

Evolutions technologiques et méthodologiques dans la caractérisation de la température par infrarouge thermique aéroporté

Technological and methodological developments in the airborne thermal infrared characterisation of river temperature

Baptiste Marteau¹, Steve J. Dugdale², Arnaud Caudron³, Hervé Piégay⁴.

¹UMR6554 LETG, Université Rennes 2, baptiste.marteau@univ-rennes2.fr

²University of Nottingham, stephen.dugdale@nottingham.co.uk

³SCIMABIO Interface, arnaud.caudron@scimabio-interface.fr

⁴UMR5600 EVS, CNRS, herve.piegay@ens-lyon.fr

RÉSUMÉ

L'utilisation de l'IRT-a comme outil de diagnostic thermique des rivières fait l'objet d'un intérêt croissant, notamment pour évaluer la présence de refuges thermiques potentiels. Si certains aspects de la technologie évoluent et permettent un accès facilité à du matériel à bas coût, des limites subsistent sur l'utilisation des résultats pour répondre à certaines problématiques (ex. températures absolues). Après une description des dernières avancées, l'article présente les résultats issus de comparatifs à la fois technologiques (test d'un capteur drone) et méthodologiques (détection semi-automatique des taches froides). L'objectif principal de ce travail est de s'éloigner des méthodes jugées subjectives utilisées jusqu'ici, notamment la détection visuelle des refuges thermiques, puis leur classification suivant des typologies existantes. L'article se termine par une proposition de classification des taches d'eau froide plus simple et davantage basée sur leurs paramètres, qui reste comparable à la méthode visuelle utilisée jusqu'à présent, ouvrant alors la porte à des analyses à grande échelle de données provenant de périodes différentes, de rivières différentes voire même de pays différents.

ABSTRACT

There is growing interest in using airborne TIR as a thermal diagnostic tool for rivers, in particular to assess the presence of potential thermal refuges. While some aspects of the technology are evolving and providing easier access to low-cost equipment, there are still limits as to how results can be used to address some of the issues (e.g. absolute temperatures). After a short description of the latest advances, the article presents the results of both technological (testing of a drone sensor) and methodological comparisons (semi-automated detection of cool-water patches). The main aim of this work is to move away from the more subjective methods used to date, especially the visual detection of thermal refuges, and their classification according to existing typologies. The paper ends with a proposal for a simpler and more parameter-based classification of cool-water patches, which remains comparable to the visual method used so far and so will open the door to large-scale analyses of data from different period, different rivers and even different countries.

MOTS CLÉS

Cartographie IRT-a, refuges thermiques, télédétection, traitement semi-automatique

Airborne TIR mapping, remote sensing, semi-automated processing, thermal refuges

INTRODUCTION

La cartographie des rivières par infrarouge thermique aéroporté (IRT-a) connaît actuellement un engouement particulier, du fait (1) de récentes avancées technologiques (réduction des coûts, miniaturisation des capteurs) et (2) des questions d'actualité auxquelles elle permet d'apporter des réponses. Elle permet d'adresser de nombreux enjeux liés à la dimension spatiale de la température des rivières, paramètre qui revêt d'un intérêt grandissant du fait des changements globaux. En parallèle de ces développements technologiques, les usages et applications de l'outil deviennent plus diversifiés, et les méthodes de traitement évoluent. Dans un souci d'ouverture à l'utilisation d'un plus grand nombre d'utilisateurs, une série de tests ont été réalisés afin de comparer différents capteurs (notamment ceux fréquemment utilisés dans la littérature) avec d'autres dont la fiabilité a été reconnue. De la même manière, les résultats obtenus suivant l'approche et les outils de traitement utilisés ont été comparés afin d'alimenter la discussion sur les avantages et les limites de chaque type de traitement.

1 EVOLUTION TECHNOLOGIQUE DES VECTEURS, CAPTEURS ET OUTILS DE TRAITEMENT D'IMAGE

1.1 La miniaturisation des capteurs

Les technologies permettant le refroidissement des caméras thermiques, l'autocalibration des caméras non-refroidies, ou définissant la résolution spatiale des capteurs, ont peu évolué au cours de la dernière décennie. Pour preuve, le prix à l'achat des caméras dites « industrielles » est resté relativement stable. L'évolution technologique autour des capteurs de température s'est essentiellement faite en parallèle du développement des drones, à l'instar de nombreux capteurs embarqués pour la télédétection. Elle a permis une miniaturisation et un allègement des équipements, les rendant compatibles avec la charge utile des drones (< 200g). Avec des prix pour certains inférieurs à 2000€, l'accès à ces outils est rendu facile et accessible au plus grand nombre. En revanche, bon nombre de ces caméras présentent des problèmes (ex. dérive, format propriétaire) qui rendent les résultats parfois difficile à exploiter (ex. Olbrycht *et al.*, 2012; Dugdale *et al.*, 2019; Redana *et al.*, 2024). Récemment est apparue la caméra H20T (DJI©), conçue pour être un modèle moyenne gamme adaptée au drone, et qui semble être moins affectée par les problèmes classiques de dérive observés précédemment. C'est ce capteur qui a fait l'objet d'une comparaison, d'abord en laboratoire, puis en situation réelle, sur la rivière Drôme, en 2023.

1.2 Les apports de la photogrammétrie SfM

Une deuxième avancée majeure dans le développement de la cartographie IRT-a est l'utilisation possible d'outils de photogrammétrie SfM pour aligner les images et créer les cartes de température. Initialement destinés à la reconstruction 3D à partir de photographies superposées, la photogrammétrie est désormais compatible avec plusieurs types d'images, dont les images IRT. Il devient alors plus facile et plus rapide d'aligner un grand nombre d'images de manière semi-automatique, et d'assurer la production de cartes qui soient orthogonales aux orthophotos utilisées comme référence. L'utilisation de la photogrammétrie SfM a ainsi permis le passage d'étude sur quelques centaines de mètres (ex. Wawrzyniak *et al.*, 2013) à plus d'une centaine de km (ex. (ex. Marteau *et al.*, 2022b) pour un temps de traitement similaire. Enfin, elle facilite le développement de méthode d'analyse basées sur des orthomosaïques complètes, ouvrant des possibilités supplémentaires par rapport aux traitements image par image tels que pratiqué pour certaines applications.

2 VERS UNE DIVERSIFICATION DES USAGES ET DES METHODES

2.1 D'un usage orienté « poisson »...

Après des premiers usages exploratoires (Atwell *et al.*, 1971), l'utilisation de l'imagerie thermique aéroportée pour caractériser la température des rivières a plutôt été développée pour des usages en écologie, notamment pour la conservation des habitats et la gestion des ressources (Faux *et al.*, 2001; Torgersen *et al.*, 2001). Ainsi, la distribution des habitats thermiques a été testée en lien avec la distribution de salmonidés adultes (Torgersen *et al.*, 1999), de juvéniles (Madej *et al.*, 2006), ou encore en lien avec un comportement de thermorégulation lors d'épisode caniculaires (Dugdale *et al.*, 2016). L'utilisation de l'IRT-a a également participé à l'étude et la définition des « refuges thermiques » (Torgersen *et al.*, 2012) pour lesquels les paramètres de répartition à l'échelle du paysage ont pu être étudiés (Dugdale *et al.*, 2013; Monk *et al.*, 2013). Cet usage orienté « poisson », pour lequel l'identification des « poches froides » correspond à une définition spécifique de « refuge thermique » (voir

Sullivan *et al.*, 2021), a donc amené les utilisateurs à identifier visuellement, image par image, les taches froides à même de jouer un rôle de refuge thermique. Cette méthode, bien qu'elle ait été appliquée à large échelle (Dugdale *et al.*, 2013), présente deux inconvénients principaux : (1) le temps nécessaire à l'analyse sur de longs linéaires, et (2) la subjectivité du résultat qui dépend notamment de l'expérience de l'opérateur. Les avancées technologiques, et notamment logicielles, offrent désormais des alternatives intéressantes, qui permettent également d'ouvrir le champ des applications possibles.

2.2 ... vers des applications plus diversifiées

Des exemples de l'utilisation de l'outil pour des études ayant attiré à l'hydromorphologie existent dans la littérature, par exemple pour quantifier les échanges nappe-rivière (Wawrzyniak *et al.*, 2016), caractériser les échanges hyporhéiques (Loheide and Gorelick, 2006), ou encore évaluer les effets de la restauration écologique (Cristea and Burges, 2009). Des développements récents pour la détection semi-automatique des « anomalies » à partir d'images thermiques géoréférencées ont permis d'affiner la caractérisation des taches froides, en tirant partie de la haute résolution et de la haute précision des mesures (ex. Marteau *et al.*, 2022a, 2023). Cette approche, qui permet de déceler des différences de température relativement faibles sur la base de seuils de détection statistiques, fait ressortir un nombre important de petits poches froides pouvant s'apparenter à des échanges hyporhéiques fins, tout en facilitant la caractérisation de ces zones (taille, différentiel thermique, forme, etc.). Afin de tester la validité de cette approche semi-automatique pour des applications orientée écologie, un travail de comparaison des résultats obtenus avec l'une et l'autre des méthodes a été mené sur quelques rivières du bassin du Rhône.

2.3 Comparaison des méthodes et proposition de nomenclature

Le premier objet de comparaison concernait l'évaluation des performances de la caméra drone H20T par rapport à des modèles déjà établis, utilisés en ULM ou en hélicoptère (ex. VarioCam Head 960). L'expérience en laboratoire montre une légère dérive de la mesure au cours du temps qui s'accroît lorsque l'appareil et le corps noir sont exposés aux rayons du soleil. En revanche, contrairement aux modèles testés précédemment (Dugdale *et al.*, 2019 ; Marteau 2023, matériel non publié), cette dérive pourrait être plus linéaire et constante et donc potentiellement corrigible *a posteriori*. Les tests grandeur nature ont montré une différence moyenne de température entre les deux caméras d'environ 2°C, et ont permis de démontrer quelques bonnes pratiques pour améliorer les résultats et optimiser l'utilisation du capteur (ex. temps de préchauffage, conditions d'acquisition, etc.). Enfin, les résultats renforcent le constat qu'une exploitation des images pour une étude des températures relatives reste valide même avec des images non-corrigées. En effet, le différentiel de température au sein d'une seule et même image semble peu affecté par le problème de dérive, puisque celui-ci affecte de manière relativement uniforme l'entièreté de l'image concernée. Ces résultats sont encourageants pour le développement de solutions drones capables de cartographier les températures absolues des rivières.

Le deuxième objet de comparaison était méthodologique puisqu'il cherchait à évaluer les performances relatives des méthodes de détection des taches froides, manuelle (méthode 1) et semi-automatique (méthode 2), dans la perspective d'une étude comparative à grande échelle des différents jeux de données existants (passés et actuels). Du point de vue des performances, le temps gagné par la méthode semi-automatique est particulièrement évident lorsque différents seuils ou algorithmes de reconstruction des températures médianes théoriques sont testés. Cette méthode permet le test et l'ajustement de différents paramètres qui peuvent aider l'utilisateur à améliorer ou orienter les résultats vers les besoins d'une analyse (ex. anomalies chaudes plutôt que froides). De plus, elle fait ressortir un plus grand nombre de structures, que l'analyse visuelle ne permet pas de voir. En revanche, des artefacts peuvent apparaître en fonction de la qualité de la reconstruction des images, générant de faux positifs. De plus, le nombre plus important de taches et l'inclusion de structures thermiques avec des caractéristiques qui s'éloignent de la définition des refuges thermiques (c-à-d un différentiel de température plus faible, une taille/forme peu propice à l'accueil d'organismes thermorégulateurs) peut rendre l'étape de classification plus difficile.

Cette approche a également mis en avant le biais de subjectivité qui conditionne à la fois la détection des refuges thermiques (méthode 1) et la classification de ces refuges suivant des typologies existantes (méthodes 1 & 2). Le niveau d'expérience, la formation d'origine (ex. écologue, géomorphologie, géomaticien) et le degré d'implication dans l'acquisition de la donnée (terrain, post-traitement, interprétation) ont des effets sur la manière dont les refuges thermiques sont décelés, caractérisés et classifiés. Ces observations renforcent le constat d'une nécessaire (in)formation préalable pour l'analyse et l'interprétation de cartographies thermiques des rivières à des fins opérationnelles. Elles ont également abouti à une proposition de nomenclature simplifiée, construite en partie sur des paramètres objectifs et des méthodes statistiques, qui différencie les taches froides

et/ou refuges thermiques en fonction de l'origine potentielle de l'eau (ex. karst, nappe alluviale, zone hyporhéique) et de la taille/forme observée à la surface. De fait, cette classification permet un rapprochement simple et adaptatif des deux méthodes et ouvre des perspectives de comparaison applicables à large échelle de données issues de campagnes (et de méthode d'analyse) différentes.

CONCLUSION

L'utilisation de l'IRT-a comme outil de diagnostic thermique des rivières fait l'objet d'un intérêt croissant, notamment pour évaluer le potentiel de refuges thermiques en lien avec des espèces sensibles aux températures estivales élevées (Caudron and Marteau, 2024). L'accessibilité facilitée à des capteurs drones à bas coût ne doit pas faire oublier les nécessaires précautions pour un bon usage de l'outil, afin d'assurer des résultats pertinents, cohérents et reproductibles. L'utilisation de méthodes de post-traitement, d'analyse et d'interprétation qui s'éloignent des approches uniquement subjectives, telles que proposées et testées dans cet article, est une voie vers l'atteinte de ces objectifs qui, si elle n'est pas suffisante, semble plus que jamais nécessaire.

BIBLIOGRAPHIE (*obligatoire uniquement pour les communications à caractère scientifique*)

- Atwell BH, MacDonald RB, Bartolucci LA. 1971. Thermal Mapping of Streams From Airborne Radiometric Scanning. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 7 (2): 228–243.
- Caudron A, Marteau B. 2024. Utilisation de l'infra-rouge thermique aéroporté (IRTa) pour identifier les habitats thermiques et les refuges thermiques pour les salmonidés Guide synthétique et exemples d'application. Rapport final AAP Eau & Biodiversité AERMC 2020, 34p.
- Cristea NC, Burges SJ. 2009. Use of Thermal Infrared Imagery to Complement Monitoring and Modeling of Spatial Stream Temperatures. *Journal of Hydrologic Engineering* 14 (10): 1080–1090.
- 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.
- Dugdale SJ, Franssen J, Corey E, Bergeron NE, Lapointe M, Cunjak RA. 2016. Main stem movement of Atlantic salmon parr in response to high river temperature. *Ecology of Freshwater Fish* 25 (3): 429–445.
- Dugdale SJ, Kelleher CA, Malcolm IA, Caldwell S, Hannah DM. 2019. Assessing the potential of drone-based thermal infrared imagery for quantifying river temperature heterogeneity. *Hydrological Processes* 33 (7): 1152–1163.
- Faux RN, Lachowski H, Maus P, Torgersen CE, Boyd MS. 2001. New approaches for monitoring stream temperature: Airborne thermal infrared remote sensing. Project Report: Integration of Remote Sensing (September): 29p.
- Loheide SP, Gorelick SM. 2006. Quantifying stream-aquifer interactions through the analysis of remotely sensed thermographic profiles and in situ temperature histories. *Environmental Science and Technology* 40 (10): 3336–3341.
- Madej MA, Currens C, Ozaki V, Yee J, Anderson DG. 2006. Assessing possible thermal rearing restrictions for juvenile coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*) through thermal infrared imaging and in-stream monitoring, Redwood Creek, California. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 63 (6): 1384–1396.
- Marteau B, Michel K, Piégay H. 2022a. Can gravel augmentation restore thermal functions in gravel-bed rivers? A need to assess success within a trajectory-based before–after control–impact framework. *Hydrological Processes* 36 (2): e14480
- Marteau B, Piégay H, Chandresis A, Michel K, Vaudor L. 2022b. Riparian shading mitigates warming but cannot revert thermal alteration caused by impoundments in lowland rivers. *Earth Surface Processes and Landforms* 47 (9): 2209–2229
- Marteau B, Piégay H, Moatar F. 2023. L'infrarouge thermique aéroporté, un outil de connaissance des rivières face au changement climatique : guide méthodologique et recommandations. Agence de l'eau RMC, ZABR, 97p.
- Monk WA, Wilbur NM, Allen Curry R, Gagnon R, Faux RN. 2013. Linking landscape variables to cold water refugia in rivers. *Journal of Environmental Management* 118: 170–176.
- Olbrycht R, Wiecek B, De Mey G. 2012. Thermal drift compensation method for microbolometer thermal cameras. *Applied Optics* 51 (11): 1788–1794.
- Redana M, Lancaster LT, Chong XY, Lip YY, Gibbins C. 2024. An open-source method for producing reliable water temperature maps for ecological applications using non-radiometric sensors. *Remote Sensing Applications: Society and Environment* 34: 101184.
- Sullivan CJ, Vokoun JC, Helton AM, Briggs MA, Kurylyk BL. 2021. An ecohydrological typology for thermal refuges in streams and rivers. *Ecohydrology* 14 (5): 1–15.
- 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* (February): 91.
- Torgersen CE, Faux RN, McIntosh BA, Poage NJ, Norton DJ. 2001. Airborne thermal remote sensing for water temperature assessment in rivers and streams. *Remote Sensing of Environment* 76 (3): 386–398.
- Torgersen CE, Price DM, Li HW, McIntosh BA. 1999. Multiscale thermal refugia and stream habitat associations of chinook salmon in northeastern Oregon. *Ecological Applications* 9 (1): 301–319.
- Wawrzyniak V, Piégay H, Allemand P, Vaudor L, Goma R, Grandjean P. 2016. Effects of geomorphology and groundwater level on the spatio-temporal variability of riverine cold water patches assessed using thermal infrared (TIR) remote sensing. *Remote Sensing of Environment* 175: 337–348.
- Wawrzyniak V, Piégay H, Allemand P, Vaudor L, Grandjean P. 2013. Prediction of water temperature heterogeneity of braided rivers using very high resolution thermal infrared (TIR) images. *International Journal of Remote Sensing* 34 (13): 4812–4831.