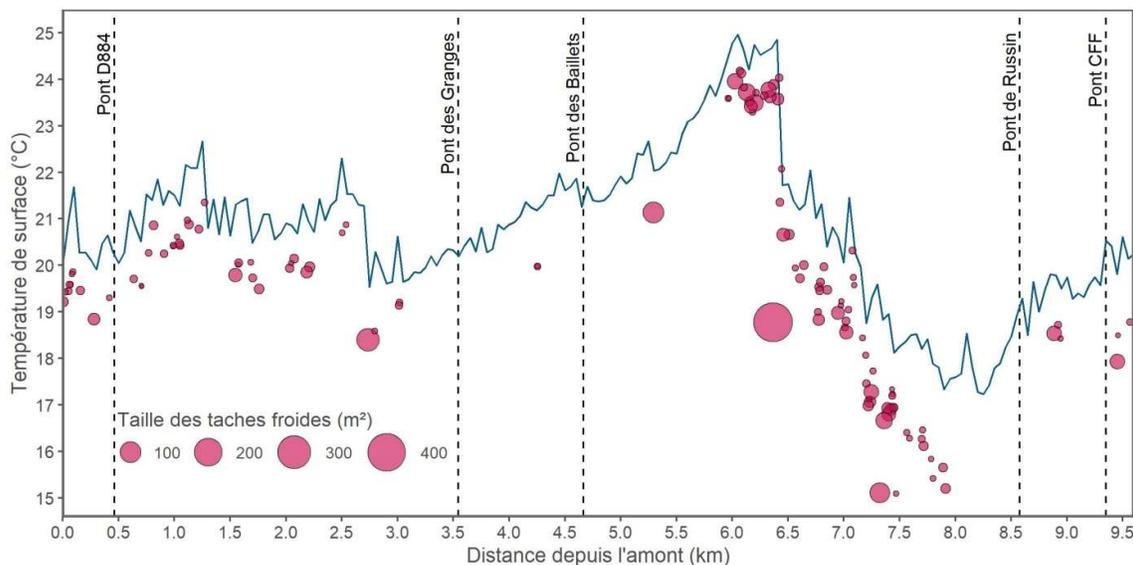


Figure 17. Distribution des taches froides recensées sur le linéaire étudiée de l'Allondon. La taille des cercles reflète la superficie visible sur les images des taches froides, et leur positionnement sur l'axe-y représente la température médiane de la tache froide.

Les taches froides ainsi recensées ont ensuite été classées suivant une typologie établie et tirée de la littérature scientifique. Cette typologie des taches froides n'est pas une typologie de refuges thermiques (Sullivan et al., 2021), pour lesquels une fonction biologique (notamment de thermo-régulation) est associée. Cette interprétation biologique, lorsque possible, est proposée en §5.2 « *Confrontation des données biologiques aux données thermiques* ».

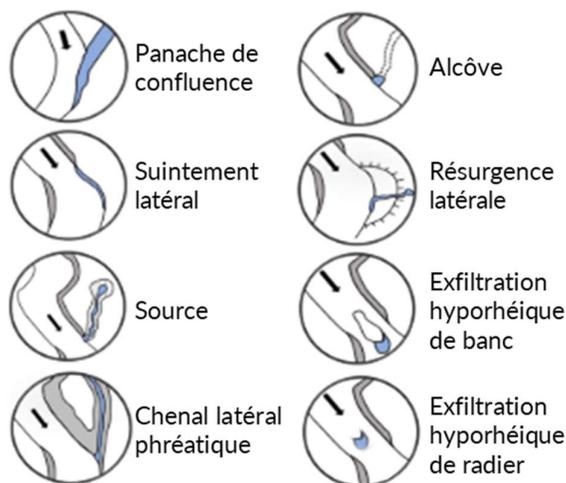


Figure 18. Nomenclature utilisée pour la classification hydromorphologique de tache froide. (Source : modifiée et traduite de Sullivan et al. (2021), construite à partir des classifications proposées par Torgersen et al. (2012), Dugdale et al. (2015), Marteau et al. (2022)). Une illustration sur des images thermiques de cette nomenclature est proposée en Annexe 1.

La classification typologique des taches froides permet de rendre compte de plusieurs éléments d'interprétation. Tout d'abord, ce sont les chenaux latéraux phréatiques, tel que celui observé en amont des Feuilletières, qui sont les poches les plus froides mais également les plus grandes (Figure 19). Viennent ensuite les panaches, issus d'affluents (ex. Allemogne, Figure 21) ou de chenaux phréatiques (ex. Crettaz, Figure 22), bien que tous les affluents n'apportent pas une eau plus fraîche que l'Allondon (voir points rouges sur la Figure 14 : notamment les ruisseaux des Eaux Chaudes et des Eaux Froides). Les exfiltrations en aval de radier et le long des bancs alluviaux sont les structures les plus nombreuses, avec un différentiel thermique faible à moyen selon les secteurs. Ces taches reflètent

majoritairement des échanges hyporhéiques, c'est-à-dire des remontées d'eau infiltrée en amont du radier ou du banc et qui ressort juste à l'aval de cette même structure. Ce recyclage local est globalement le signe de la présence d'un matelas alluvial plus ou moins épais et fonctionnel, capable de jouer un rôle sur les processus épuratifs des eaux de surface. Cependant, pour ce qui est de l'Allondon, certaines nuances sont à apporter étant donné la localisation de certaines de ces structures (voir plus bas). Quelques suintements latéraux sont observés, eux aussi relativement froids, et généralement associés à des arrivées de nappe alluviale directement au niveau des berges. Un nombre élevé de suintements latéraux peut être le signe d'une nappe alluviale perchée, que ce soit naturellement ou à cause de l'incision du lit. Enfin, des ressauts hydrauliques sur des secteurs plutôt lenticulaires font apparaître des taches froides sur des zones de mouilles ou de profonds. La formation de ces taches est généralement due à une stratification sur des zones assez profondes où l'eau du fond remonte à la surface. Ces eaux froides de profondeurs peuvent être le résultat de résurgences de nappe au fond du lit, ou d'une stratification thermique verticale par échauffement de la surface lorsque le secteur est exposé au soleil. Des investigations de terrain supplémentaires sont nécessaires pour pouvoir différencier ces deux phénomènes. Une seule et unique « source », c'est-à-dire une résurgence au milieu d'un banc alluvial, a été retrouvée sur l'Allondon (Figure 20).

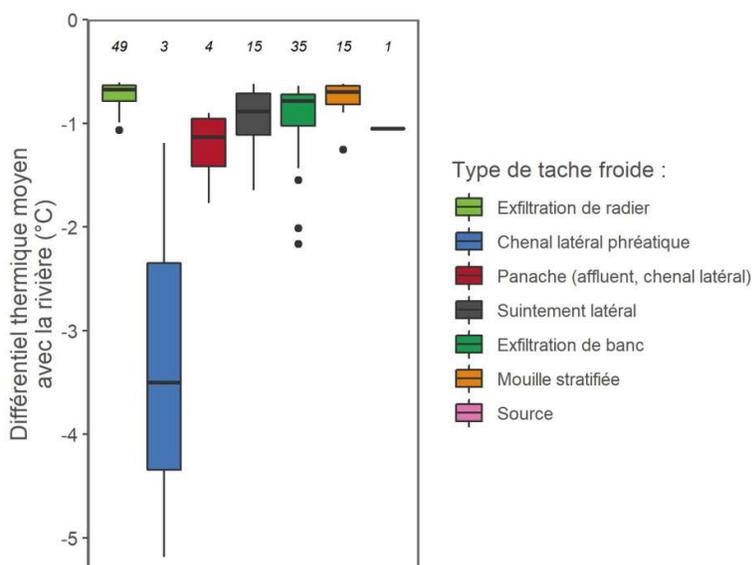


Figure 19. Différentiel thermique des poches froides recensées sur l'Allondon par IRT-a, classées selon la nomenclature présentée en Figure 19.

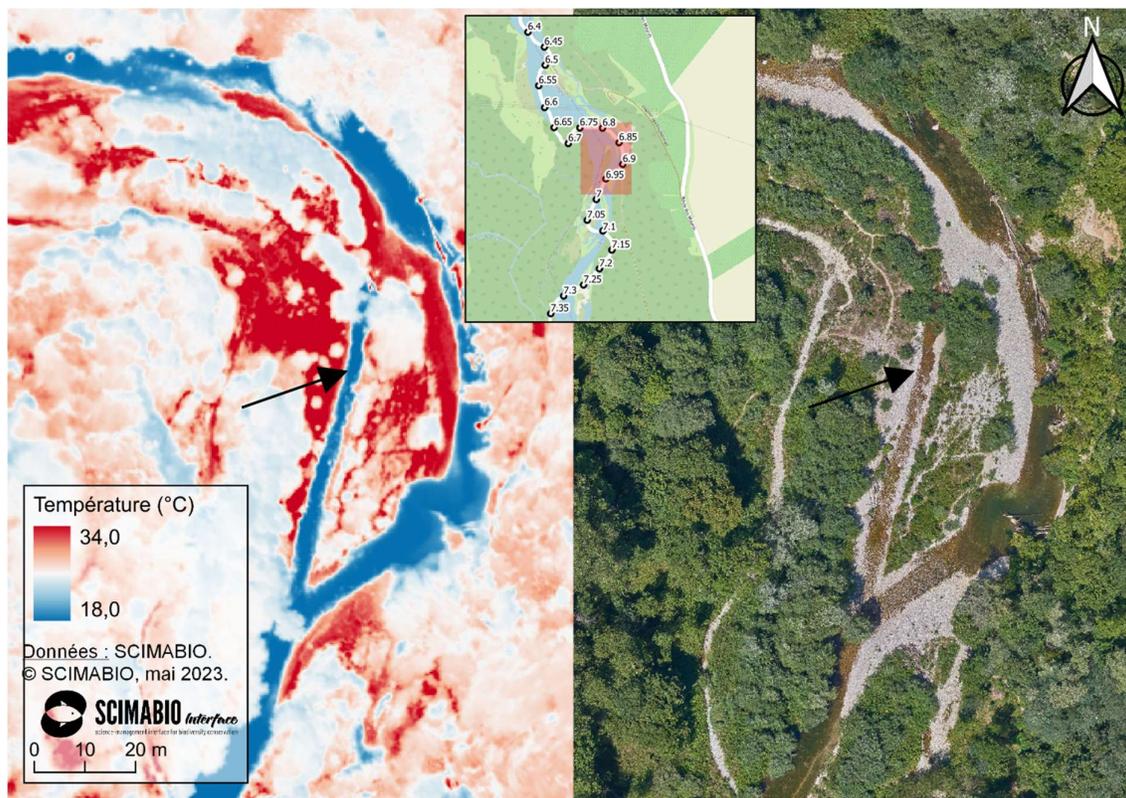


Figure 20. Localisation de la « source » recensée sur l'Allondon, qui représente une exfiltration d'eau froide au milieu d'un banc alluvial en aval du lieu-dit des Feuilletières.



Figure 21. Orthophoto (à gauche) et mosaïque thermique (à droite) illustrant le panache généré par la confluence de l'Allemogne avec l'Allondon.

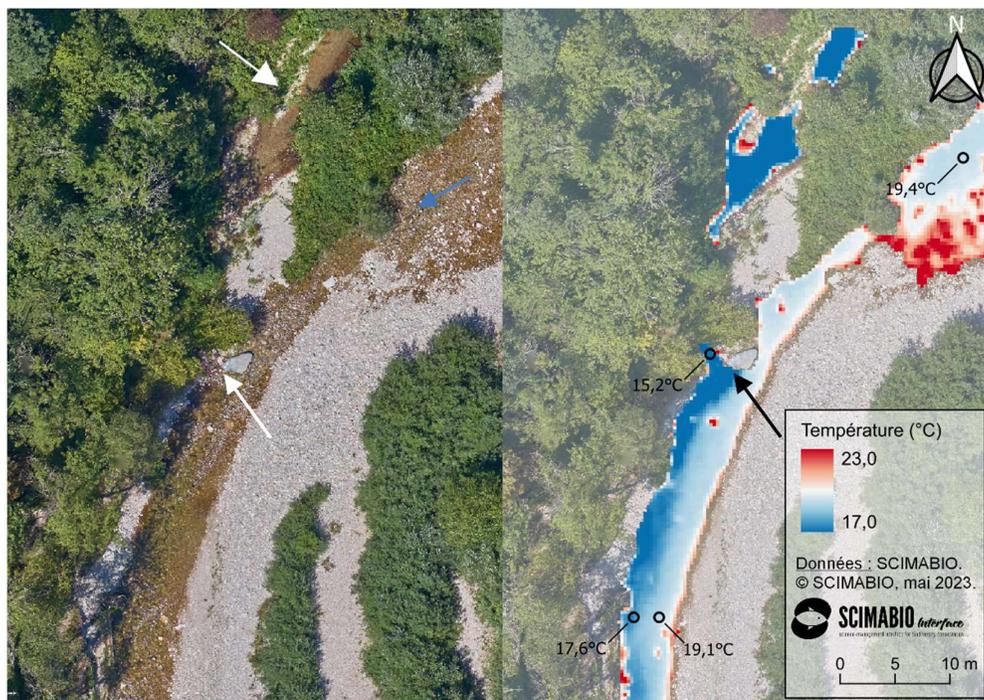


Figure 22. Orthophoto (à gauche) et mosaïque thermique (à droite) illustrant le panache généré par la confluence de du chenal latéral de Crettaz avec l'Allondon.

L'analyse de la distribution des taches froides sur le profil longitudinal de température apporte des éléments complémentaires aux analyses précédentes. Tout d'abord, une proportion importante des exfiltrations de radier (19/49, soit 39%) et la quasi-totalité des taches identifiées sur des profonds potentiellement stratifiés (14/15, soit 93%) se situent sur la partie amont du secteur d'étude, entre la confluence du Lion et la confluence de l'Allemogne (Figure 23). Les chenaux phréatiques sont tous situés sur le secteur alluvial des îles, ainsi qu'une majorité des exfiltrations de bancs (28/35, soit 80%, km 5,5 à km 8,0, Figure 23). On y retrouve également la plupart des suintements latéraux (13/15, soit 87%) et une large proportion des exfiltrations de radier (23/49, soit 47%). Toutes ces structures démontrent les interactions fortes entre la rivière et sa nappe alluviale. Les suintements observés sur le secteur échauffé (en amont des Feuilletières) sont tous positionnés en rive droite, et leur taille suggère que les écoulements sont importants. Il est probable que les structures situées légèrement plus à l'aval, classées comme « exfiltrations », aient la même origine que ces suintements ; la présence de bancs de galets a simplement forcé ces écoulements à traverser ces structures alluviales avant de rejoindre la rivière. Un chiffre illustre le déséquilibre latéral des apports phréatiques sur ce secteur : seulement 17% des taches froides (12/69) sont attribuables à des processus se déroulant en rive gauche, le reste étant directement imputable aux apports de nappe massifs observés en rive droite, prenant alors des formes différentes selon la proximité des résurgences et la présence/absence de structures alluviales pour les soutenir (ex. radiers, bancs).

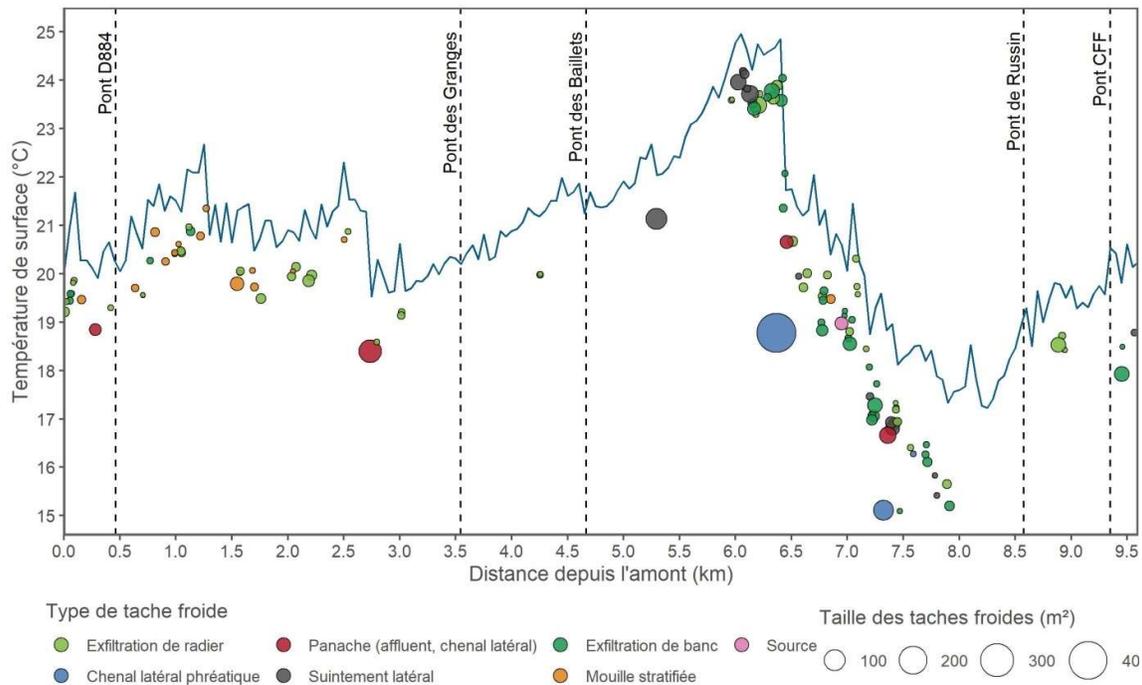


Figure 23. Distribution longitudinale des taches froides cartographiées par IRT-a, et classification de ces taches, basée sur la nomenclature précédente (Figure 18).

4.5 INTERPRÉTATION HYDROGÉOLOGIQUE ET HYDROMORPHOLOGIQUE DES RESULTATS

Les données issues de la cartographie thermique IRT-a de l’Allondon suggèrent deux informations principales du point de vue du fonctionnement hydrogéologique et hydromorphologique :

- les apports phréatiques issus de la nappe alluviale sont fortement marqués sur le secteur des îles, à partir des Feuilletières, avec une tendance majoritaire en rive droite ;
- les structures thermiques (ou taches froides) associées à des bancs de galets (ou alluviaux) sont toutes regroupées entre le km 6 et le km 8,3, suggérant que le reste de la rivière est peu concernée par la présence de bancs.

La lecture de l’étude hydrogéologique (rapport de Hottinger, (1998)) et l’analyse de la classification des orthophotos (distinction du chenal en eau, des bancs de galets et des zones végétalisées) fournissent des informations concordantes et complémentaires à ces observations.

La cartographie hydrogéologique de la nappe de l’Allondon confirme que la rivière subit des pertes vers la nappe, entre le pont des Granges et les Feuilletières (Figure 24). Elle confirme également que la nappe devient affleurante au niveau des Feuilletières, sur quelques kilomètres, jusqu’à quelques centaines de mètres en amont du pont de Russin. Ce secteur d’exfiltration de nappe correspond précisément au tronçon caractérisé par un gradient thermique négatif fort (Figure 14). L’IRT-a nous apprend en plus que ces affleurements de nappe prennent plusieurs formes lorsqu’ils atteignent la rivière. Tout d’abord, un volume d’eau conséquent rejoint l’Allondon en un apport ponctuel au niveau des Feuilletières, puis ces apports continuent sous la forme de suintements latéraux et d’exfiltration à travers les bancs alluviaux (Figure 23). Ensuite, la grande majorité de ces structures froides est alignée en rive droite ; c’est par exemple à cet endroit que les refuges thermiques n°57 et 61 sont localisés. Enfin, le retour de zone d’exfiltration à l’amont immédiat de la confluence avec le Rhône n’est pas conjugué à une diminution du gradient thermique. Il est probable que les échanges soient le fait de la nappe du Rhône, dont les propriétés sont différentes de celles de l’Allondon.

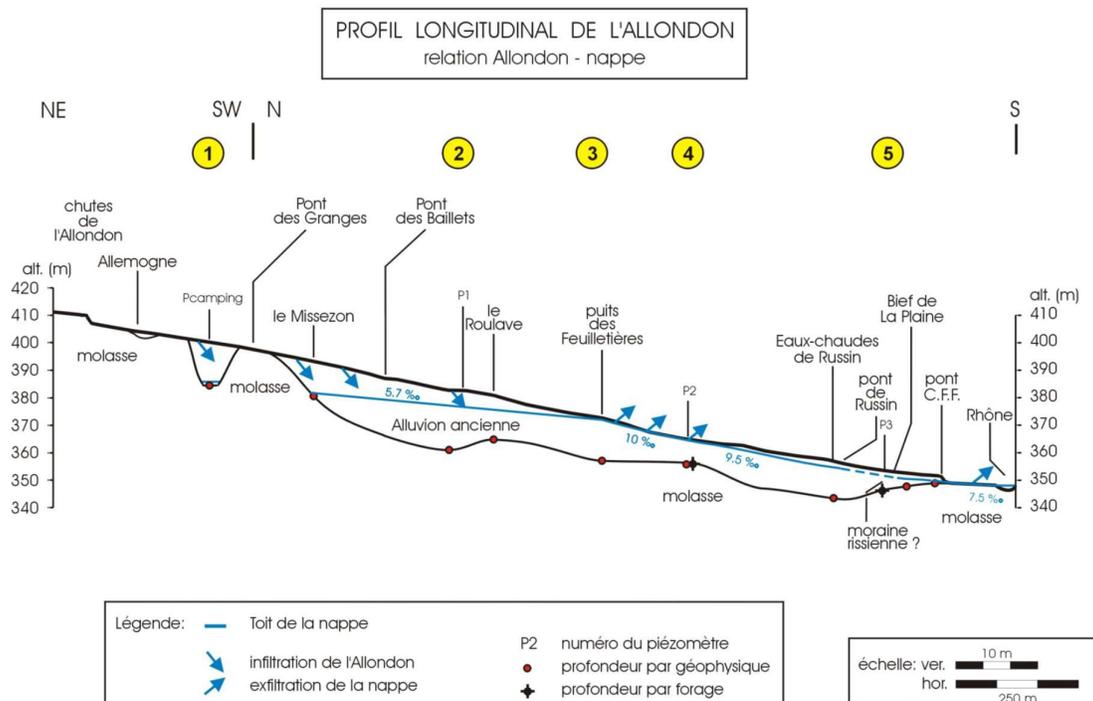


Figure 24. Profil altitudinal de l'Allondon avec représentation des secteurs d'infiltration et d'exfiltration de nappe issue du rapport d'hydrogéologie (Hottinger, 1998).

L'analyse des structures alluviales de la bande active montre que la partie amont de la rivière présente peu (voire pas) de bancs jusqu'au pont des Baillets. Quelques exfiltrations de radiers sont néanmoins présentes sur les secteurs où l'alternance radier-mouille permet quelques échanges hyporhéiques dynamiques. Certaines de ces zones profondes présentent également des remontées froides en surface, pouvant provenir d'échanges diffus en profondeur avec la nappe qui remontent à la surface sous l'influence de conditions hydrauliques favorables. A noter que la canopée dense sur ce secteur limite probablement la détection des taches froides puisque certaines portions de cours d'eau ne sont tout simplement pas visibles depuis les airs.

Le secteur le plus morphologiquement dynamique, nommé secteur « des îles », présente à la fois des bancs nus et des bancs végétalisés. En revanche, tous ces bancs ne sont pas sujets à des échanges nappe-rivière ou hyporhéiques importants, puisque de tels échanges sont uniquement visibles en aval des Feuilletières, alors que des bancs sont présents en aval des Baillets (Figure 25). Ainsi, l'absence d'exfiltrations hyporhéiques (de bancs ou de radiers) entre le pont des Baillets et les Feuilletières n'est pas le fait de l'absence de bancs alluviaux puisqu'ils sont présents en densité importante (Figure 25), mais la conséquence d'échanges qui se font uniquement du cours d'eau vers la nappe, avec des pertes conséquentes vers la nappe sur ces quelques kilomètres.

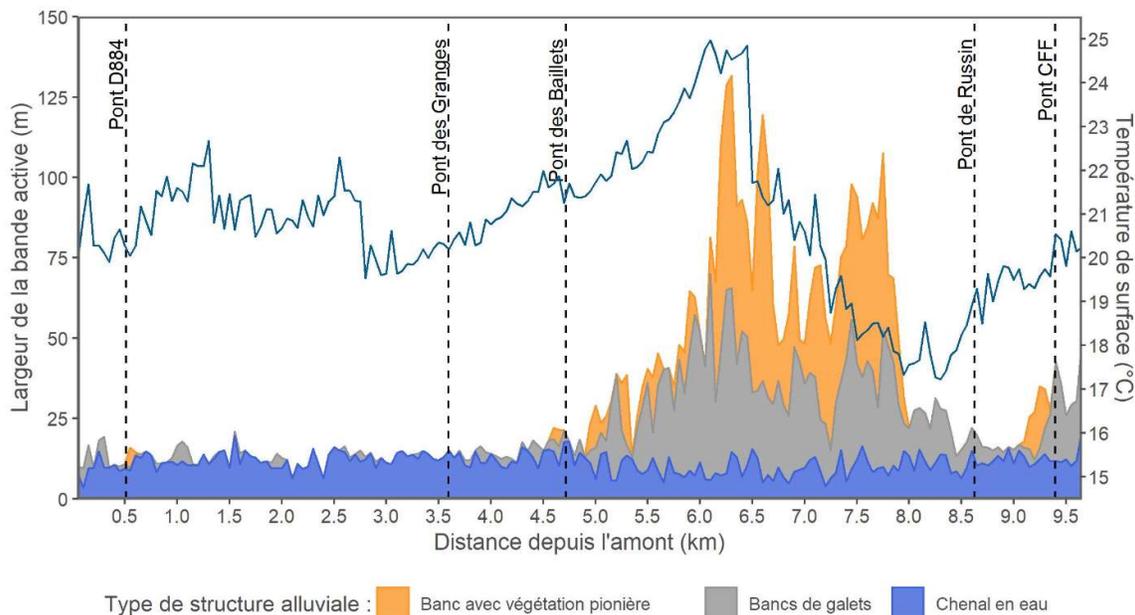


Figure 25. Largeur des structures alluviales de la bande active de l'Allondon. Données issus de la classification des orthophotos à haute résolution.

En conclusion, le fonctionnement thermique s'apparente à un système multi-modal : à l'équilibre à l'amont de l'Allemogne, avec des pertes importantes et un fort échauffement jusqu'aux Feuilletières, puis une chute brutale des températures par des apports de nappe puissants jusqu'à l'amont du pont de Russin. Il est expliqué par la structure hydrogéologique de la rivière, à savoir la présence d'un matelas alluvial épais sur le secteur entre le pont des Granges et le pont de Russin et l'affleurement de la nappe aux Feuilletières, le tout encadré par des affluents jouant un rôle de tampon thermique non négligeable (ex. Allemogne, Lion dans une certaine mesure). En ce qui concerne la distribution des habitats thermiques, c'est la structure alluviale de la rivière et sa morphologie qui guide en grande partie la façon dont ces apports de nappe se distribuent au sein de la masse d'eau.

5. MISE EN RELATION AVEC LES DONNEES BIOLOGIQUES

5.1 PRESENTATION DES DONNEES PISCICOLES

Un récapitulatif des données de comptage en plongée est présenté dans le Tableau 6 et sur la Figure 26. Les relevés ont été réalisés sur 13 ans, avec un comptage annuel en 2008 puis de 2011 à 2018, puis des comptages plus fréquents entre 2019 et 2022. Ils ont majoritairement été réalisés en été (juillet, août ou début septembre) à l'exception de 2015 (octobre), 2017 (fin septembre) et 2018 (novembre).

La séquence temporelle de ce jeu de données permet de tirer quelques enseignements clés sur l'évolution des populations d'ombres (mais aussi de truites et de barbeaux) sur l'Allondon au cours des dernières années. Le nombre d'ombres communs observés en plongée diminue significativement depuis le début des comptages en 2008, et notamment pour les adultes ($R^2 = 0,75$, p-value < 0,01) et sub-adultes ($R^2 = 0,38$, p-value = 0,002). Une chute drastique du nombre de juvéniles est également observable depuis 2020 malgré des effectifs très importants en 2019 (Tableau 6). En revanche, une telle tendance ne semble pas observée pour les effectifs de truites ($R^2 = 0,01$, p-value = 0,96) ni de barbeaux ($R^2 = 0,10$, p-value = 0,09).

Tableau 6. Récapitulatif des données (dates et nombre d'individus) issues des comptages en plongée, réalisées par GREN entre 2008 et 2022 (GREN, 2020, 2021, 2022). La colonne « Modèle ? » répertorie les données qui ont servi à créer le modèle d'abondance, voir §5.1.2).

Année	Date	Ombres adultes	Ombres sub-adultes	Ombres juvéniles	Truites	Barbeaux fluviatiles	Modèle ?
2008	28 août	80	27	9	4	0	✓
2011	1 sept	91	141	537	140	0	✓
2012	13 août	98	176	167	60	5	✓
2013	15 août	59	98	14	51	2	✓
2014	21 août	74	160	51	75	0	✓
2015	13 oct	107	12	0	38	3	✓
2016	19 août	48	6	799	116	27	✓
2017	27 sept	21	86	44	49	23	✓
2018	14 nov	26	11	10	23	0	✓
2019	21 mai	13	6	103	35	12	
2019	24 juil	26	20	989	116	61	✓
2019	25 nov	22	28	451	46	1	
2020	20 mai	21	65	0	72	44	
2020	21 août	22	4	2	46	26	✓
2020	6 nov	19	5	1	44	12	
2021	9 mars	10	1	0	60	6	
2021	15 juin	12	7	1	47	27	✓
2021	13 août	17	4	0	135	34	
2022	30 juin	7	4	10	29	4	✓
2022	13 oct	7	1	0	52	4	

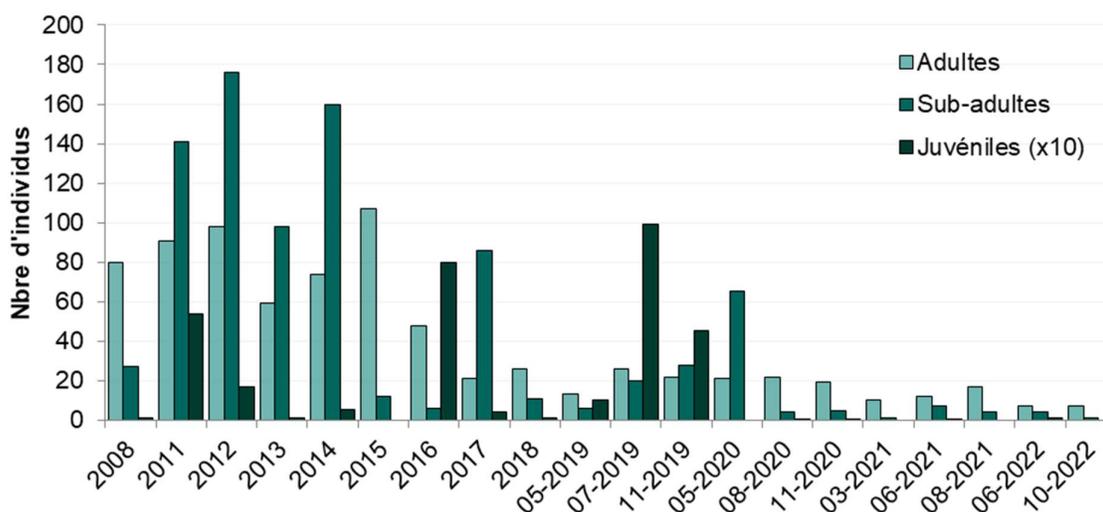


Figure 26. Représentation graphique des effectifs d'ombres communes recensés sur l'Allondon par GREN entre 2008 et 2022.

5.1.1 RESULTATS DES COMPTAGES EN PLONGEE 2022

Les données des comptages réalisés en 2022 (juin et octobre) sont présentés ci-dessous (Figure 27). Le nombre d'ombres adultes et sub-adultes y est particulièrement faible (ex. plus faible effectif d'ombres adultes depuis le début des recensements). Les effectifs de truites sont dans la moyenne des observations annuelles, tandis que les effectifs de barbeaux apparaissent légèrement plus faibles que ces dernières années (Tableau 6). La distribution longitudinale des individus est globalement similaire entre juin et octobre, avec quelques particularités :

- Tous les juvéniles d'ombres observés en 2022 l'ont été uniquement en juin, et au sein du même habitat en amont du pont de Russin (i.e. 1 seul banc d'une dizaine d'individus) ;
- Les ombres adultes semblent s'être peu déplacés entre juin et octobre, concentrés entre les Baillets et l'amont du pont des Granges, bien qu'ils aient potentiellement récupéré quelques habitats vers l'aval après l'épisode estival ;
- Les effectifs de truites dénombrés sont plus importants en octobre qu'en juin, ce qui peut être potentiellement lié à l'imprécision des comptages de truites qui ont tendance à se réfugier dans les caches, en particulier à l'étiage. Aucun repeuplement n'a été réalisé entre mai et octobre 2022 (source : OCEau).

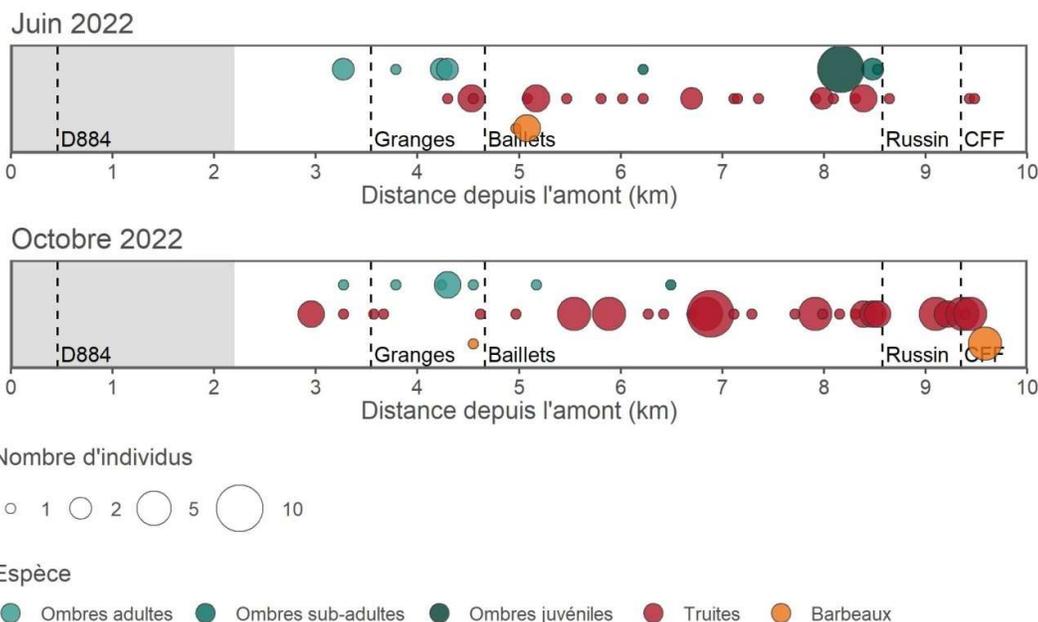


Figure 27. Distribution longitudinale des poissons observés lors des comptages en plongée de 2022. Les effectifs d'ombres sont subdivisées en adultes, sub-adultes et juvéniles selon les critères proposés par GREN dans leur rapport (GREN, 2022). La zone grisée représente le secteur non prospecté en plongée

5.1.2 INTEGRATION DES DONNEES DE PLONGEE PLURIANNUELLES

Les effectifs d'ombres recensés sur l'Allondon diminuent donc significativement depuis le début des campagnes de comptage. Ainsi, le nombre d'individus observés en juin 2022, c'est-à-dire la campagne la plus proche (au niveau temporel et météorologique) de la campagne IRT-a, était de 7 adultes et 1 sub-adulte seulement. Cet effectif est trop faible pour pouvoir construire des modèles de distribution significatifs à l'échelle du tronçon d'étude.

La dimension temporelle du jeu de données issu des comptages en plongée a donc été utilisée pour augmenter les effectifs et générer un modèle d'abondance qu'il soit possible d'analyser en lien avec les données de température. Les campagnes de 2008 à 2018, ainsi que les campagnes estivales de 2019 à 2022, ont été intégrées au sein d'un jeu de données unique (Tableau 6). Les comptages ont été regroupés par tronçons de cours d'eau de 250 m pour estimer les effectifs moyens annuels de chaque tronçon. Cette opération a été répétée séparément pour les 3 classes de taille proposées lors des comptages : adultes, sub-adultes et juvéniles (Figure 28). Enfin, un modèle d'abondance a été construit à partir de ces données à l'aide d'un modèle de lissage « loess ». A noter que le regroupement en tronçons s'est fait sur la base des coordonnées fournies pour chacun des comptages, et que la précision de mesure de ces coordonnées GPS est inconnue.

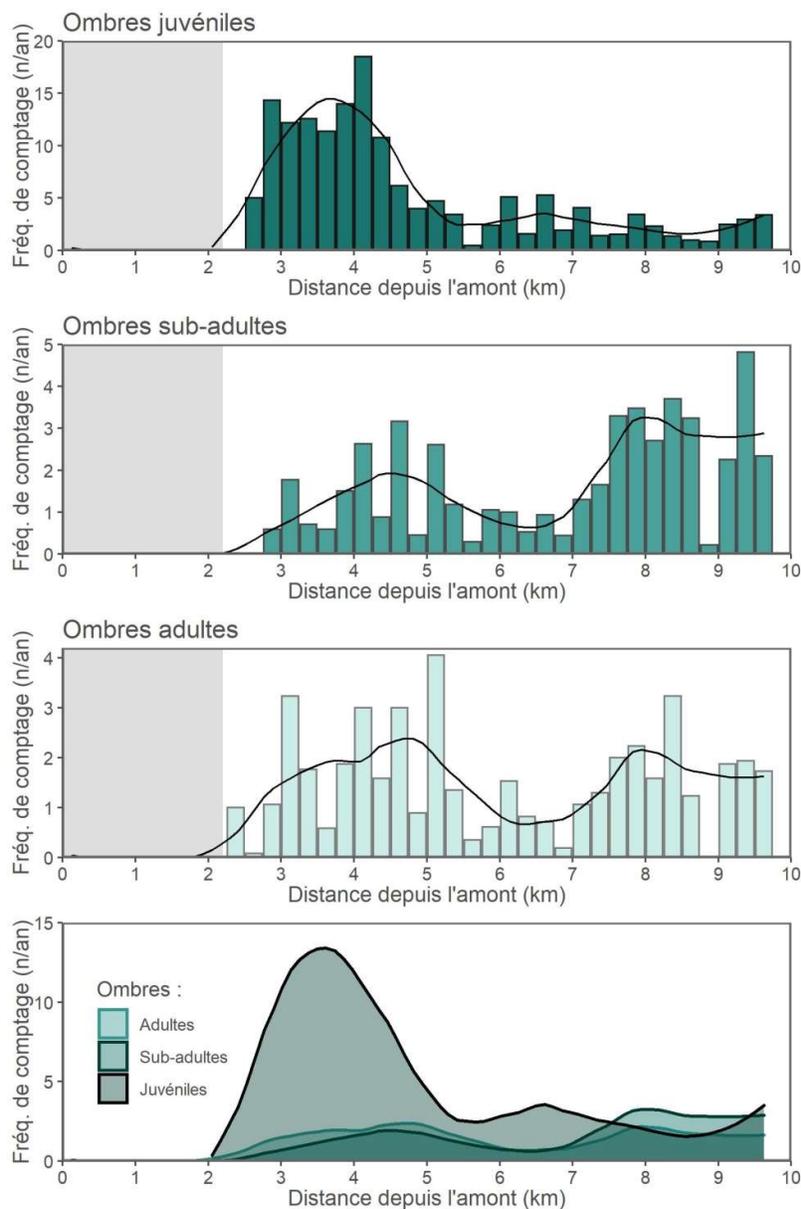


Figure 28. Histogramme des densités moyennes annuelles et modèle d'abondance des différentes classes de taille issues des données de comptage en plongée. Le graphique du bas reprend les 3 modèles d'abondance issus de l'analyse des données estivales de 2008 à 2022. Le secteur grisé représente la zone d'étude couverte par la campagne IRT-a mais qui ne fait pas partie du secteur couvert par les comptages en plongée.

Les résultats ainsi obtenus permettent d'identifier quelques motifs dans la distribution longitudinale des individus :

- Malgré des effectifs en baisse ces dernières années, l'abondance moyenne de juvéniles depuis le début des comptages est nettement plus élevée que celle des stades plus avancés ;
- Le modèle d'abondance des juvéniles semble être légèrement bimodal, avec une densité moyenne plus importante sur la partie amont du secteur d'étude (entre l'Allemagne et le pont des Baillets) et quelques individus recensés juste à l'aval des Feuilletières (km 6,7) ;
- Les modèles d'abondance des adultes et des sub-adultes sont similaires, et nettement bimodaux, avec des effectifs plus importants autour du pont des Baillets (km 4,5) ainsi qu'en amont du pont de Russin (km 8,0). A noter cependant une abondance plus forte

d'adultes que de sub-adultes à l'amont, mais plus forte de sub-adultes que d'adultes à l'aval.

Enfin, les comptages de 2022, malgré le faible effectif, corroborent les observations interannuelles sur la distribution des adultes et sub-adultes (notamment pour les données de juin 2022, Figure 27). En revanche, la dynamique des juvéniles semble totalement inversée puisque les 10 individus ont été retrouvés au km 8,15, là où peu d'ombrettes sont habituellement recensées.

5.1.3 PROSPECTIONS PAR PÊCHES ELECTRIQUES 2022

Des données biologiques issues de pêches électriques sont également disponibles pour 2022. Les relevés ont eu lieu les 12 et 13 juillet, c'est-à-dire juste avant la campagne IRT-a. Ils se sont déroulés sur 4 stations : 2 stations à l'amont (entre le pont des Granges et le pont des Baillets [1], puis à l'amont immédiat du pont des Baillets [2]), et 2 stations à l'aval du secteur d'étude (à l'amont du pont de Russin [3], puis à l'amont du pont CFF [4]) (Figure 29 & Figure 30).

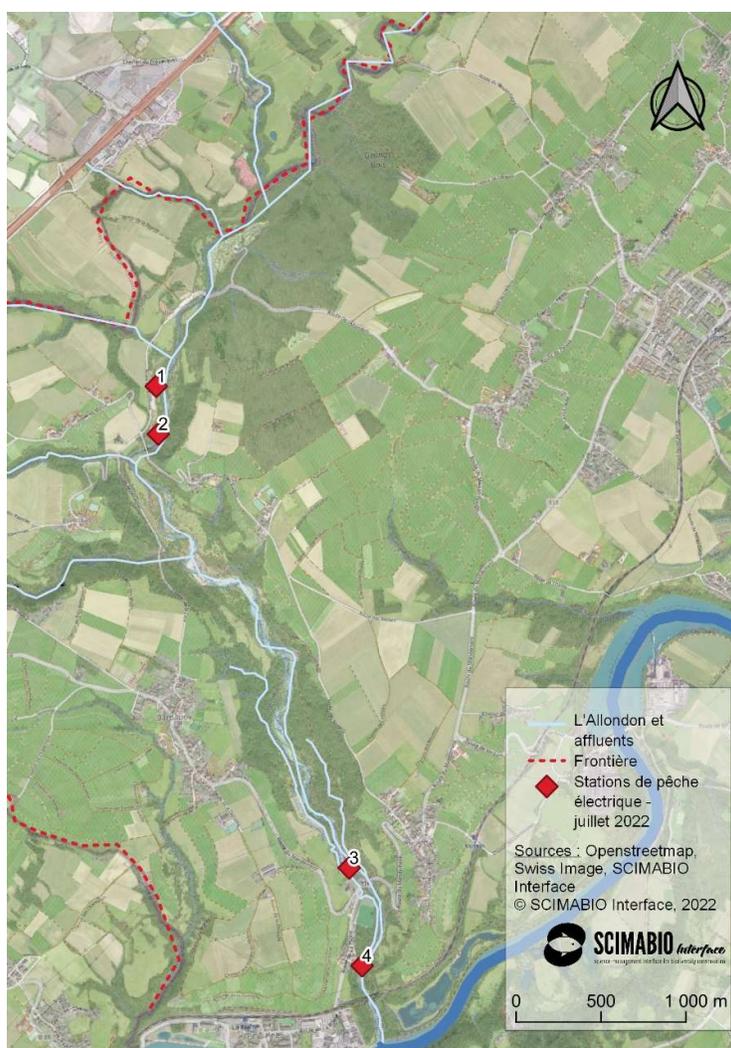


Figure 29. Localisation des stations de pêches électriques réalisées en 2022. 1- Parking Baillets (longueur de la station = 92m), 2- Aval Baillet (57m), 3- Amont pont de Russin (182m), 4- Les Moulins (110m).

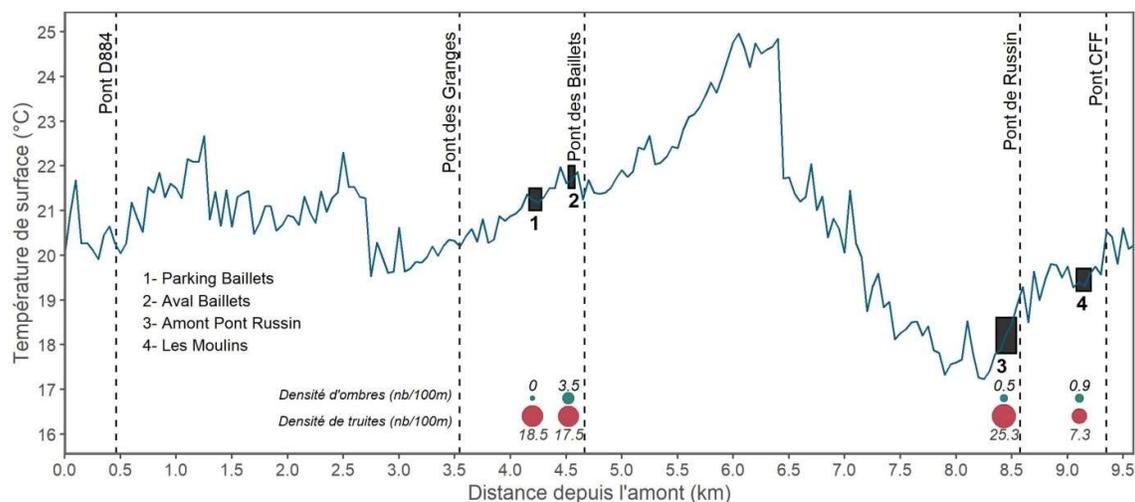


Figure 30. Localisation des stations de pêches électriques de juillet 2022 sur le profil de température IRT-a de juillet 2022. La taille des carrés noirs numérotés de 1 à 4 reflète la longueur des secteurs prospectés. La taille des cercles verts et rouges reflète la densité de poissons inventoriés sur ces secteurs (en nb/100m linéaire) en un unique passage.

Aucun ombre n'a été recensé sur la station [1], malgré la présence de quelques truites (Figure 30 & Figure 31). Deux ombres ont été pêchés sur la station [2], à proximité du secteur où des ombres avaient été recensés en juin 2022 (Figure 27) (densité linéaire de 3,5 ind·100 m⁻¹). Un seul ombre a été pêché sur chacune des stations [3] et [4], malgré la présence de quelques truites sur le secteur des Moulins [4] et une plus forte densité de poissons sur la station en amont du pont de Russin [3] (i.e. 109 ind·100 m⁻¹, principalement vairons, chabots et truites) (Figure 30 & Figure 31).

Ces données biologiques, bien que plus limitées spatialement, semblent confirmer les observations faites lors des plongées de juin 2022 :

- Globalement, peu d'ombres sont présents sur l'Allondon en 2022, même sur les secteurs choisis pour leur densité habituellement supérieure à la moyenne ;
- Quelques ombres adultes vivent au niveau du pont des Baillels, ainsi qu'en amont du pont de Russin, là où les modèles d'abondance interannuelle prédisent des densités théoriques plus élevées.

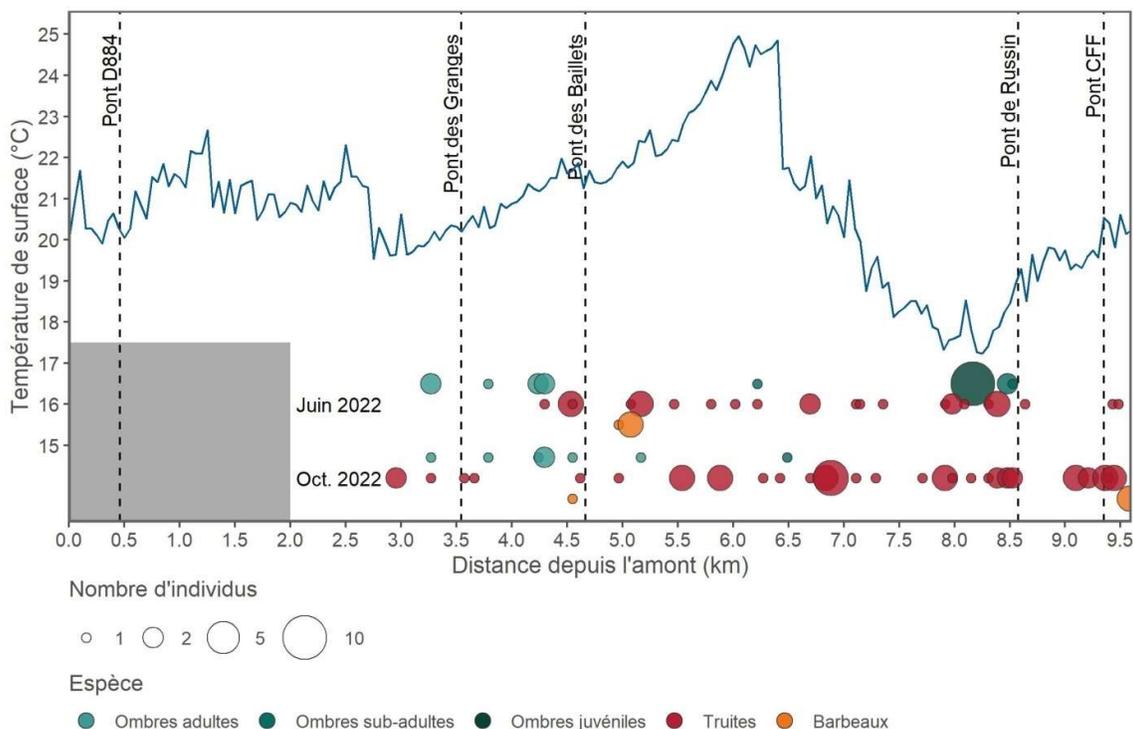


Figure 31. Nombre et répartition des ombres (stades adultes, sub-adultes et juvéniles), truites (tous stades confondus) et barbeaux fluviatiles (tous stades confondus) observés lors des ponnées de juin et d'octobre 2022, projetés sur le profil longitudinal de température issu de la campagne IRT-a de juillet 2022.

La comparaison du profil longitudinal de température issu de la cartographie IRT-a avec les modèles d'abondance des différentes classes de taille des ombres communs offre des pistes particulièrement riches d'enseignement pour expliquer la distribution des individus. En partant des postulats que (1) le profil longitudinal de température est susceptible de se reproduire à l'avenir pour de nombreux épisodes de bas débits et de fortes chaleurs et reflète donc les conditions estivales « classiques » d'un été chaud, et que (2) les modèles d'abondance moyennés sur les 12 années de suivis en plongée sont relativement robustes étant donné le nombre d'individus utilisés pour les construire ($n = 4205$), il est possible d'interpréter la distribution des ombres en fonction des conditions de température.

Tout d'abord, les modèles d'abondance montrent globalement un nombre plus élevé d'individus de part et d'autre du secteur en amont des Feuilletières où l'échauffement est le plus important (Figure 32). Ainsi, les ombres sont majoritairement trouvés sur un secteur amont allant de la confluence avec l'Allemagne jusqu'à l'aval du pont des Baillels, puis sur un secteur aval en aval des îles. Ces deux secteurs correspondent aux zones les plus froides du linéaire d'étude, sous l'influence thermique de l'Allemagne (amont) et des îles (aval). Cette répartition longitudinale particulière suggère une forte influence de la température sur le choix des habitats utilisés par les ombres en période estivale.

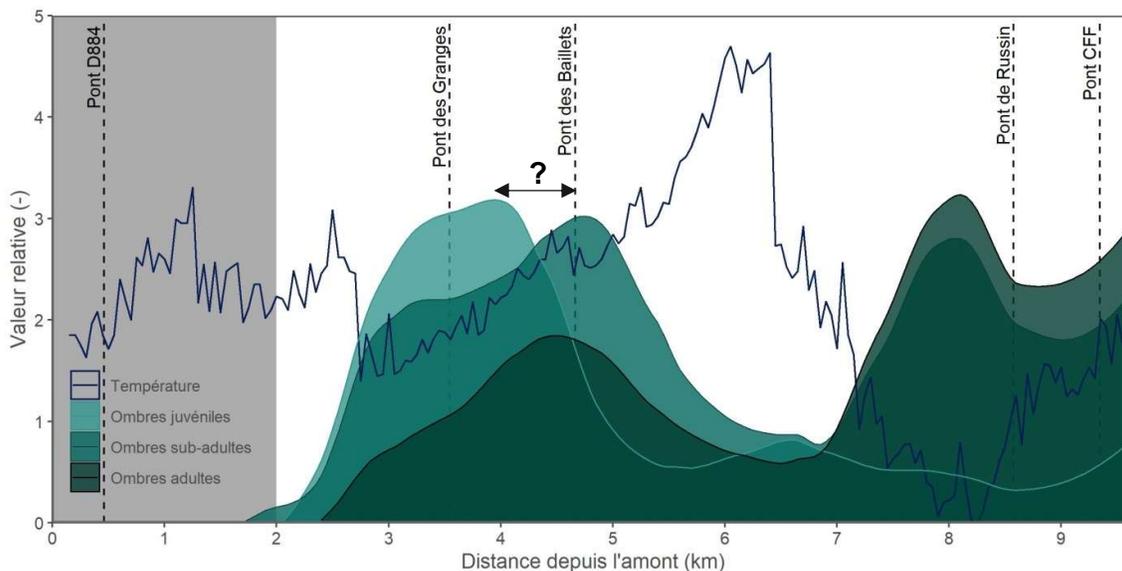


Figure 32. Modèles d'abondance des 3 classes de taille de l'ombre commun projetés sur le profil longitudinal de température issu de la campagne IRT-a. La flèche noire et le point d'interrogation font référence à l'hypothèse de différence de sensibilité thermique des juvéniles et des adultes pour expliquer l'écart des modèles d'abondance (voir texte).

Ensuite, la majorité des juvéniles est recensée sur le secteur amont de la zone d'étude, en aval de la confluence de l'Allemogne, centré autour du pont des Baillels. La présence de juvéniles sur ce secteur peut être en partie attribuée à la présence de frayères et d'habitats favorables (ex. GREN, 2021, 2022). En revanche, leur forte abondance estivale sur le secteur influencé par les eaux fraîches de l'Allemogne (sauf ces dernières années 2020-2022) suggère une limitation thermique à leur distribution. Bien que le *preferendum* thermique des juvéniles soit mal établi (Tableau 1), il est fort probable que, comme la majorité des poissons dulçaquicoles, ils soient plus sensibles aux températures élevées que les adultes (Tissot and Souchon, 2010). Ainsi, une plus forte sensibilité thermique associée à une rapide augmentation de la température de l'eau au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'Allemogne suggère une probable restriction des zones d'habitat des juvéniles en partie liée à la température estivale.

Pour les stades sub-adultes et adultes, le changement de *preferendum* d'habitat vers des faciès davantage profonds conduit probablement certains individus à dévaler (voir flèche, Figure 32), et à accéder à un spectre plus large d'habitats thermiques vers l'aval malgré le gradient de température. Ces habitats profonds ne constituent que rarement des refuges thermiques dans ces secteurs soumis à réchauffement (voir §3.3.3). En outre, des mouvements saisonniers sont également observables, en comparant par exemple la répartition des adultes en juin puis en octobre 2022 ; le même nombre de poissons a été observé en plongée, mais certains individus ont été dévalés en octobre 2022, une fois l'épisode caniculaire et d'étiage sévère terminé (Figure 31).

Enfin, les abondances des adultes et des sub-adultes montrent une légère différence entre la répartition secteur amont/secteur aval (les sub-adultes montrant une préférence pour le secteur aval). Il est possible que la préférence des sub-adultes pour le secteur le plus frais du linéaire d'étude reflète également une plus forte sensibilité thermique que les adultes, ou que la taille des habitats disponible contraigne la répartition des individus selon leur taille (lame d'eau plus fine, moins de radiers et plus de mouille sur le secteur aval de la zone alluviale. Quoi qu'il en soit, les modèles ne sont pas assez différents pour en tirer des conclusions.

6. DISCUSSION & CONCLUSION

L'étude thermique de l'Allondon alliant cartographie thermique par télédétection et suivi chronique « classique » a permis une caractérisation fine du fonctionnement thermique de la rivière. L'interprétation des résultats s'est également appuyée sur des informations hydrogéologiques et une lecture hydromorphologique des habitats thermiques. Enfin, la plus-value de cette étude se trouve principalement dans la possibilité de faire le lien entre les enseignements fonctionnels thermiques de la rivière en période d'étiage et des suivis biologiques réalisés de manière fréquente (2011-2022) et le long d'un continuum couvrant la majorité du linéaire d'étude.

6.1 ENSEIGNEMENTS PRINCIPAUX DE LA CARTOGRAPHIE IRT-A

La cartographie thermique de l'Allondon a mis en évidence des éléments clés pour la compréhension du fonctionnement thermique de la rivière. Tout d'abord, elle a confirmé le rôle majeur de l'Allemogne pour tamponner la température de l'Allondon en période estivale sur la partie amont du linéaire, avec la présence d'un panache relativement long (le mélange total des eaux de l'Allemogne et de l'Allondon est de l'ordre de 100 m à l'étiage) et froid pouvant jouer un rôle de refuge thermique en été.

Ensuite, la distribution des taches froides et le contraste fort de gradient thermique entre la partie amont (Allemogne → Feuilletières) et aval (Feuilletières → amont du pont de Russin) indique des processus d'infiltration (ou pertes) vers la nappe en amont, et d'exfiltration (ou remontées de nappe) en aval. Ce constat est appuyé par l'analyse hydrogéologique de la nappe de l'Allondon réalisée en 1998. Ces apports se matérialisent majoritairement en rive droite, sous la forme de chenaux latéraux phréatiques (Crettaz, amont des Feuilletières). Pour ce dernier, les apports en eau à l'étiage sont au moins aussi importants que le débit de l'Allondon provenant de l'amont. La chute brutale de température au niveau de ces apports ($-3,0^{\circ}\text{C}$) est d'autant plus marquée que l'échauffement à l'amont ($+1,40^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$) est fort.

En revanche, tous les affluents n'apportent pas des eaux plus fraîches que l'Allondon en été. C'est notamment le cas des affluents en rive gauche (Nant de la Chaumaz, ruisseau des Eaux Chaudes) à l'exception du Lion tout à l'amont, ainsi que du ruisseau des Eaux Froides en rive droite. Celui-ci prend sa source non loin du secteur de résurgence de la nappe (au niveau des Feuilletières), mais il s'écoule sur plusieurs kilomètres avant de rejoindre la rivière sur un secteur où la température est moyennement élevée (autour de 19°C).

Enfin, la combinaison d'images thermiques et de l'orthophoto à haute résolution a permis d'évaluer finement le positionnement des refuges et leur classification. L'orthophoto a également servi à quantifier les structures alluviales du lit de la rivière (chenal en eau, bancs de galets nus, bancs végétalisés, etc.) et d'identifier que certains bancs se sont végétalisés sur le secteur des îles entre 2020 et 2022 (en comparaison avec les images de SwissTopo©). Si la rivière garde des propriétés plutôt dynamiques sur ce secteur, une végétalisation pérenne de bancs anciennement mobiles pourrait modifier la façon dont ils structurent la diversité et la répartition des habitats thermiques.

6.2 INTERPRÉTATION BIOLOGIQUE DES RÉSULTATS

La population d'ombres communs de l'Allondon est sur le déclin depuis le début des relevés réalisés en plongée. Cette observation, forte pour les adultes, est renforcée par la chute significative du nombre de juvéniles recensés depuis 2020, et les données de pêche électrique montrent les mêmes motifs que les résultats issus des plongées. L'avenir de la population d'ombres communs sur la rivière semble fragile.

La comparaison du profil longitudinal de température estivale et des modèles d'abondance des ombres communs montre une forte corrélation spatiale, puisque cette distribution bimodale, observée pour toutes les classes de taille, indique que les secteurs les plus chauds en été sont délaissés par les ombres. La distribution des juvéniles semble en partie liée à la distribution des frayères, notamment si l'on se réfère aux relevés de 2021, sauf en 2022 où les quelques juvéniles observés l'ont été en amont du pont de Russin, sur le secteur le plus frais de la rivière, mais loin des zones de frai privilégiées.

Enfin, dans le secteur où la température atteint son maximum (jusqu'à 26°C), les valeurs dépassent le seuil maximal tolérable pour l'ombre commun. De nombreuses espèces de cyprinidés d'eau vive, susceptibles de vivre également dans ces milieux, ont un seuil optimal proche de ces températures entre 24 et 25°C (ex. barbeau fluviatile [24°C], chevesne [24°C], hotu [24°C], gardon [25°C], Tissot and Souchon, 2010). De plus, les quelques poches froides présentes sur le secteur échauffé ont montré des températures situées entre 23 et 24°C lors de la campagne de 2022. Si elles peuvent servir de refuge thermique pour certaines espèces de cyprinidés, il est peu probable qu'elles soient suffisantes pour des espèces plus sensibles à la température. En conséquence, ce secteur ne présente pas de refuge thermique pour les salmonidés lors des périodes très chaudes.

6.3 LE SECTEUR DES FEUILLETIÈRES : UN POINT STRATÉGIQUE SOUS-ÉVALUÉ ?

La fosse en rive gauche sur le secteur de Feuilletières a été équipée en 2021 et en 2022 pour le suivi estival des refuges thermiques potentiels (Figure 33). Il est ressorti de ces deux années de suivi que cette fosse, bien que de taille (largeur et profondeur) susceptible d'être favorable à de nombreuses espèces, ne jouait pas un rôle de refuge thermique (delta de température avec la rivière très faible). En revanche, à la lecture du profil longitudinal de température établi à l'été 2022, la localisation de cette fosse revêt un intérêt particulier pour des espèces thermosensibles. Tout d'abord, cet habitat semble être relativement stable depuis les premiers suivis en plongée (GREN, 2021). Par exemple, il n'a pas évolué entre 2020 et 2022 (Figure 33). Ensuite, cet habitat se trouve à l'interface entre le secteur très échauffé à l'amont, susceptible de former une barrière thermique en période estivale, et le secteur plus frais à l'aval, où de nombreux ombres adultes et sub-adultes ont été recensés jusqu'en 2019. Cette fosse, ainsi que le chenal phréatique en rive droite à l'amont immédiat, représentent donc des refuges physiquement intéressants et thermiquement viables (en été) pour les salmonidés en aval direct du secteur fortement échauffé. De nombreux poissons y ont d'ailleurs été observés en 2020, 2021 et quelques-uns en 2022 (Tableau 5).



Figure 33. Orthophotos de 2020 (à gauche) et 2022 (à droite) sur secteur des Feuilletières. Le point rouge montre l'emplacement de la sonde lors des suivis de 2021 et 2022.

6.4 PERSPECTIVES DE GESTION ET DE RESTAURATION

L'analyse des résultats IRT-a et l'interprétation biologique des données piscicoles ouvrent quelques pistes de réflexion sur des perspectives de gestion sur l'Allondon, notamment à des fins de protection des populations d'ombres communs.

La première piste de réflexion intervient à la lecture croisée du profil longitudinal de température estivale et des modèles d'abondance des ombres communs. Deux secteurs apparaissent comme clés pour tenter de maintenir ces populations ; (1) le secteur entre l'Allemogne et le pont des Baillets, puis le secteur entre les Feuilletières et le pont de Russin. L'Allondon fait l'objet d'une forte activité touristique de baignade et de loisir sur ses bancs de galets pendant l'été. Permettre à ces secteurs clés d'être protégés de trop fortes perturbations lors des phases d'étiage pourrait être bénéfique à la population restante. La mise à ban de certains secteurs a été activée cet été 2022 par les autorités ; une telle procédure paraît donc être une solution envisageable de manière plus systématique et plus ciblée sur les secteurs à fort enjeu en termes d'habitats thermiques et donc de refuge biologique. En contrepartie, le secteur entre le pont des Baillets et la confluence du Roulave, où l'échauffement est fort et les densités d'ombres communs sont faibles, pourrait être davantage dédié à la baignade et aux loisirs.

La seconde piste concerne la mise en exergue du rôle crucial de l'Allemogne, qui contribue au refroidissement du secteur amont et au maintien de la population d'ombres communs jusqu'au pont des Baillets. L'Allemogne fournit en période d'étiage sévère près de 2/3 du débit de l'Allondon, et représente un apport majeur d'eau froide (delta de plus de 4°C avec l'Allondon le jour de la campagne IRT-a). Une bonne gestion transfrontalière de cet affluent est indispensable pour garantir un apport d'eau significatif à l'étiage et limiter ainsi les risques de réchauffement de l'Allondon en période sèche.



Figure 34. La présence d'un bloc en amont de la confluence du chenal du Crettaz semble générer un élargissement du panache vers le milieu de la rivière.

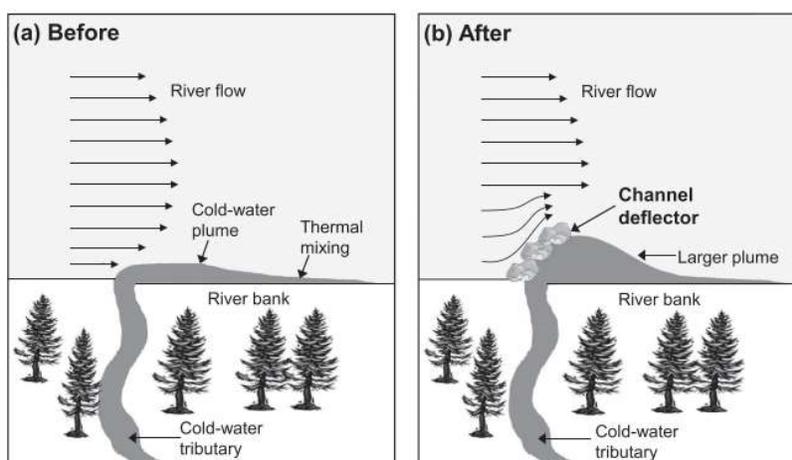


Figure 35. Proposition de « restauration » de refuge thermique par la pose de déflecteurs (blocs, troncs) à la confluence d'un affluent pour augmenter la taille de la poche froide (Source : Kurylyk et al., 2015).

La restauration des refuges thermiques est un sujet qui tend à se développer pour une meilleure gestion des cours d'eau, mais dont les développements restent pour le moment très théoriques. La plantation d'arbres en berge est une solution très largement répandue pour limiter l'échauffement estival des secteurs ouverts (Seavy et al., 2009; Withrow-Robinson et al., 2011). Cette solution apparaît difficilement applicable sur l'Allondon puisque (1) le secteur amont est déjà fortement boisé, et (2) le secteur ouvert où la bande active est plus large est globalement peu propice à la plantation d'arbres puisque les bancs sont actifs et facilement mobilisable (du moins en partie) lors des crues. Une étude plus précise de la ripisylve et de la structure des berges dans le secteur d'échauffement permettrait néanmoins de définir les zones les plus pertinentes à reboiser.

La restauration de refuges thermiques sur l'Allondon pourrait également prendre la forme d'une installation de déflecteurs dans le chenal, au droit de refuges thermiques identifiés, pour en étendre leur superficie et donc leur capacité d'accueil (ou du moins leur zone d'influence). Cette proposition, formulée théoriquement par Kurylyk et al. (2015) (Figure 35) a d'ores et déjà été observée sur le secteur de Crettaz (refuge n°57, Figure 34). La présence d'un bloc à l'amont immédiat de la confluence du chenal froid en rive droite a généré un panache qui semble élargi vers le centre du chenal de l'Allondon grâce à la protection apportée par ce déflecteur. Identifier certains panaches de ce type et y installer des déflecteurs, tout en assurant un suivi continu de la température et une évaluation de leur utilisation par des espèces piscicoles en été, permettrait d'évaluer la pertinence de telles actions

et de bénéficier de retours d'expérience solides. En revanche, la possibilité de mettre en place de telles mesures reste à mettre en perspective avec la dynamique des bancs sur le secteur alluvial qui pourrait périodiquement remodeler ces aménagements.

Enfin, la possibilité d'utiliser d'anciens puits dans le vallon de l'Allondon peut être une solution temporaire en période d'échauffement critique de la rivière (ex : puits des Feuilletières). Le pompage dans la nappe reste cependant une solution de derniers recours, dont l'incidence devrait être davantage évaluée, tant sur les communautés piscicoles (qualité de l'eau de pompage : température, polluants, etc.) que sur le fonctionnement de la nappe alluviale.

7. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Dugdale SJ, Bergeron NE, 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. DOI: 10.1016/j.rse.2013.05.018
- Dugdale SJ, Bergeron NE, St-Hilaire A. 2015. Spatial distribution of thermal refuges analysed in relation to riverscape hydromorphology using airborne thermal infrared imagery. *Remote Sensing of Environment* 160 : 43–55. DOI: 10.1016/j.rse.2014.12.021
- Dumoutier Q, Vigier L, Caudron A. 2010. MACMA Salmo : Macro Excel d'Aide au Calcul de variables thermiques appliquées aux Milieux Aquatiques Salmonicoles - Manuel d'utilisation : 28p.
- GREN. 2020. Suivi de la population des ombres de l'Allondon en 2020. Rapport de suivi. Services Industriels de Genève : 30p.
- GREN. 2021. Opérations de gestion sédimentaire APAVER 2021. Suivi de la population d'ombres de l'Allondon. Rapport de suivi. Services Industriels de Genève : 50p.
- GREN. 2022. Opérations de gestion sédimentaire APAVER 2022. Suivi de la population d'ombres de l'Allondon. Rapport de suivi. Services Industriels de Genève : 40p.
- Hottinger M. 1998. Etude hydrogéologique de la nappe alluviale de l'Allondon genevoise. : 184.
- 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
- Küttel S, Peter A, Wüest A. 2002. Temperaturpräferenzen und -limiten von Fischarten Schweizerischer Fließgewässer. *Rhône Revitalisierung* : 1–34.
- 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
- Paquet G. 2002. Biologie et écologie de l'ombre commun (*Thymallus thymallus* L.) dans l'Orbe à la Vallée de Joux, canton de Vaud, Suisse. Thèse de doctorat, Université de Lausanne : 160p.
- SCIMABIO. 2019. Diagnose écologique de l'Allondon et étude des populations de truite : études 2017-2019. Rapports I et II. Rapport de synthèse, Office Cantonal de l'Eau de Genève : 101p.
- SCIMABIO. 2021. Suivi thermique de l'Allondon : rapport d'état 2021. Projet : Cartographie et caractérisation des habitats thermiques de l'Allondon, Rapport de synthèse, Office Cantonal de l'Eau de Genève: 28p.
- Seavy NE, Gardali T, Golet GH, Griggs FT, Howell CA, Kelsey R, Small SL, Viers JH, Weigand JF. 2009. Why climate change makes riparian restoration more important than ever: Recommendations for practice and research. *Ecological Restoration* 27 : 330–338. DOI: 10.3368/er.27.3.330
- 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
- Tissot L, Souchon Y. 2010. Synthèse des tolérances thermiques des principales espèces de poissons des rivières et fleuves de plaine de l'ouest européen. *Hydroécologie Appliquée* 17 : 17–76. DOI: 10.1051/hydro/2010004
- Torgersen CE, Ebersole JL, Keenan DM. 2012. Primer for identifying cold-water refuges to protect and restore thermal diversity in riverine landscapes. *EPA scientific guidance handbook* : 91p. DOI: EPA 910-c-12-001
- Vollmer M, Möllmann K-P. 2018. *Infrared Thermal Imaging - Fundamentals, Research and Applications* . 2nd Edition. Vollmer M and Möllmann K-P (eds). Wiley-VCH, Weinheim, Germany : 769p.
- Withrow-Robinson B, Bennett M, Ahrens G. 2011. *A Guide to Riparian Tree and Shrub Planting in the Willamette Valley: Steps to Success*. Oregon State University, Corvallis, USA : 28p.

Annexe 1. Illustration sur des images thermiques des différents types de taches froides répertoriées dans la nomenclature proposée en Figure 18 et utilisée dans cette étude. A noter que tous les types n'ont pas été observés sur l'Allondon (source : Marteau et al. (2022)).

