

L'infrarouge thermique aéroporté, un outil de connaissance des rivières face au changement climatique

AUTEURS

Baptiste Marteau
Hervé Piégay
Florentina Moatar

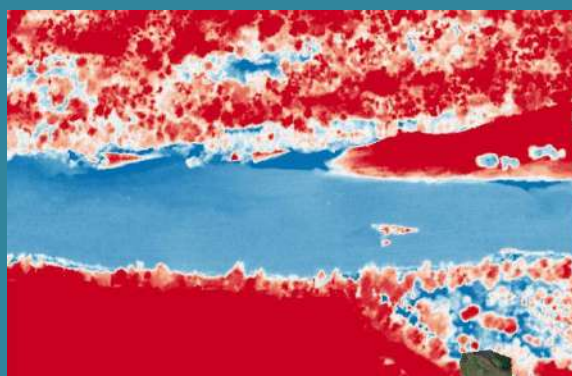
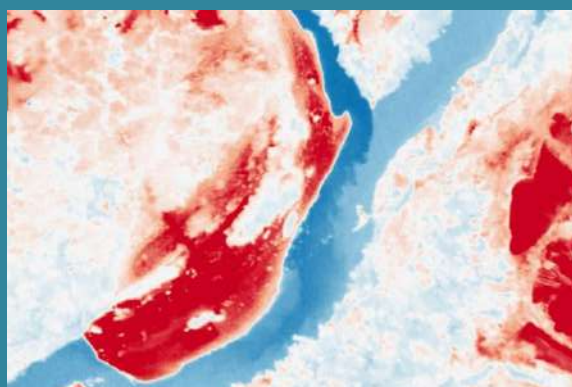
ÉQUIPES DE RECHERCHE



EVS
Environnement
Ville Société

INRAE

River
hydraulics



EN PARTENARIAT AVEC

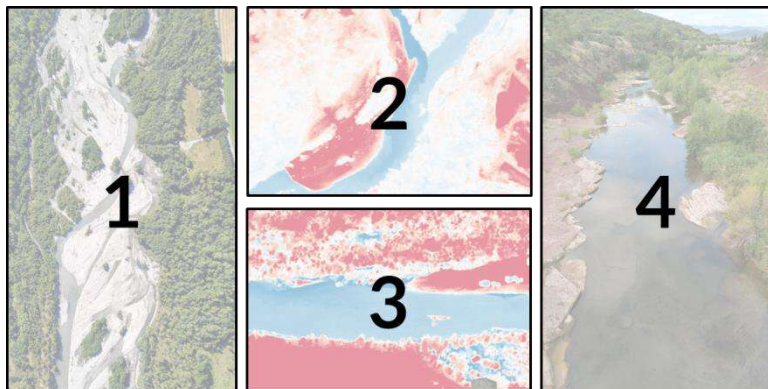


H₂O'Lyon
Université de Lyon

CONTEXTE

Ce guide a été rédigé dans le cadre de l'Action 72, portée par les 3 auteurs principaux dans le cadre de la convention de partenariat entre la Zone Atelier Bassin du Rhône (ZABR) et l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse. De nombreux contributeurs ont participé à la rédaction de la partie introductive et à sa relecture globale (par ordre alphabétique) : Arnaud Caudron (SCIMABIO Interface), Hervé Chapuis (RIEau), Jean-Pierre Faure (Fédération de Pêche du Rhône), Didier Graillot (EVS, Ecole des Mines de Saint-Etienne), Frédéric Laton (APPMA du Bas Verdon), Frédéric Paran (EVS, Ecole des Mines de Saint-Etienne), Stéphane Stroffek (Agence de l'Eau RMC), Benoît Terrier (Agence de l'Eau RMC) et Zahra Thomas (AgroCampus Ouest, Rennes).

Illustrations de la page de garde (Crédit : Baptiste Marteau) :



1 : Secteur en tresses du Drac amont.

2 : Confluence de la Lergue avec l'Hérault (image thermique).

3 : Taches d'eau froide décelées en rive droite du Doubs, le long et en aval d'un banc alluvial (image thermique).

4 : La Lergue s'écoule par endroit directement sur la roche mère affleurante.

CONTENU

Contexte	1
Contenu	3
1. Introduction	5
1.1. Contextualisation	5
1.2. La température des rivières : des facteurs de contrôle physiques aujourd'hui bien connus	6
1.3. La température comme intégrateur de processus hydromorphologiques	7
1.4. La température comme intégrateur des interactions eaux souterraines (<i>eso</i>)/eaux de surface (<i>esu</i>)	8
1.5. Mesurer la température des rivières : tentative de définition(s)	9
1.6. Vers une meilleure prise en compte des habitats thermiques pour des applications en écologie	11
1.7. La température comme intégrateur des enjeux de gestion à différentes échelles	14
1.8. Pourquoi ce guide ?	16
2. Mesurer la température en rivière par IRT-a	18
2.1. Principes de fonctionnement	18
2.2. Les données disponibles	20
2.2.1. Avantages et inconvénients	21
2.2.2. Les images satellites	22
2.2.3. Les images aéroportées	24
2.3. La validation	26
2.4. Mise en place d'une campagne de mesure IRT-a : considérations et éléments de planification	27
2.4.1. Ma rivière peut-elle être imagée par IRT-a ?	27
2.4.2. Choisir son vecteur	29
2.4.3. Choisir son capteur	32
Choisir la période et le moment de la mission	34
3. Comprendre et analyser des données de température IRT-a	38
3.1. Des données de température IRT-a : à quoi ça ressemble ?	38
3.1.1. Extraction du profil longitudinal de température	40
3.1.2. Extraction des « anomalies thermiques »	41
3.2. Approches géographiques	41
3.2.1. La cartographie 2D des habitats thermiques	41
3.2.2. Les profils longitudinaux de température	49
3.2.3. Approche spatio-temporelle des suivis	53
4. Passer de l'exploratoire au confirmatoire	58
4.1. Vérification du profil longitudinal de température	58
4.2. Détection et résilience des anomalies thermiques	60
5. Passer du diagnostic au pronostic, approches statistique et hybride	64
5.1. Modélisation prospective à l'échelle régionale	64
5.2. Approche physique fondée sur des données IRT-a	66
6. Ce que ne fait pas l'IRT-a mais font d'autres méthodes et outils	67
6.1. Les outils de base pour une acquisition locale	67
6.1.1. Les sondes thermométriques	67
6.1.2. Les cannes thermométriques	69

6.1.3.	La fibre optique	70
6.2.	Les réseaux de sonde à l'échelle des grands bassins	72
6.3.	Les données d'archives	74
6.3.1.	Exploitation de bases de données réglementaires	74
6.3.2.	Exploitation de bases de données auxiliaires	75
7.	Quel outil choisir pour quelle question ?	76
7.1.	Des outils et méthodes complémentaires	76
7.2.	Approche spatiale ou temporelle : faut-il choisir ? Définir des objectifs précis	77
7.2.1.	Les thermographes : éléments de base de la boîte à outils	77
7.2.2.	L'IRT-a pour un diagnostic exploratoire	79
7.2.3.	Les cannes thermométriques et la fibre optique pour l'étude de processus fins	79
7.2.4.	L'analyse statistique pour aller au-delà des observations	80
7.2.5.	La modélisation physique (ou mécanistique) pour découper les composantes thermiques	80
7.2.6.	La modélisation (géo)statistique pour analyser son cours d'eau au regard de grands ensembles	81
7.3.	Réaliser l'inventaire des données, du matériel et des ressources à disposition	81
8.	Remerciements	82
9.	Références bibliographiques	83
	Liste des figures	89
	Liste des tableaux	92
	Liste des encarts	93

1. INTRODUCTION

1.1. Contextualisation

La thématique de la température est un sujet de préoccupation majeur actuel et futur dans le contexte du réchauffement global de la planète ; la température des cours d'eau n'échappe pas à cette règle. Par exemple, sur les 60 dernières années, la température des cours d'eau du bassin de la Loire a augmenté en moyenne de $+0.4^{\circ}\text{C}$ /décennie au printemps et en été, pouvant atteindre $+1^{\circ}\text{C}$ /décennie pour certaines rivières du Massif Central et du plateau Limousin, du fait de la diminution des débits. Le réchauffement est du même ordre de grandeur pour les plus grands cours d'eau comme la Loire, où la ripisylve ne joue pas un rôle important dans l'atténuation des températures (Seyedhashemi et al., 2022) et où l'échauffement est visible depuis le début du XX^e siècle (Moatar & Gailhard, 2006). Dans d'autres cas, comme celui du Rhône fortement aménagé, l'influence du climat sur les évolutions thermiques est plus difficile à estimer compte tenu des conditions particulières (influence du lac Léman, apports froids et chauds des affluents, rejets d'eau échauffées des centrales nucléaires, mélanges sur plusieurs kilomètres). Les projections à l'échelle globale pour les décennies à venir font aussi état d'une augmentation qui pourrait se situer entre $+1,5$ et $+5^{\circ}\text{C}$ selon les modèles (e.g. Seyedhashemi et al., 2023). Une telle augmentation aurait des conséquences importantes, non seulement pour les communautés aquatiques et le fonctionnement des hydrosystèmes, mais également pour les activités humaines et économiques qui y sont liées. L'arrêt forcé du 2^{ème} réacteur de la centrale nucléaire de Golfech durant l'été 2020 à cause d'une température de la Garonne trop élevée ($> 28^{\circ}\text{C}$), en est une illustration¹. Les blooms algaux observés sur certains cours d'eau en période estivale, avec des effets potentiels sur la santé et les activités récréatives, en sont une autre². S'intéresser à la température des cours d'eau, c'est donc réfléchir à la fois aux différents facteurs de contrôle, aux conséquences multiples que des modifications des régimes thermiques peuvent avoir et aux enjeux qui sont directement liés.

Les cours d'eau, et plus généralement l'ensemble des masses d'eau de surface, sont des milieux dynamiques et non-uniformes. Leur température varie dans le temps, à l'échelle de la journée (température plus faible la nuit, plus élevée la journée), à l'échelle des événements hydrologiques (crues et pluies), à l'échelle des cycles saisonniers, voire à l'échelle interannuelle avec des années plus ou moins chaudes. De plus, leur température varie également dans l'espace, en suivant notamment les gradients latitudinaux (de l'équateur vers les pôles), les gradients altitudinaux (moins élevée en altitude qu'en plaine) ainsi que des forçages régionaux (par exemple les régimes climatiques continentaux, océaniques, etc.). Enfin, la dynamique de température est également très sensible aux conditions locales, qu'elles soient naturelles (forme du lit, connexion avec la nappe alluviale, présence/absence d'ombrage végétal ou orographique, etc.) ou anthropiques (barrages et seuils, pompages, rejets, extraction de granulats, etc.).

La température des eaux souterraines, qui est relativement stable au cours de l'année, est moins sensible à ces différents forçages. Les apports d'eau souterraine vers les masses d'eau de surface

¹ <https://www.ouest-france.fr/environnement/nucleaire/la-centrale-nucleaire-de-golfech-a-l-arret-a-cause-de-la-canicule-6935510>

² <https://reporterre.net/Les-cyanobacteries-toxiques-prolifèrent-dans-les-etendues-d'eau>

peuvent ainsi profondément influencer les dynamiques de température de la rivière, fournissant généralement des eaux plus froides en été, plus chaudes en hiver. Puisque la température de l'eau peut influencer de nombreux paramètres biochimiques, biologiques et écologiques, elle intègre de nombreux aspects du (dys)fonctionnement des hydrosystèmes, et son suivi est utile pour l'évaluation de l'état des masses d'eau.

Ce premier chapitre permet ainsi d'introduire ce paramètre clé du fonctionnement des cours d'eau qu'est la température, les facteurs qui la contrôlent ou encore ses implications biologiques et écologiques. La dimension spatiale de la répartition de la température dans le cours d'eau fera l'objet d'une attention particulière puisque c'est le principal atout de l'outil IRT-a, présenté dans ce guide, à l'analyse et la compréhension de nos hydrosystèmes.

1.2. La température des rivières : des facteurs de contrôle physiques aujourd'hui bien connus

Les paramètres qui contrôlent la température des cours d'eau sont aujourd'hui bien connus dans la littérature (Caissie, 2006 pour une synthèse plus détaillée; Poole & Berman, 2001; voir par exemple Ward, 1985). Parmi ces contrôles, les conditions atmosphériques sont prépondérantes (radiations solaires, température de l'air, vent, taux d'humidité, précipitations, etc.). C'est ce qui explique notamment les gradients latitudinaux ainsi que les variations journalières et saisonnières. D'ailleurs, il existe un lien direct bien établi entre la température de l'eau et la température de l'air (notamment à l'échelle hebdomadaire). Des variations observées dans la qualité de cette relation permettent entre autres de déterminer la sensibilité d'une rivière aux conditions climatiques ; certaines sont régulées par des apports en eaux souterraines et donc moins influencées par l'atmosphère, tandis que d'autres sont plus sensibles aux conditions atmosphériques elles-mêmes (Figure 1). Cette sensibilité peut être considérée comme une vulnérabilité au regard des changements climatiques actuels ; les rivières les plus sensibles aux forçages atmosphériques seront probablement les premières affectées par le réchauffement global (Beaufort, Moatar, Sauquet, et al., 2020).

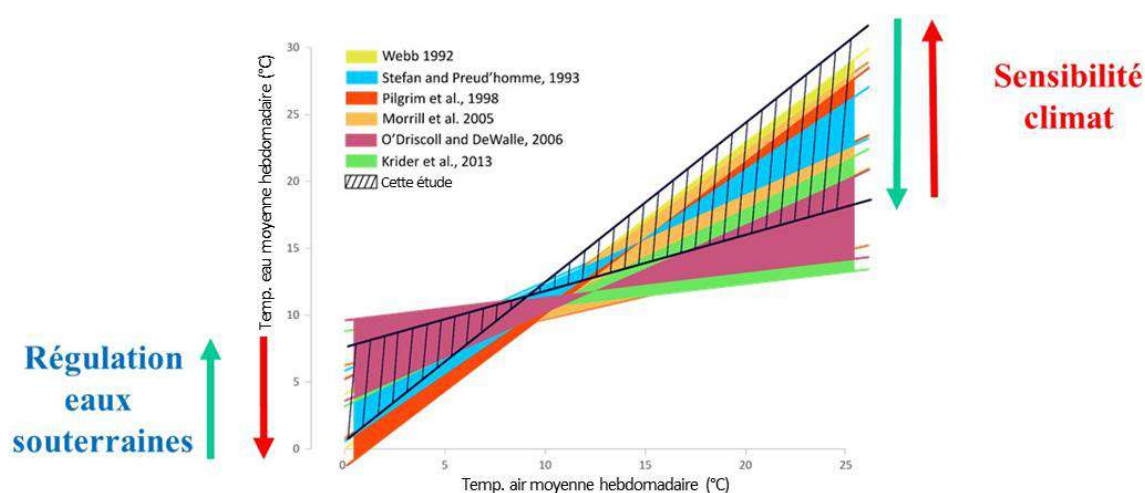


Figure 1. La relation entre la température de l'eau et la température de l'air (moyennes hebdomadaires) informe sur la sensibilité d'un cours d'eau aux forçages atmosphériques, et donc indirectement sur sa vulnérabilité potentielle au réchauffement climatique (Source : Beaufort et al. 2020).

La température des cours d'eau répond également à de nombreux autres facteurs physiques, notamment topographiques et hydrologiques. Ainsi, l'ombrage exercé par la végétation ou par le

relief pourra atténuer les rayonnements solaires et la vitesse du vent, eux-mêmes modulés par l'orientation (N-S vs. E-O), l'altitude, l'occupation du sol, le substrat géologique, etc. Enfin, les conditions dans lesquelles les échanges aux interfaces eau-air et eau-substrat auront lieu seront modifiées par le débit, l'origine des apports en eau, la turbulence des écoulements, etc. Tous ces paramètres sont relativement bien décrits et expliqués, par Caissie (2006) notamment.

C'est donc l'effet combiné de tous ces facteurs décrits ci-dessus qui va définir le régime thermique d'un cours d'eau. L'étude du régime thermique est généralement le reflet d'une diversité des cours d'eau et des styles fluviaux à l'échelle régionale. En revanche, elle s'appuie principalement sur des indicateurs temporels, tels que la température moyenne annuelle, certaines variables de température minimale et maximale, l'amplitude annuelle, etc. (voir §1.5). Dans les faits, la répartition des températures à une échelle plus fine (du paysage fluvial à la macro-forme) s'intègre au sein d'un régime thermique régional défini, mais répond également à des paramètres hydromorphologiques et hydrogéologiques qu'il est crucial de prendre en compte lorsque l'on s'intéresse aux habitats et à la biodiversité en rivière.

1.3. La température comme intégrateur de processus hydromorphologiques

A la différence des eaux de surface (*esu*) telles que présentées ci-dessus, les caractéristiques des eaux souterraines (*eso*) dépendent majoritairement de facteurs hydrogéologiques, topographiques et climatiques. Ainsi, elles restent relativement stables dans le temps (notamment en termes de température) car elles sont en quelque sorte le « reflet » des réservoirs géologiques qu'elles traversent. Toutefois, les *eso* interagissent avec les *esu* de façon plus ou moins directe et continue suivant les systèmes et les saisons. Cette façon dont les *eso* participent à l'effet de tamponnage thermique des cours d'eau présente une certaine variabilité, à la fois temporelle et spatiale.

Du point de vue temporel, le tamponnage thermique est par exemple plus marqué en période de basses eaux des cours d'eau, lorsqu'ils drainent les *eso* dont la température est relativement plus faible en été, ou plus chaude en hiver. À court terme, les variations sont de l'ordre des saisons ; à plus long terme elles peuvent être induites par des changements climatiques.

La variabilité peut également être spatiale. L'hétérogénéité thermique spatiale des cours d'eau reflète les échanges d'eau entre la rivière, les écoulements de surface (versants, affluents), la zone hyporhéique et la nappe alluviale (Figure 2). Elle dépend de la localisation du tronçon d'intérêt sur le continuum fluvial : en tête de bassin versant les interactions *eso/esu* seront plus fortement influencées par les pluies ce qui implique des variations locales et rapides ; inversement, à l'aval les interactions seront plus stables car principalement contraintes par des écoulements régionaux. Elle peut aussi être liée à l'échelle de l'interaction : 1) échelle locale (zone hyporhéique) où le niveau de la rivière, l'alternance radier/mouille, la présence de dépôts colmatants ou la microtopographie peuvent influencer les échanges ; 2) tronçons de rivière dont la forme (tresse, anastomose, méandre...) peut orienter les interactions ; 3) régionale (bassin versant) en lien avec l'influence de grandes masses d'eau souterraine. Enfin, le contexte géologique peut influencer les interactions. En contexte de socle, relativement imperméable, les interactions vont être conditionnées par la présence de grandes fractures et la présence de rares sources. En contextes sédimentaire et alluvionnaire, les apports diffus vont permettre un fort effet tampon. Dans les zones karstiques, les

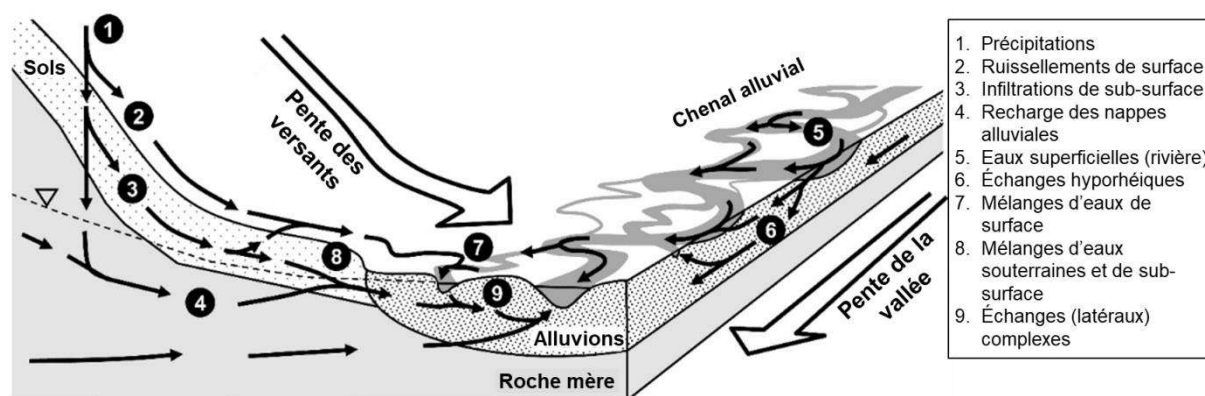


Figure 2. Illustration de l'hétérogénéité thermique spatiale des cours d'eau à l'échelle du corridor fluvial, issue des interactions entre eaux de surface, eaux de sub-surface et eaux souterraines (Traduite et modifiée de Poole, 2010).

émergences ou résurgences vont être plus sensibles aux variations saisonnières sauf dans le cas d'apports profonds et pérennes. Ils peuvent ainsi être générés par des verrous géologiques au sein de vallées, ou via des échanges latéraux avec la plaine alluviale et les versants. De plus, plus le chemin parcouru par l'eau est long (échelle de la vallée vs. échelle des formes du lit), plus le différentiel thermique entre ces résurgences et la rivière sera important, et donc plus ces apports seront capables d'influencer la température des eaux superficielles. Ainsi, la distribution de ces zones d'exfiltration reflète la morphologie du lit et de la plaine alluviale, tandis que l'écart de température entre la masse d'eau et les exfiltrations ou résurgences reflète l'origine potentielle des eaux. Le paramètre température peut donc également informer sur la forme, l'intensité et les dynamiques de ces interactions entre *eso* et *esu*.

1.4. La température comme intégrateur des interactions eaux souterraines (*eso*)/eaux de surface (*esu*)

Il existe de forts besoins en termes de connaissances et de méthodologies pour mieux caractériser les interactions *eso/esu* tant du point de vue quantitatif que qualitatif. Les difficultés de caractérisation rencontrées sont principalement liées à la forte variabilité spatiale et temporelle de ces interactions, ainsi qu'à la variété des contextes hydrogéologiques dans lesquelles elles ont lieu. Il s'avère de plus que ces interactions sont difficiles à observer. Il est pourtant important de les connaître, voire de les quantifier, compte-tenu des enjeux d'évaluation de l'état des masses d'eau et de dimensionnement d'opérations de restauration ou de gestion (ex : biodiversité, alimentation en eau potable, sécurité et enjeux sanitaires, enjeux réglementaires, services écosystémiques, changements globaux...).

L'interface *eso/esu* est connue comme le siège de deux grands types de fonctions de régulation des hydrosystèmes. Les premières sont les fonctions de régulation biogéochimiques, qui dépendent principalement de l'activité microbiologique et influencent les cycles du carbone, de l'azote et du phosphore. L'interface nappe/rivière et la zone hyporhéique constituent des refuges de biofilm dont les espèces présentes et l'activité sont contrôlées par les gradients de nutriments, d'oxygène dissous et de température. Les processus biogéochimiques en œuvre contribuent à la dégradation des polluants et à l'épuration des cours d'eau. Les secondes sont les fonctions de régulations hydrologiques. D'un point de vue quantitatif, les apports des aquifères aux cours d'eau en période de sécheresse constituent le soutien d'étiage. Sans cette contribution, les cours d'eau seraient rapidement à sec en dehors des périodes de pluie ou de fonte des neiges/glaces. De nombreuses

zones humides sont également dépendantes d'apports souterrains. Ensuite, comme expliqué dans le paragraphe précédent, du point de vue qualitatif, les apports d'eau souterraine assurent le tamponnage thermique des eaux superficielles. L'effet de régulation quantitatif et qualitatif permet le maintien et la préservation de nombreux habitats, et soutient donc la biodiversité aquatique. Certaines lînes ou cours d'eau dits phréatiques sont principalement alimentés par des eaux souterraines et abritent une faune et une flore spécifiques. Si la température est un facteur clef, le gradient écologique de répartition des espèces y est aussi contrôlé par la teneur en oxygène dissous et en nutriments, eux-mêmes influencés par ces échanges entre *esu* et *eso*.

En somme, les interactions *eso/esu* pondèrent en partie les variations de températures dans les cours d'eau. Le tamponnage thermique permet le maintien de la biodiversité et des habitats aquatiques en lien avec d'autres paramètres comme la teneur en oxygène dissous et en nutriments. Si ces contrôles présentent une variabilité naturelle dans l'espace et dans le temps, ils peuvent aussi être influencés par les activités humaines et notamment celles qui viennent perturber les interactions *eso/esu* comme les pompages en nappe ou les prélèvements dans les cours d'eau, l'implantation de barrages ou de seuils, la pollution des nappes, les hausses de températures liées aux changements globaux, etc.

1.5. Mesurer la température des rivières : tentative de définition(s)

La définition générale de la température est relativement bien connue du grand public ; c'est une grandeur physique associée aux sensations de chaud et de froid, dont l'appréciation est fournie par un thermomètre, et qui reflète d'un point de vue physique le degré d'agitation des molécules d'un corps ou d'une substance (la température étant proportionnelle à l'énergie cinétique moyenne des

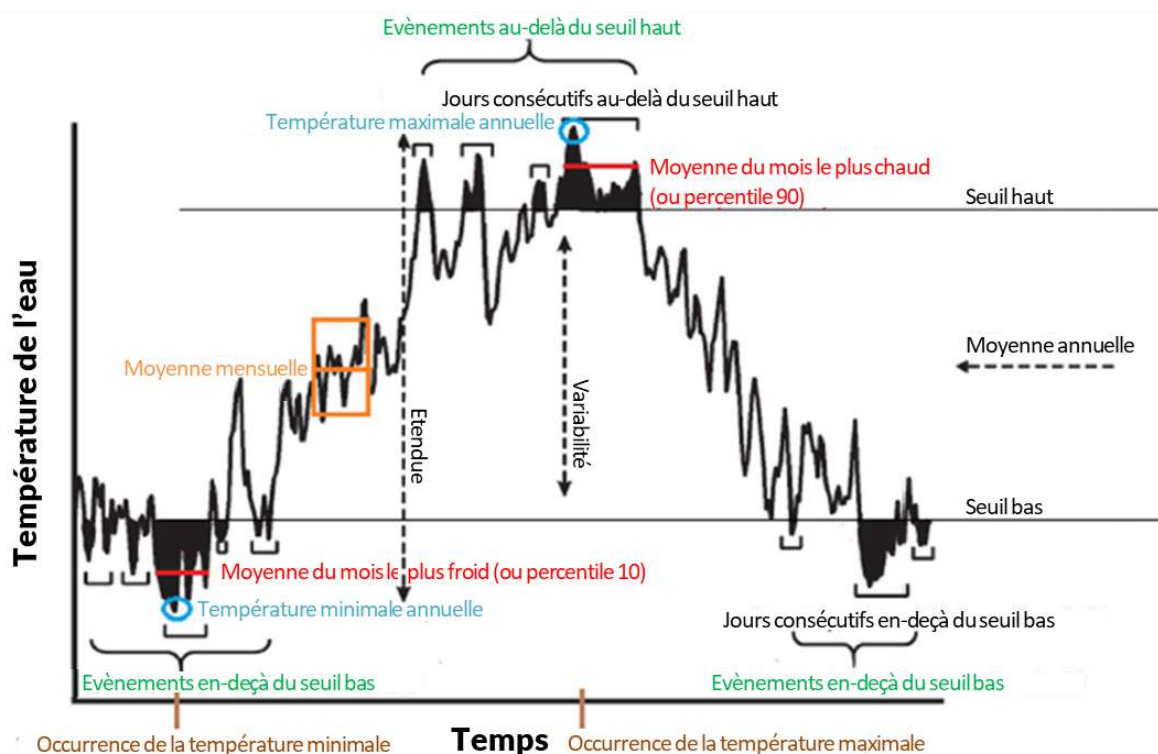


Figure 3. Description du régime thermique d'un cours d'eau par l'utilisation de métriques dont la définition est plutôt statistique, voire hydrologique (Source : traduit de Olden & Naiman 2010, modifié par Beaufort et al. 2020).

molécules). Lorsque l'on s'intéresse à la température de l'eau des rivières, la définition de la température s'attache principalement à la définition de métriques spécifiques permettant de faire part des conditions de température. Ainsi, d'un point de vue hydrologique, on va s'intéresser principalement au régime thermique des cours d'eau et de son évolution dans le temps en le décrivant par certaines valeurs clés, telles que la température moyenne journalière, la température moyenne annuelle, les valeurs minimales et maximales mensuelles, l'amplitude saisonnière, le nombre de jours avec des températures supérieures à certains seuils thermiques, la date de dépassement de seuils thermiques etc. (Figure 3 & Figure 4). Ces métriques permettent ainsi de décrire objectivement la température d'une station ou d'une rivière, et elles permettent une comparaison dans le temps et à travers les différentes disciplines qui s'intéressent à la température (ex. physicochimie, biologie, géomorphologie, ingénierie des processus, etc.) grâce notamment à l'utilisation d'échelles communes (ex. en France, le degré Celsius noté °C).

L'étude de la température des cours d'eau se fait souvent en lien avec la biologie ou l'écologie des espèces. En effet, la température est un facteur de contrôle clé pour de nombreux processus biologiques, biophysiques et biochimiques, que ce soient le cycle des nutriments, le métabolisme (équilibre entre respiration, photosynthèse, réaération, productions primaire et secondaire, etc.), la concentration et saturation en composants chimiques, les cycles de reproduction de nombreux organismes, les phases de migration des poissons migrateurs, la distribution des organismes thermosensibles, etc. Il est donc important de définir des métriques de température qui soient adaptées aux questions biologiques et écologiques soulevées, comme par exemple les différentes phases de développement larvaire, de maturation, d'émergence, de migration, etc. (Figure 4). C'est sur ce principe qu'a été développé l'outil MACMA SALMO en 2010 par la Fédération de Pêche de Haute-Savoie, permettant de calculer de manière automatique et accessible au plus grand nombre de gestionnaires (macro Excel) une série de métriques « temporelles » de température construites

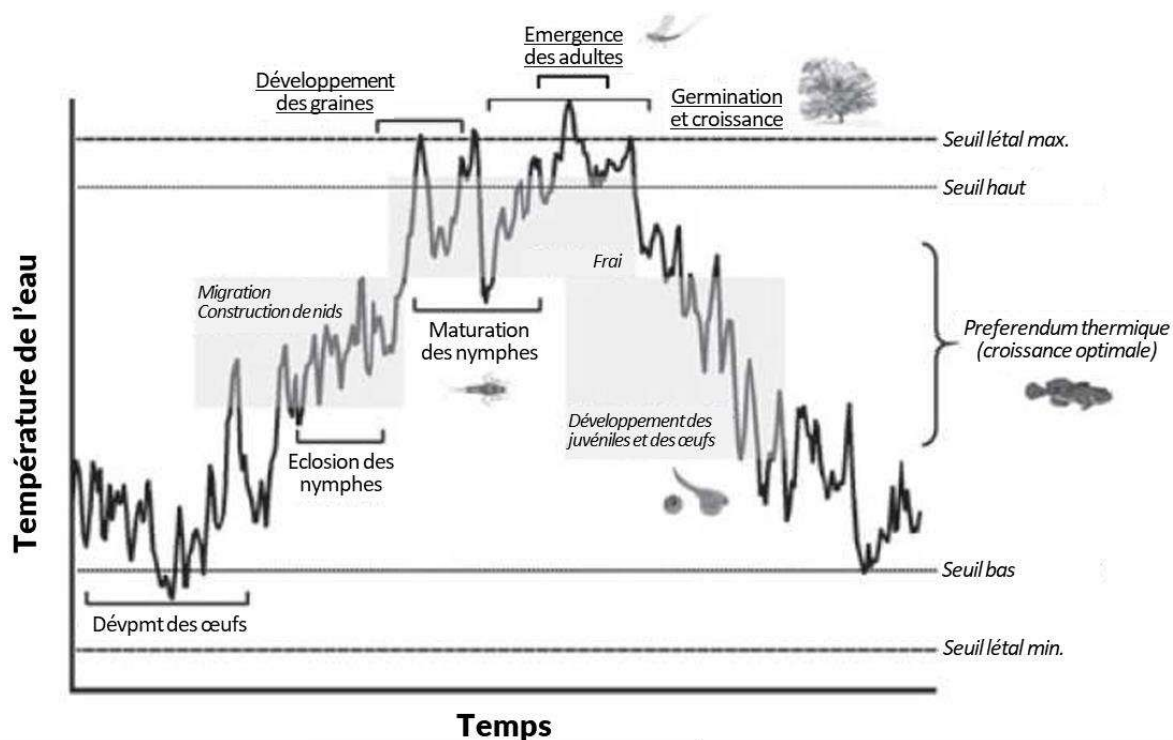


Figure 4. Le régime thermique d'un cours d'eau influence l'ensemble des compartiments biologiques via de nombreux mécanismes qui s'appliquent à différentes échelles de temps et d'espace, d'où la nécessité d'adapter les métriques de température étudiées aux espèces cibles (Source : traduit de Olden & Naiman, 2010).

autour de l'écologie de la truite commune (Dumoutier et al., 2010). Ainsi, certains indices tels que la durée théorique d'incubation des œufs, de phase embryo-larvaire, ou encore de séquences de stress thermiques, peuvent apporter des informations plus spécifiques aux gestionnaires en fonction d'espèces cibles ou de critères biologiques prédéfinis.

1.6. Vers une meilleure prise en compte des habitats thermiques pour des applications en écologie

Le lien entre la température des rivières et les organismes qui les peuplent est clairement établi dans la littérature et dans les connaissances vernaculaires. Pourtant, à l'inverse de certaines pollutions ou perturbations particulières (pollutions chimiques, altérations hydrauliques, eutrophisation, colmatage, etc.), il n'existe pas d'indice hydrobiologique (c'est-à-dire construit sur les peuplements piscicoles, macrobenthiques, marcophytiques ou diatomiques) traduisant les perturbations thermiques de nos rivières (Marteau, Piégay, et al., 2022). Il est donc important de correctement suivre le comportement thermique des cours d'eau pour pouvoir au mieux interpréter les changements biologiques qui peuvent y être observés. Bien souvent, les changements de température s'accompagnent d'une modification des conditions hydrauliques et hydrologiques, et il est alors difficile de dissocier le rôle joué par chacun des différents facteurs.

La majorité des organismes aquatiques, parmi lesquels on trouve les insectes, les reptiles, les amphibiens, les mollusques et les poissons, sont des ectothermes : la température de leur corps n'est pas constante mais varie pour rester proche de celle du milieu. En conséquence, la température de l'eau détermine l'ensemble des processus physiologiques et biochimiques nécessaires aux fonctions vitales de ces organismes. En effet, les conditions thermiques agissent sur le métabolisme et les besoins alimentaires qui eux-mêmes guident la croissance, le développement embryonnaire et/ou larvaire, la résistance aux maladies, les risques de parasitismes, la maturité sexuelle, la migration, le vieillissement (donc sur la mortalité), etc. La température de l'eau peut donc être considérée comme le paramètre le plus déterminant dans l'accomplissement des cycles de vie de la majorité des organismes aquatiques. Il est aussi un puissant moteur de l'adaptation qui est à la base de la richesse biologique présente au sein des écosystèmes aquatiques.

Les gradients thermiques observés à large échelle et leurs effets sur la répartition spatiale de la biodiversité sont connus depuis longtemps. Par exemple, les notions de biotypologies qui décrivent les gradients des peuplements le long des continuums fluviaux et qui sont le résultat des différentes sensibilités et tolérances thermiques développées par les espèces sont bien assimilées par les acteurs. Par contre, l'existence de variations importantes des conditions thermiques à des échelles spatiales plus restreintes (niveau tronçon, méso ou micro-habitat) est bien moins connue car encore peu documentée. Le rôle pourtant primordial que jouent ces conditions thermiques est encore sous-estimé et leur description dans les diagnostics écologiques des rivières est souvent lacunaire comparativement aux autres compartiments étudiés (paramètres chimiques, inventaires d'espèces et abondances, descriptions des habitats, ...). A ces échelles locales, la distribution de la température de l'eau montre de fortes variations et les conditions thermiques au niveau d'un tronçon de rivière sont loin d'être homogènes. En fait, l'ensemble des conditions thermiques forment, au sein des milieux, une mosaïque d'habitats thermiques dont les paramètres vont varier spatialement et temporellement. Le milieu est comme « découpé » en tâches présentant des conditions thermiques différentes, plus ou moins favorables aux espèces présentes, et ce découpage -c'est à dire la forme,

la superficie de ces tâches et leurs paramètres thermiques- va varier sous l'influence de plusieurs facteurs anthropiques (ex. seuils transversaux et barrages, endiguements, rectification) et environnementaux (ex. largeur du fond de vallée, proximité de la nappe alluviale, substrat géologique). Ainsi d'un point de vue écologique, plus les ambiances thermiques seront diversifiées, plus la biodiversité sera riche et plus il y aura d'ambiances avec des conditions thermiques favorables aux espèces présentes, plus la capacité d'accueil du milieu –et donc l'abondance– pour ces espèces pourra être importante.

On perçoit la forte plus-value qu'il y aurait à intégrer cette notion d'habitats thermiques et des descripteurs thermiques pertinents dans les diagnostics écologiques, en les mettant en rapport avec les exigences thermiques d'espèces cibles indicatrices d'une certaine thermo-sensibilité. Un parallèle peut être fait avec les notions 1) de *qualité d'habitats physiques*, qui qualifie une rivière à partir de la diversité des faciès rencontrés, et 2) de *micro-habitats physiques* qui déterminent des ambiances à partir des combinaisons de hauteurs d'eau, vitesses d'écoulement et substrats rencontrés dans le milieu. Ainsi, les habitats thermiques qui correspondent à l'ensemble des ambiances thermiques indispensables au bon fonctionnement des espèces à différents stades de vie semblent aussi importants et légitimes que les descripteurs d'habitats physiques. La modification des conditions thermiques peut être considérée comme une dégradation des habitats au même titre que la qualité physique du milieu ou la qualité chimique de l'eau.

Le déploiement opérationnel de l'outil IRT-a devrait permettre une meilleure prise en compte de cette notion d'habitats thermiques dans les diagnostics écologiques et ainsi donner accès à de nouvelles possibilités dans le domaine de la restauration et de la conservation de la biodiversité aquatique. En voici quelques exemples :

- Localiser et caractériser à l'échelle des bassins les refuges thermiques nécessaires à la survie des organismes pendant les périodes de forte chaleur et les prendre en compte dans les politiques de l'eau : par exemple assurer leur accessibilité par des actions de rétablissement de la continuité écologique, et veiller à maintenir les écoulements à l'origine des refuges thermiques dans les études de gestion quantitative des ressources en eaux ;
- Vérifier l'adéquation, à la fois spatiale et temporelle, entre les conditions thermiques (et la distribution des habitats thermiques) et les exigences thermiques des espèces. Deux exemples peuvent être présentés :
 - sur les grands axes de migration pour le saumon atlantique, que ce soit au stade géniteur migrant ou juvénile dévalant (Figure 6) (Calado et al., 2021).
 - ou la prise en compte, pour des espèces sédentaires, des courbes de préférence thermique, pour identifier les écarts aux tolérances thermiques. Ces écarts peuvent alors être considérés comme des altérations de leurs habitats thermiques à même de provoquer des stress thermiques pour les organismes, qui peuvent alors altérer leurs fonctions vitales (Figure 5).

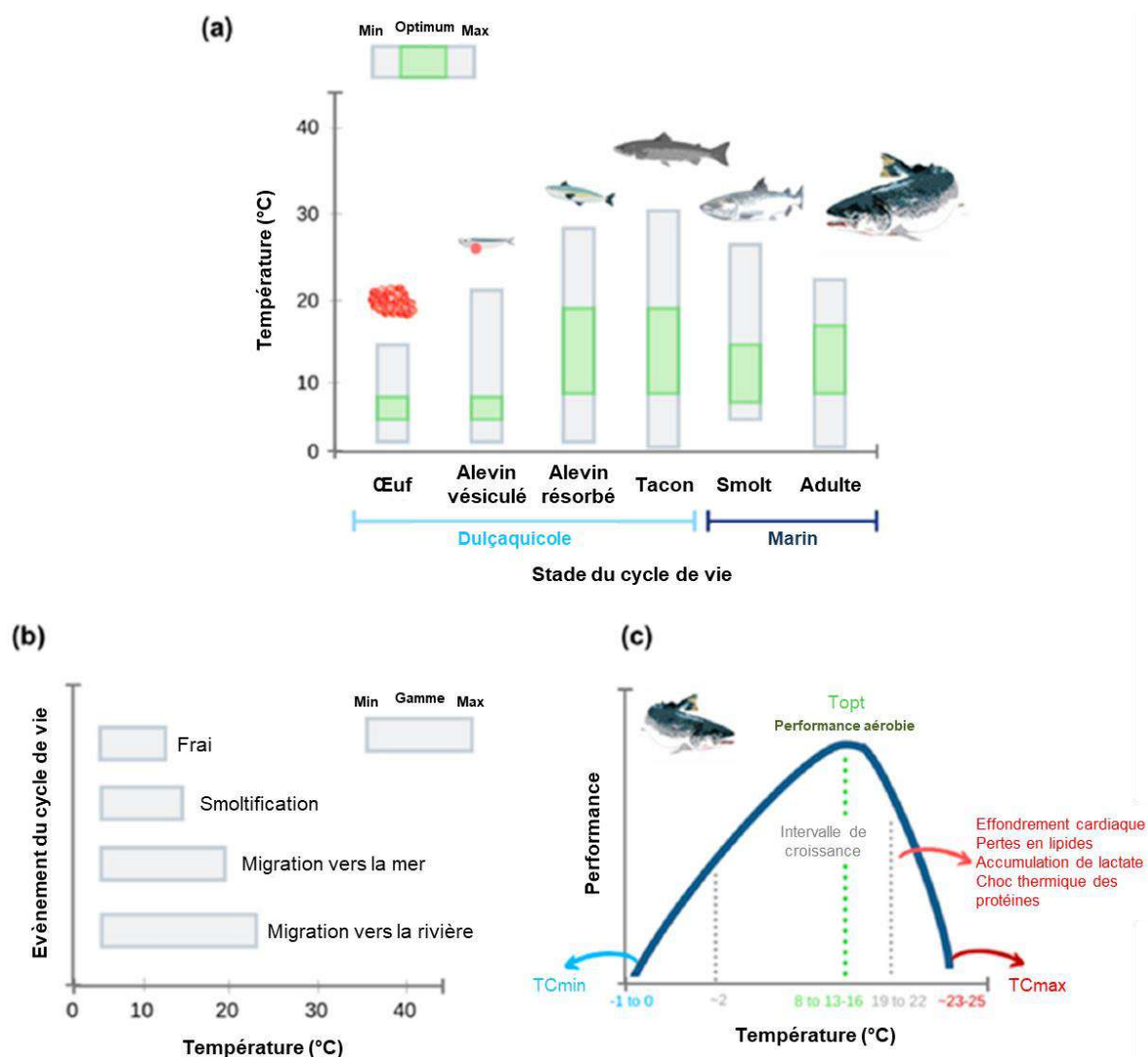


Figure 6. Biologie thermique du saumon atlantique (*Salmo salar*). (a) Fenêtres thermiques des différentes étapes de vie, (b) fenêtres thermiques des événements du cycle de vie, (c) courbe théorique de performance du saumon adulte. T_{opt} = température optimale, TC_{min} = température critique minimum, TC_{max} = température critique maximum (traduit de Calado et al., 2021).

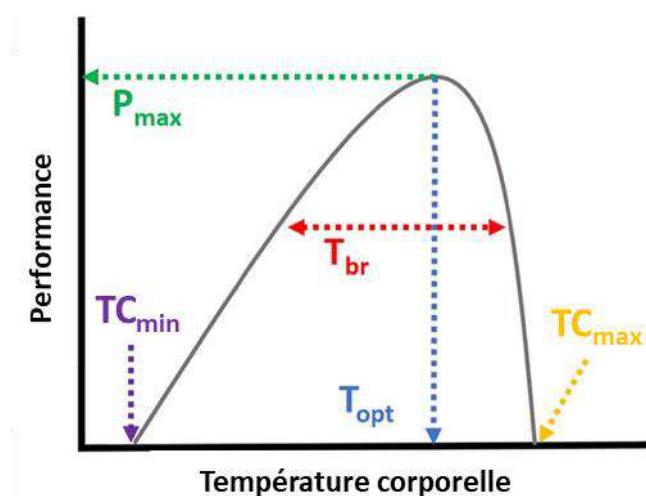


Figure 5. Exemple de relation typique des organismes, notamment sténothermes, à la température.

Plus largement, un travail important reste à réaliser pour une meilleure intégration de la notion de continuité thermique dans les politiques de conservation/restauration de la continuité écologique. Ces avancées devront se faire par la prise en compte de l'existence de *barrières thermiques*, qui

jouent un rôle dans la fragmentation des habitats et qui entravent la continuité écologique, par le développement de concepts novateurs comme celui de *fenêtres thermiques* nécessaires à certaines phases des cycles de vie, et de *corridors thermiques* pour la migration des espèces ; par la prise en compte des habitats thermiques dans des méthodes existantes, comme celles de définition des débits minimums biologiques par exemple, qui sont aujourd'hui uniquement basés sur la distribution des habitats physiques. Ces approches permettront de fournir les outils pour une meilleure gestion des milieux aquatiques.

1.7. La température comme intégrateur des enjeux de gestion à différentes échelles

Comme démontré dans les paragraphes précédents, la température de l'eau est un facteur écologique majeur qui agit à différentes échelles spatiales et temporelles sur les milieux aquatiques. Les décideurs et les gestionnaires des cours d'eau et de leurs bassins versants ne peuvent donc pas l'ignorer lorsqu'il s'agit de comprendre le fonctionnement des rivières et de définir des projets de restauration.

Sa mesure et la connaissance de ses variations, en relation avec les exigences des cycles biologiques des espèces aquatiques, sont très utiles pour analyser le fonctionnement écologique d'un bassin versant. Son caractère intégrateur des processus écologiques, physico-chimiques et biologiques, en font un indicateur pertinent pour la connaissance mais également pour la gestion des milieux aquatiques. La température de l'eau contribue en effet à la structuration de la répartition des espèces, de leurs cycles biologiques et de leur métabolisme et, plus largement, de la cinétique des processus biologiques de la boucle microbienne et des processus biogéochimiques.

Par ailleurs, les données de température peuvent fournir des informations aux gestionnaires sur les conséquences écologiques de l'utilisation de l'eau et l'exploitation des milieux aquatiques. La température conditionne les impacts des pressions exercées par les activités humaines sur les milieux aquatiques, là encore à différentes échelles. Ces impacts résultent de l'effet direct des aménagements et des usages de l'eau sur la température ou des effets indirects sur le métabolisme des cours d'eau. En voici quelques exemples pour illustrer :

- L'usage des nappes d'accompagnement ou des aquifères de versants, l'aménagement des cours d'eau (modifications des tracés, barrages, etc.), peuvent perturber le régime thermique des cours d'eau en modifiant les contributions respectives des apports d'eau de surface et des eaux souterraines au débit des rivières. Les impacts écologiques consécutifs à ces modifications dépendront alors de l'intensité et de la fréquence de ces perturbations. Ils dépendront aussi de leur durée et de leur positionnement au regard des phases des cycles biologiques, ainsi qu'au regard des possibilités des organismes aquatiques à trouver des conditions thermiques favorables et à pouvoir y accéder (on parle souvent d'habitats thermiques et de « connectivité ») ;
- Les changements des conditions de température peuvent influencer sur la présence de contaminants toxiques (ion NH₃ par exemple, résultant de la dissociation de l'ammonium) ainsi que sur l'écotoxicité des contaminants, souvent dépendante du métabolisme des organismes aquatiques ;

- Les changements thermiques modifient aussi la dynamique des populations et des peuplements, ainsi que les réseaux trophiques. Ils sont à même de favoriser la prolifération d'espèces ou de groupes d'espèces et soutenir, par exemple, les phénomènes d'eutrophisation dont les conséquences peuvent être particulièrement sévères pour l'oxygénation des eaux et la biodiversité et capables, parfois, d'entraîner des risques sanitaires liés à l'émission de toxines.

Par ailleurs, les gestionnaires et aménageurs doivent tenir compte des changements environnementaux globaux dans leurs prises de décision. Parmi eux, les effets du changement climatique sur le fonctionnement des rivières sont déjà bien mesurables ; ils devraient être de plus en plus marqués au cours de prochaines décennies. L'acquisition de données thermiques sur les milieux aquatiques peut constituer un enjeu en soi pour disposer de chroniques de température dans un objectif de connaissance patrimoniale, le plus souvent à des échelles spatiales relativement larges. Mais à des échelles plus locales, il s'agit aussi de pouvoir utiliser les informations issues de ces données pour identifier des seuils de vigilance et des critères d'action pour conduire des projets de conservation ou de restauration. Plus largement, l'aménagement des territoires doit privilégier les projets qui favorisent la résilience des cours d'eau au travers du maintien de conditions de température favorables aux communautés aquatiques et du bon état écologique. Ceci invite donc à renforcer l'usage de la température de l'eau comme indicateur de gestion, dès lors que les gestionnaires sont en capacité d'interpréter ces données au regard de leur signification vis-à-vis du fonctionnement écologique des hydrosystèmes (évaluation de risques).

De fait, la température est utilisée depuis très longtemps comme un paramètre d'évaluation de l'état écologique des cours d'eau, mais elle renseigne aussi – de manière très intégrée – sur le fonctionnement hydromorphologique des cours d'eau. Elle apporte des informations précieuses pour comprendre le lien entre les variations et les changements de la circulation de l'eau au sein des territoires, liés à des causes pouvant trouver leur origine à différentes échelles. Au regard des rôles directs et indirects que la température de l'eau joue sur les organismes aquatiques, disposer de données thermiques permet aussi d'apprécier les effets et conséquences des projets de restauration et d'aménagement des territoires sur l'écologie des cours d'eau. Le présent guide expose les avantages et les limites des mesures de température par une méthode innovante pour les gestionnaires, la méthode dite « infra-rouge thermique aéroportée » (IRT-a), en la replaçant parmi les autres méthodes disponibles pour la métrologie de la température. Le choix des méthodes dépendra des échelles spatiales et temporelles à couvrir et des questions auxquelles les gestionnaires ont l'ambition de répondre.

Nous sommes entrés dans une époque où les records de chaleur se succèdent au fil des ans pour chacune de nos quatre saisons, avec des étiages de plus en plus longs et intenses ; dans ce contexte, disposer d'une connaissance précise de la température de nos cours d'eau devient de plus en plus indispensable. L'été, et même aujourd'hui la fin du printemps, deviennent des périodes particulièrement critiques pour nos espèces de poissons totalement dépendantes des températures de l'eau. A chaque espèce, à chaque stade de développement ses préférences de température et ses limites de résistance, forgées par des milliers, des millions d'années d'adaptation à leur environnement. Ces grands équilibres liés à la température aquatique ont déjà été bouleversés en de nombreux endroits par les conséquences de l'activité humaine locale : suppression de ripisylve, création de plans d'eau et barrages, rectification des rivières, prélèvements d'eau... Les effets de ces

aménagements, déjà majeurs, sont encore amplifiés par le réchauffement climatique produit par l'activité humaine à l'échelle du globe ; et nous le savons presque tous, cela ne va pas s'arranger dans les décennies qui arrivent.

Il est donc devenu plus que jamais urgent pour les gestionnaires que nous sommes, et une question de survie pour les communautés aquatiques qui peuplent encore nos rivières : nous devons atténuer autant que possible l'intensité du réchauffement en restaurant les milieux, et permettre aux espèces d'accéder à des zones de refuge plus fraîches lors des périodes critiques. Mais encore faut-il identifier ces refuges à l'échelle des bassins versants, bien comprendre les relations nappes/rivières qui peuvent façonner ces îlots de fraîcheur indispensables au maintien de la biodiversité. En ce sens, l'imagerie thermique aéroportée nous fournit une donnée précieuse pour étudier dans l'espace, très simplement, ces informations vitales. Ses développements en font un outil très intéressant pour aider à définir et évaluer des travaux de restauration des cours d'eau, avec des rendus visuels facilement compréhensibles et valorisables auprès du public.

1.8. Pourquoi ce guide ?

L'infrarouge thermique aéroporté (IRT-a) est un outil de caractérisation de la température de surface par télédétection. Bien que la technologie existe depuis le milieu des années 1970, ce n'est que récemment que son utilisation s'est réellement développée. Il permet une approche spatiale de la température avec une haute précision et une haute résolution, offrant ainsi la possibilité d'aborder un certain nombre de problématiques que d'autres outils ne permettent pas. En revanche, il possède un certain nombre de contraintes et de limites qu'il est important d'avoir à l'esprit lorsque l'on prévoit ou prépare une campagne de mesure ou que l'on en analyse les résultats. L'outil a été développé à des fins de recherche scientifique dans différents laboratoires, et notamment au laboratoire EVS (UMR5600 – Environnement Ville Société) de Lyon dans le cadre de programmes de recherche successifs. Une grande partie de ces programmes ont été soutenus par l'accord-cadre Agence de l'Eau RMC – ZABR, dont la rédaction de ce guide. Les développements méthodologiques et techniques qui se sont succédé ont fait de l'IRT-a un outil abouti, avec une chaîne d'acquisition et de traitement qui, certes pourront continuer à évoluer au fur et à mesure que la technologie se développe et devient accessible, mais qui en font aujourd'hui un outil opérationnel pour établir des diagnostics. Sortir du cadre unique de la recherche et proposer plus largement l'accès à la technologie ainsi que tout ce qu'elle peut apporter pour comprendre le fonctionnement thermique des cours d'eau à l'échelle du corridor fluvial nécessite de passer par une étape de description, d'explication et d'illustration, à la fois de son fonctionnement, de ses avantages et de ses limites, et de ses applications potentielles. Il est possible d'analyser simplement les images IRT-a acquises et de tirer certaines connaissances de telles observations à partir d'outils géomatiques libres courants et de quelques réglages élémentaires comme nous le montrons dans le guide, ou d'en tirer des analyses quantitatives plus fines et plus robustes, localisées spatialement avec précision et potentiellement répliquables au cours du temps. Nous introduisons également cette seconde étape en explicitant notamment les étapes importantes et les fondements méthodologiques.

Il est important de souligner que les différents outils décrits dans ce guide, et tout particulièrement l'IRT-a, ne sont généralement pas utilisés de manière isolée. Leurs aspects complémentaire et combinatoire, en particulier en termes de croisement d'échelles (Figure 7), sont des atouts à prendre en compte lorsque l'on cherche à les utiliser. La diversité des exemples présentés en illustration reflète assez bien cette complémentarité.

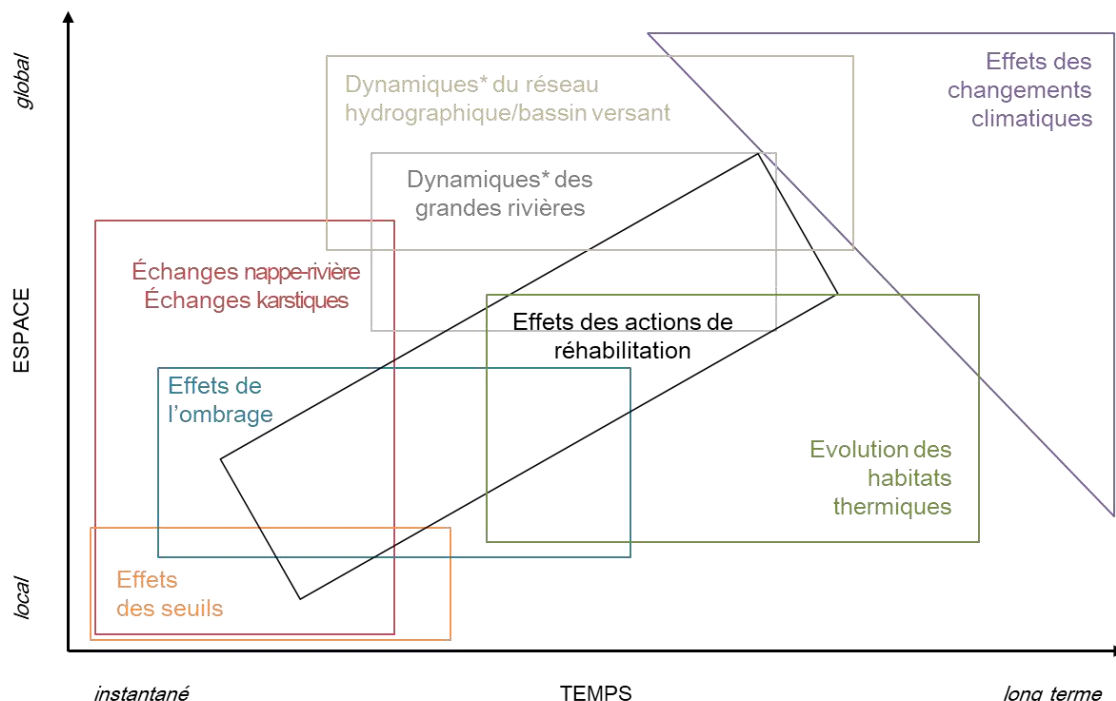


Figure 7. Echelles spatiales et temporelles des enjeux et questions liés à la température des cours d'eau recensés au sein de ce guide.

Pour présenter les outils nous avons distingué didactiquement 2 étapes :

- (1) d'une part la **mesure** proprement dite (et les techniques associées) : comment peut-on acquérir de la donnée ? Cette partie relève plutôt de la **métrologie** et de la mesure physique associée à l'IRT-a ;
- (2) et d'autre part le **traitement** de la donnée IRT-a : comment peut-on exploiter les données acquises pour comprendre et expliquer la température des rivières ? Cette partie, plus **thématique**, est développée par grand type de traitement et échelle d'intérêt, tout en soulignant les liens entre ces approches. Il est également développé certains outils de prédiction à long terme : comment anticiper les changements à venir et leurs effets sur les différents compartiments aquatiques ? Cette partie suivra les différentes approches existantes :
 - géographiques,
 - statistiques,
 - physiques.

2. MESURER LA TEMPERATURE EN RIVIERE PAR IRT-A

L'IRT-a est un outil qui permet de cartographier les températures de surface d'une étendue terrestre ou marine. Cet outil est utilisé depuis de nombreuses années pour l'étude des océans, tout d'abord par satellite (e.g. Anding & Kauth, 1970; Emery & Yu, 1997) puis progressivement par l'utilisation de capteurs terrestres embarqués (e.g. Lévêque et al., 1972) ou montés sur des plateformes de recherche marine (e.g. Jessup et al., 1997). Il a également rapidement été appliqué sur les zones côtières (Lévêque et al., 1972) et les lacs (Anderson et al., 1995; Bolgrien & Brooks, 1992). Son application à l'étude des rivières, bien qu'initiée à la même période (Atwell et al., 1971), n'a réellement pris son essor qu'au début des années 2000 et principalement aux États-Unis (Cherkauer et al., 2005; Faux et al., 2001; Torgersen et al., 1999, 2001). Ainsi, le *Department of Environmental Quality* de l'Oregon avait déjà imagé près de 2000 km (1200 miles) de cours d'eau en 1999 (Faux & McIntosh, 2000). En France, elle est relativement peu utilisée en dehors du monde de la recherche. On retrouve quelques études menées sur le Rhin (e.g. Eschbach et al., 2017), sur le bassin de la Loire (e.g. Lalot et al., 2015) et majoritairement sur le bassin du Rhône (Dole-Olivier et al., 2019; Marteau, Michel, et al., 2022; Marteau, Piégay, et al., 2022; Wawrzyniak et al., 2012, 2013; Wawrzyniak, Piégay, Allemand, et al., 2016). Ailleurs, on retrouve de nombreuses études menées en Amérique du Nord, et notamment autour des cours d'eau salmonicoles de l'Oregon (Handcock et al., 2012 et les références qui s'y trouvent; Torgersen et al., 2001) et du Canada (Dugdale et al., 2013, 2015), et plus récemment dans l'Idaho (Mejia et al., 2020). De nos jours, de nombreux vecteurs existent pour acquérir des images depuis les airs. Ils peuvent embarquer des capteurs plus ou moins lourds et volumineux. On retrouve des exemples d'utilisation d'hélicoptères (Dugdale et al., 2013; Wawrzyniak, Piégay, Allemand, et al., 2016), d'avions ultralégers (Latte et al., 2020), d'ULM (Marteau, Piégay, et al., 2022), de parapentes motorisés (Wawrzyniak et al., 2013) ou encore de drones (Eschbach et al., 2017).

Récemment, de nombreux groupes de recherche se sont orientés vers l'IRT-a grâce au développement technologique et à la possibilité d'installer des capteurs devenus plus petits sur des drones devenus plus abordables (Marteau, Georges, et al., s. d.). On trouve depuis quelques années un nombre croissant d'études menées notamment dans le domaine de l'agriculture (Barbedo, 2019; e.g. Ribeiro-Gomes et al., 2017), mais l'application au domaine fluvial n'y fait pas exception (Dugdale, 2016). Ainsi, des exemples peuvent être trouvés au Royaume-Uni (Dugdale et al., 2019), en Allemagne (Casas-Mulet et al., 2020), aux États-Unis (Abolt et al., 2018; Caldwell et al., 2019), en Australie (Kuhn et al., 2021), etc. En revanche, l'utilisation de ces capteurs miniaturisés lorsque l'on souhaite disposer d'une mesure précise de la température et non seulement de la détection des anomalies thermiques reste soumise à de nombreuses incertitudes (Dugdale et al., 2019). De telles mesures nécessitent une calibration robuste et une validation minutieuse pour être réellement exploitées (Marteau, Georges, et al., s. d.).

2.1.Principes de fonctionnement

Les principes de fonctionnement de l'IRT sont présentés de manière détaillée par Vollmer & Möllmann (2018) et sous une forme plus abordable par Handcock et al. (2012) et Dugdale (2016). Seuls les principes généraux de fonctionnement sont repris ici.

L'imagerie infrarouge thermique est une technologie qui utilise les ondes thermiques infrarouges émises par un objet pour en déterminer sa température de manière indirecte, c'est-à-dire à distance. En effet, chaque corps émet une quantité d'ondes infrarouges thermiques selon sa température, mais également ses propriétés physiques (ex. émissivité, voir ci-après). Cette mesure des radiations infrarouges, appelée « radiance », peut être convertie en valeurs de température grâce à la constance de Planck, qui régit le comportement d'un corps en fonction de paramètres physiques. Cette conversion nécessite de connaître l'émissivité de l'objet d'étude, c'est-à-dire la capacité de cet objet à émettre les radiations qu'il reçoit. L'émissivité varie de 0 (réflexion totale des ondes) à 1 (absorption totale des ondes), et prend une valeur entre 0.965 et 0.993 pour l'eau (moyenne souvent utilisée de 0,985, Handcock et al., 2012).

Le principe d'acquisition des images est similaire à celui des appareils photos classiques, à ceci près que les capteurs sont spécialement conçus pour mesurer des longueurs d'ondes propres à l'infrarouge thermique. Ainsi, le champ spectral caractéristique des ondes infrarouges thermiques se situe entre 0,8 et 14 μm , au sein duquel on retrouve les ondes dites « longues » qui nous intéressent plus particulièrement ici (7,5 – 14 μm , Figure 8). Ces capteurs (appelés bolomètres) sont alignés sur une cellule et, à l'ouverture de l'obturateur, reçoivent une information sous forme d'ondes qui génère un courant électrique. C'est l'intensité de ce courant électrique qui détermine la valeur de radiance mesurée par chacun de ces bolomètres.

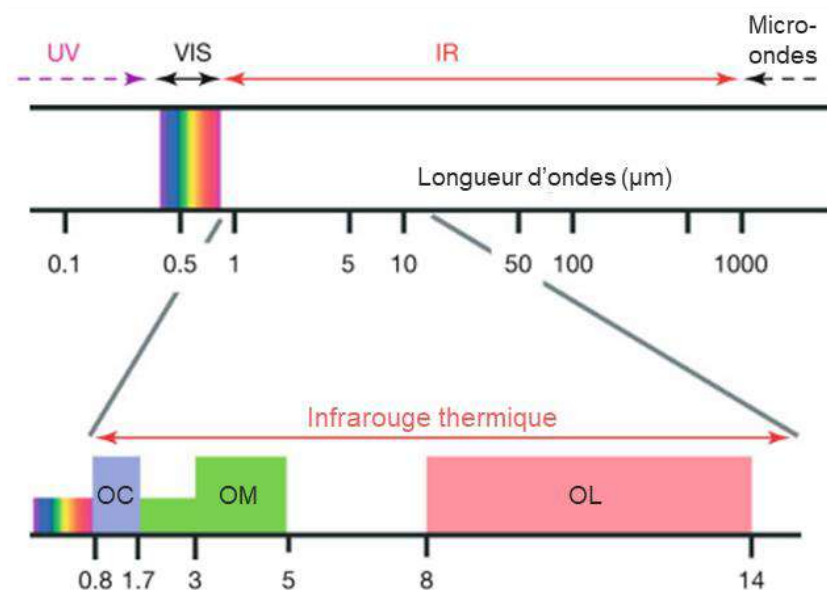


Figure 8. Champ spectral de l'infrarouge thermique et des régions adjacentes, avec un zoom sur ladite région « infrarouge thermique ». On y distingue les ondes courtes (OC), les ondes moyennes (OM) et les ondes longues (OL) (source : traduit de Vollmer & Möllmann, 2018).

Différents types de capteurs IRT existent, que l'on distingue principalement en deux catégories : les capteurs refroidis et les capteurs non-refroidis (Gade & Moeslund, 2014; Tissot, 2002). La différence entre ces deux catégories est technologique ; les capteurs refroidis ont un système efficace mais très énergivore pour limiter l'échauffement des cellules pendant la prise de vue, au contraire des capteurs non-refroidis. En revanche, ce sont ces derniers qui sont les plus fréquemment utilisés de nos jours, et pour un grand nombre d'applications (Gade & Moeslund, 2014). Ces caméras ont un niveau plus élevé de « bruitage » des mesures et une résolution généralement plus faible (Vollmer & Möllmann, 2018), mais elles présentent de nombreux avantages pour leur utilisation en télédétection, et notamment un coût de production plus faible, une consommation électrique moindre, un poids et une taille réduits, une durée de vie plus longue et une fréquence de prise de vue plus élevée (Marshall et al., 1995). L'utilisation de caméras

thermiques devenant plus fréquente, les coûts de production diminuent et leur miniaturisation s'accélère (Gade & Moeslund, 2014; Tissot, 2002). En revanche, les développements propres à la technologie sont moindres et les constructeurs s'attachent principalement à développer les interfaces logicielles et les outils de post-traitement (dBVib groupe, pers. comm.). Peut-être un signe, comme le suggérait Kimata (2018), que les composants actuels s'approchent des limites de ce que l'optique moderne permet de réaliser.

Les images thermiques qui sont issues de telles mesures en milieu fluvial représentent une combinaison de radiations émises par l'eau et de radiations issues d'autres objets se réfléchissant sur le miroir (e.g. végétation, berges, Torgersen et al., 2001) (Figure 9). Ces réflexions au miroir peuvent influencer la température apparente en surface, en fonction notamment de la rugosité de surface (e.g. surface lisse des mouilles vs. surface rugueuse des radiers, Torgersen et al., 2001). De tels phénomènes sont minimisés lorsque l'observation est la plus proche du « nadir », c'est-à-dire faite à la verticale du cours d'eau (Handcock et al., 2006).

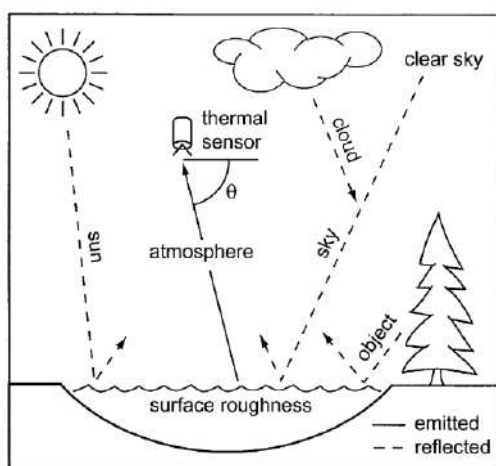


Figure 9. Sources des radiations IRT émises et réfléchies qui entrent en jeu dans la télédétection de la température de surface en milieu fluvial.

L'IRT-a ne fournit qu'une information sur la température de surface. S'il est souvent établi que la colonne d'eau est relativement homogène sur la plupart des cours d'eau, un écoulement laminaire peut tout de même présenter une stratification thermique à l'échelle microscopique qui engendre de petites erreurs dans la mesure de la température de l'eau (0,1-0,2°C, Schluessel et al., 1990). Ce phénomène est indépendant de la stratification thermique macroscopique observée en rivière lors d'étiages notamment, dans des zones calmes telles que les mouilles et les bras morts (Torgersen et al., 2001) ou à l'amont d'obstacles à l'écoulement (Marteau, Piégay, et al., 2022). C'est pour cette raison que Wawrzyniak et al. (2013) et Schott et al. (2001) recommandent de comparer la température de surface acquise par télédétection avec celle mesurée par des thermomètres enregistreurs placés dans la colonne d'eau, et qu'Handcock et al. (2012) précisent que ces capteurs doivent être placés au plus proche de la surface (i.e. dans les 10 premiers centimètres). C'est ainsi que nous utilisons des bouées pour installer les thermomètres à la surface de l'eau lors des campagnes IRT-a (Marteau, Michel, et al., 2022; Marteau, Piégay, et al., 2022).

2.2. Les données disponibles

Par définition, l'acquisition de données IRT se fait à distance, par télédétection, et si possible depuis les airs. On distingue alors 3 grandes catégories :

- Les images satellites, qui furent parmi les premières à être exploitées pour caractériser les hydrosystèmes (mers, puis lacs, puis rivières) ;
- Les images aéroportées, qui sont celles qui sont les plus utilisées de manière générale ;
- Les images issues de stations fixes, positionnées sur un support plus ou moins haut. Cette dernière catégorie n'étant que peu utilisée dans le domaine fluvial, elle ne sera pas développée ici. Pour quelques exemples, il est possible de se référer à Jessup et al. (1997) pour le domaine marin, et Baker et al. (2019) pour le domaine fluvial.

2.2.1. Avantages et inconvénients

La technologie IRT présente des avantages et des inconvénients par rapport aux autres outils de mesure de la température en rivière. De même, les 3 catégories listées ci-dessus ont des avantages qui leur sont propres. Le Tableau 1 résume les principaux éléments qui concernent l'IRT sous ses différentes formes. La méthode IRT fixe, i.e. stationnaire et ancrée à faible hauteur, figure dans le tableau pour comparaison bien qu'elle ne fasse pas l'objet d'une description détaillée ici.

De manière générale, l'IRT-a (« a » pour aéroporté) permet de travailler à une échelle et une résolution spatiales que seul cet outil est capable d'apporter. En fonction de la combinaison vecteur-capteur-hauteur, il est possible d'imager la température de surface de rivières sur plusieurs dizaines de kilomètres (voire plus par imagerie satellite). Les parties suivantes de ce guide fourniront différents exemples de ces échelles de travail. En revanche, cette mesure se fait à un instant donné, qui ne reflète pas les conditions moyennes du milieu. De manière générale, les mesures se font lors d'épisodes particuliers (voir §2.4) en fonction des objectifs de l'étude qui est menée. Cette limite temporelle de la méthode est en lien direct avec les conditions météorologiques et hydrologiques au moment de la campagne de mesure, car le débit et les conditions atmosphériques (notamment température de l'air, rayonnement solaire, humidité de relative et vitesse du vent) influencent le comportement thermique des cours d'eau (Caissie, 2006; Webb et al., 2008) et donc la mesure qui en est faite à l'instant t (Handcock et al., 2012).

Tableau 1. Liste des avantages et inconvénients de l'IRT. Traduit et modifié d'après Handcock et al. (2012).

	Avantages	Inconvénients
Acquisition des données	· Possibilité d'utiliser des enregistreurs de température déjà en place pour la calibration/correction des images	· L'acquisition des données peut être complexe et onéreuse, et sa temporalité est liée à la possibilité de répéter les mesures- L'interprétation des images IRT non-nadir doit être faite avec précaution, tout comme l'interprétation de différences entre surfaces lisses et surfaces rugueuses
	Satellite · Possibilité de couverture régionale, suivi répété avec caractéristiques d'images systématiques, faible coût · Peut permettre de travailler à différentes (larges) échelles Aéroporté · Capable d'imager à plusieurs (moyenne et fine) échelles · Maniabilité et résolution permettant de travailler sur de petits cours d'eau	Satellite · La qualité des images dépend de l'absence de couverture nuageuse et des cycles de passage des satellites, qui conditionnent le jour et l'heure de l'acquisition Aéroporté · La zone d'échantillonnage dépend directement du matériel utilisé (vecteur + capteur) et de la hauteur de vol (i.e. largeur de fauchée) · L'acquisition de données peut être onéreuse car elle nécessite du matériel particulier (caméra, vecteur, etc.), notamment pour du travail en température absolue · La validation/correction des images nécessite généralement d'installer des thermomètres enregistreurs avant la campagne, nécessitant alors un accès physique au cours d'eau
	Fixe · Permet un suivi temporel, facile à déployer et valider	Fixe · Nécessite un accès physique au cours d'eau · Point de vue fixe, n'informe que sur un seul et même point de la rivière · Les angles de vue rendent l'interprétation des résultats plus compliquée. Le choix du point d'installation de la caméra est important pour limiter les reflets
Traitement des images	· Dans le cadre d'une utilisation en température relative, la validation de terrain n'est pas indispensable (même si conseillée) · La plupart des images satellites sont (en partie) pré-travaillées avec une forme de correction atmosphérique déjà intégrée au produit exporté	· L'interprétation des images IRT nécessite d'avoir des images visibles de la même emprise et, si possible, superposées · La chaîne de traitement des images IRT nécessite l'utilisation de certains logiciels spécifiques (et donc certaines compétences), a minima une expérience en SIG, voire en photogrammétrie SfM et/ou traitement d'images numériques et programmation · La correction des images est nécessaire pour obtenir une information de température absolue, ce qui peut rendre l'acquisition plus longue et plus onéreuse · L'interprétation des résultats nécessite une certaine expertise à la fois technique et thématique
Application	· Mesures répliquables, systématiques (satellites) et avec une grande étendue spatiale · Capable de quantifier les motifs thermiques structurels des cours d'eau, rivières et plaines inondables à différentes échelles spatiales (de <1 m jusqu'à >100 km) · Permet d'appréhender l'ensemble du "paysage thermique" de la rivière · Permet dans une certaine mesure d'aider au calage de modèles de température · Les données IRT, ainsi que les données IRP (infrarouge proche), lorsqu'elles sont disponibles, peuvent également servir au suivi des écosystèmes ripariens · La répétition des campagnes permet un suivi régulier pour mesurer la dégradation (ou la réhabilitation) des habitats	· L'IRT ne permet que de mesurer la température de surface et n'informe pas forcément sur les conditions de température de l'ensemble de la colonne d'eau, qui peuvent être importantes d'un point de vue biologique · Fait l'objet d'un arbitrage constant entre résolution des images (et donc précision des motifs spatiaux observés) et les frais engendrés par les études à large échelle

2.2.2. Les images satellites

Les images satellites ont été parmi les premières images IRT à être utilisées pour le suivi des températures de surface, notamment sur les océans (voir Akbari et al., 2017). Par exemple, Anding & Kauth (1970) se sont appuyés sur les missions du satellite américain Nimbus III (1969-1971)

produisant des images d'une résolution de 6 km. Plus récemment, les satellites Landsat (NASA) embarquent un capteur infrarouge thermique depuis la mission Landsat 4 (1982). A l'heure actuelle, c'est la source principale de données satellitaires continues, accessibles gratuitement et avec une large couverture spatiale (Tableau 2). Les satellites Terra et Aqua (NASA), grâce aux capteurs ASTER et MODIS, fournissent également des images satellites infrarouges thermiques depuis 1999, qui sont également accessibles gratuitement. En revanche, la couverture d'ASTER est moins bonne que Landsat, et la résolution des images MODIS (1000 m) est peu exploitable dans le domaine fluvial. Les quelques exemples qui existent dans la littérature reprennent principalement des images Landsat 7 et 8, et s'intéressent généralement à de très grands fleuves ou rivières, tels que les rivières Columbia et Yakima aux États-Unis (ASTER, Cherkauer et al., 2005), le Rhône et la Loire en France (Lalot et al., 2015; Landsat 7, Wawrzyniak et al., 2012), le Danube en Roumanie (Zoran et al., 2012), le Guadalquivir et l'Ebre en Espagne (Díaz-Delgado et al., 2010; Martí-Cardona et al., 2016) ou encore le Qingjiang en Chine (Ling et al., 2017). Certains auteurs ont cherché à optimiser la résolution des images satellites pour une application au domaine fluvial, aussi bien pour les données ASTER que pour les données Landsat (Martí-Cardona et al., 2019).

Tableau 2. Liste et caractéristiques des satellites possédant un capteur infrarouge thermique.

Satellite	Capteur	Résolution au sol (m)	Intervalle de retour	Lancement	Source	Accès
Landsat 9	TIRS-2			2023	https://earthexplorer.usgs.gov/	Libre et gratuit
Landsat 8	TIRS	120	16 jours	2013-....	https://earthexplorer.usgs.gov/	Libre et gratuit
Landsat 7	ETM+	60	16 jours	1999-2003	https://earthexplorer.usgs.gov/	Libre et gratuit
Landsat 5	TM	120	16 jours	1984-2011	https://earthexplorer.usgs.gov/	Libre et gratuit
Landsat 4	TM	120	16 jours	1982-1993	https://earthexplorer.usgs.gov/	Libre et gratuit
Terra (NASA)	MODIS	1000	1-2 jours	1999-....		Payant
Aqua (NASA)	MODIS	1000	1-2 jours	2002-....		Payant
Terra (NASA)	ASTER	90	16 jours	1999-....	https://search.earthdata.nasa.gov/search	Libre et gratuit
POES (NOAA)	AVHRR/3	1090	4 à 6 jours (plusieurs satellites)	Started 1960		Payant
GOES (NASA-NOAA)	ABI	2000	5 min (géo-stationnaire au-dessus des É.-U.)	Started 1974		Payant
ERS-1	ATSR	1000	168, puis 35, puis 3 jrs	1991-2000	https://earth.esa.int/eogateway/missions/ers/data	Payant
ERS-2	ATSR	1000	35 jours	1995-2011	https://earth.esa.int/eogateway/missions/ers/data	Payant
ENVISAT	AATSR	1000	35 jours	2002-2012	https://earth.esa.int/eogateway/missions/envisat/data	Libre et gratuit

Les images Landsat et ASTER sont téléchargeables librement et gratuitement pour un usage à but éducatif ou de recherche, après création d'un compte utilisateur, aux adresses suivantes :

- Landsat : <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- ASTER : <https://search.earthdata.nasa.gov/search>

2.2.3. Les images aéroportées

A l'heure actuelle, il existe très peu de bases de données recensant (et encore moins mettant à disposition) les images thermiques acquises par télédétection par territoire ou par bassin versant. Ces campagnes faisant souvent l'objet de programmes différents, leur enregistrement au sein d'une base de données cartographique est compliqué. Le *Department of Ecology* de l'état de Washington (E.-U.) propose sur son site internet un web-SIG³ permettant de visualiser les dalles successives (<https://apps.ecology.wa.gov/shorephotoviewer/Map/ThermalImageViewer>, Figure 10). Dans une moindre mesure, les images issues des campagnes menées par laboratoire EVS sont répertoriées sur la plateforme ELVIS, également sous la forme d'un web-SIG (consultable sur <http://elvis.ens-lyon.fr/geonetwork/srv/search>). Ce jeu de données s'est principalement construit au cours des dix dernières années sur le secteur Rhône-Méditerranée, bien que quelques campagnes aient été réalisées sur le bassin de la Loire, et une sur la Garonne (Figure 11).

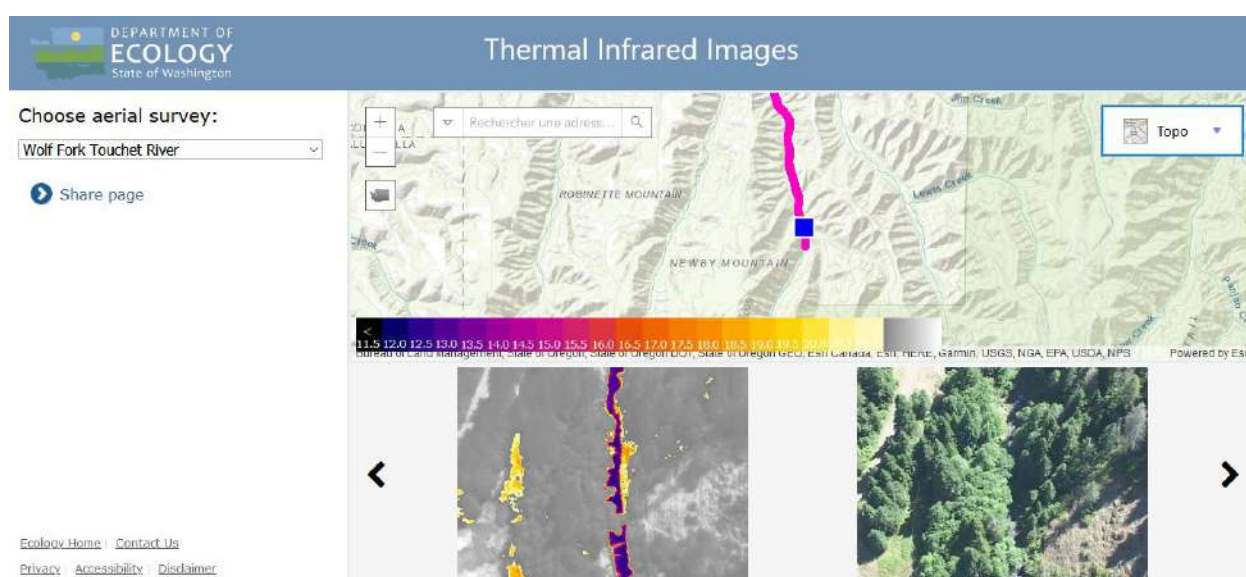


Figure 10. Capture d'écran du web-SIG du *Department of Ecology* de l'état de Washington (E.-U.) permettant la visualisation des images IRT-a produites sur le territoire de l'état.

Généralement, le diagnostic thermique d'un cours d'eau par IRT-a nécessite donc l'acquisition d'un jeu de données établie sur la base d'un protocole précis afin que celui-ci puisse répondre aux questions qui sont posées. Comme évoqué précédemment, il existe plusieurs méthodes et outils pour acquérir des données IRT-a. De manière générale, les combinaisons possibles tournent autour de 3 critères principaux, qui sont eux-mêmes interdépendants : c'est le triptyque capteur-vecteur-hauteur. Le choix de la combinaison de ces 3 critères dépend de nombreux paramètres, tels que :

- La taille de la rivière étudiée (et surtout sa largeur) ;
- La couverture ripicole au-dessus de la zone en eau : plus la ripisylve sera dense, plus il sera difficile d'obtenir une information continue sur le continuum et donc plus il faudra augmenter la résolution spatiale des images pour espérer obtenir une information significative ;
- L'échelle des phénomènes que l'on cherche à étudier, et donc les questions scientifiques soulevées : détection fine des échanges hyporhéiques, profil longitudinal de température à

³ SIG : Système d'Information Géographique.

- large échelle, diagnostic local de l'impact des ouvrages ou de l'ombrage, interactions latérales de la rivière avec sa plaine d'inondation, etc. ;
- Des caractéristiques du matériel disponible ou les solutions proposées par le prestataire commandité : certaines caméras sont utilisables pour une mesure fine de la température, d'autres n'apporteront qu'une information relative, toutes les caméras ne peuvent pas imager à la même fréquence, et ne peuvent donc pas être utilisées à la même hauteur/vitesse de vol ;
- Des conditions géographiques et réglementaires locales : certains secteurs ne peuvent pas être survolés en drone ou en ULM, d'autres secteurs en gorges devront être survolés en hélicoptère pour des raisons de sécurité, etc.

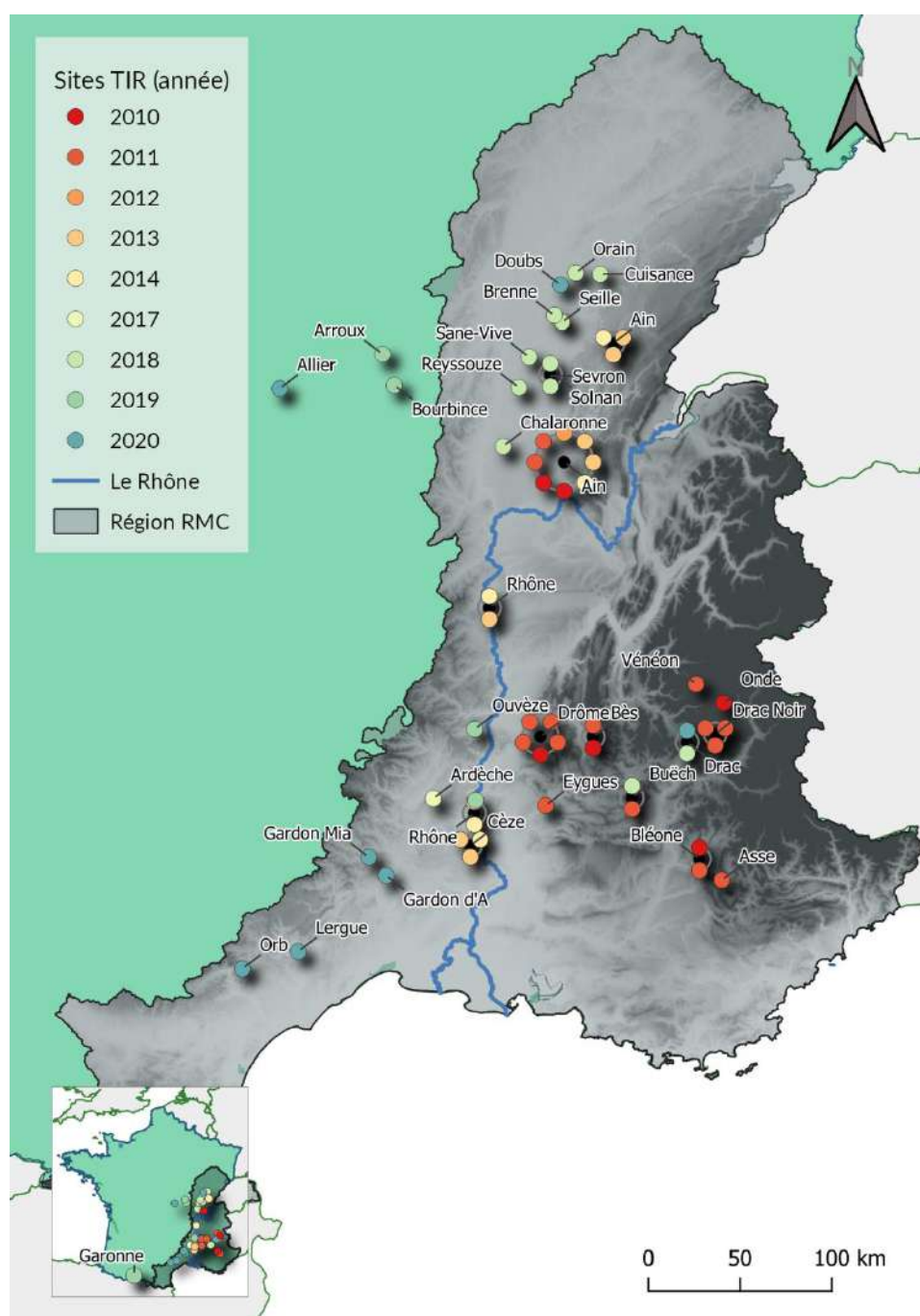


Figure 11. Carte des tronçons de rivière ayant fait l'objet de campagnes IRT-a au cours des dix dernières années au sein du laboratoire EVS. Certaines de ces données dont recensées dans la base de données « elvis » (<http://elvis.ens-lyon.fr/geonetwork/srv/search>).

RMC* : Rhône-Méditerranée-Corse

2.3. La validation

La température obtenue par IRT-a, aussi appelée température *radiante* (car dérivée de la radiance de l'objet « eau »), peut être mesurée avec une assez bonne précision relative, qui est avant tout conditionnée par la précision et la qualité du capteur utilisé. Les données des constructeurs affichent généralement des précisions relatives de l'ordre de 1 à 5% de la mesure, ou de 0,3 à 5°C, suivant les caméras (Kelly et al., 2019). Seulement, ces informations ne sont pas toujours rapportées dans les études, et nécessitent d'être validées par une série de tests. Ainsi, en menant une expérience en laboratoire, la précision relative de la caméra VarioCam HR Research (Infratech®) qui est utilisée au laboratoire EVS depuis plusieurs années s'est avérée être de 0,27°C, pour une précision relative constructeur affichée de 0,30°C. De la même manière, des tests menés dans des conditions similaires avec une caméra FLIR Vue Pro (miniaturisée pour drone), pour laquelle les données de précision ne sont pas fournies par le constructeur, ont montré une précision relative de 1,10°C. À noter au passage que, pour que cette précision relative soit correcte, Handcock et al. (2006) rappellent qu'un minimum de 3 pixels « purs » (c'est-à-dire sans altération par des objets autres que de l'eau) adjacents est nécessaire lors de l'extraction des images thermiques. En-deçà de 3 pixels, la précision de la mesure est fortement altérée.

Pour ce qui est de la température absolue, celle-ci est moins précise et généralement surestimée par les images IRT-a (Handcock et al., 2006; Torgersen et al., 2001; Wawrzyniak, Piégay, Allemand, et al., 2016). Cette surestimation est généralement liée aux conditions météorologiques le jour du vol. En plus de la distance entre la caméra thermique et l'objet mesuré, la température et le taux d'humidité de l'air contrôlent en partie la mesure qui est faite de la température radiante (Handcock et al., 2012; J. Kay et al., 2001).

La validation, et si besoin la correction, de la température radiante est nécessaire pour une utilisation précise et absolue des images thermiques. Deux méthodes existent pour corriger la température radiante (Handcock et al., 2012) :

- Une correction atmosphérique, à partir de modèles atmosphériques qui s'appuient sur les données météorologiques pour déterminer une correction (Schott et al., 2001);
- Une correction empirique, avec l'installation de thermomètres enregistreurs (ou thermographes) dans la rivière pendant la durée de la mission pour pouvoir comparer la température radiante (T_r) à la température cinétique (T_c) *in situ* (Faux et al., 2001).

La correction atmosphérique est couramment utilisée pour le prétraitement des images satellites. Les dernières générations de satellites (ex. Landsat 7 et 8) sont équipées de capteurs proches infra-rouges fournissant des informations nécessaires à ce type de correction. De plus, ils bénéficient de modèles atmosphériques dédiés (ex. MODTRAN®, <http://modtran.spectral.com/>) capables de résoudre l'absorption atmosphérique nécessaire à la correction des images thermiques satellites. Certaines études ont cherché à reproduire cette correction atmosphérique pour des images thermiques aéroportées. Par exemple, Handcock et al. (2006) ont envoyé une sonde dans l'atmosphère à l'aide d'un ballon mesurant les différentes formes de radiance afin d'alimenter un modèle de correction atmosphérique. Ces solutions sont généralement assez complexes et onéreuses à mettre en place (Handcock et al., 2012). D'autres auteurs ont utilisé les modèles intégrés au sein des logiciels de post-traitement des images qui proposent une calibration intrinsèque (ex. caméras FLIR Vue Pro, Dugdale et al., 2019). Cependant, ces outils sont conçus

pour des capteurs bien précis et non transférables à d'autres systèmes. De plus, cette méthode n'exclut pas l'utilisation de thermomètres *in situ* pour valider la correction atmosphérique réalisée (Handcock et al., 2012; Wawrzyniak et al., 2013).

La calibration empirique permet de comparer la température mesurée par imagerie thermique à celle enregistrée par des sondes thermométriques installées dans l'eau. En s'assurant de l'installation des thermomètres soit dans des zones de mélange (i.e. zones de turbulence), soit à la surface de l'eau (jusqu'à 10 cm, Handcock et al., 2012), la température enregistrée peut alors être considérée comme représentative de la température de surface. La relation empirique entre T_r et T_c permet de calibrer les images thermiques pour obtenir un produit final avec une température de surface absolue.

2.4. Mise en place d'une campagne de mesure IRT-a : considérations et éléments de planification

Quels paramètres conditionnent la mise en place d'un suivi par IRT-a ? Est-il possible d'appliquer ce type de mesure à tous les cours d'eau et à tous les contextes ? Comment choisir le vecteur et le capteur à utiliser ? Cette section vise à répondre aux principales questions techniques liées à l'outil et à la méthode qu'il faut considérer avant de se lancer dans l'utilisation de l'IRT-a. Elle est en partie inspirée de l'article publié par Steve Dugdale (2016) et intitulé « Guide à destination du praticien pour la télédétection de la température en rivière » (en anglais).

2.4.1. Ma rivière peut-elle être imagée par IRT-a ?

L'outil IRT-a peut s'appliquer à un très grand nombre de cours d'eau puisqu'il est possible d'ajuster le choix du capteur et du vecteur au sujet d'étude. Néanmoins, l'information qui en sera exploitée ne sera pas la même suivant les propriétés du système. Voici quelques exemples illustrés.

Premièrement, il est primordial de bien définir les questions et enjeux auxquels l'IRT-a pourrait apporter des réponses. Par exemple, sur un cours d'eau de plaine fortement aménagé (recalibré, avec présence de seuils, etc.), il sera difficile d'observer une quelconque dynamique latérale au sein du chenal, du fait de la lenteur des écoulements, de la présence d'une potentielle stratification verticale, etc. (Figure 12). En revanche, il sera possible d'étudier la rupture du profil longitudinal de température à cause de la présence de ces ouvrages ou d'affluents majeurs (voir §3.2.2.2).

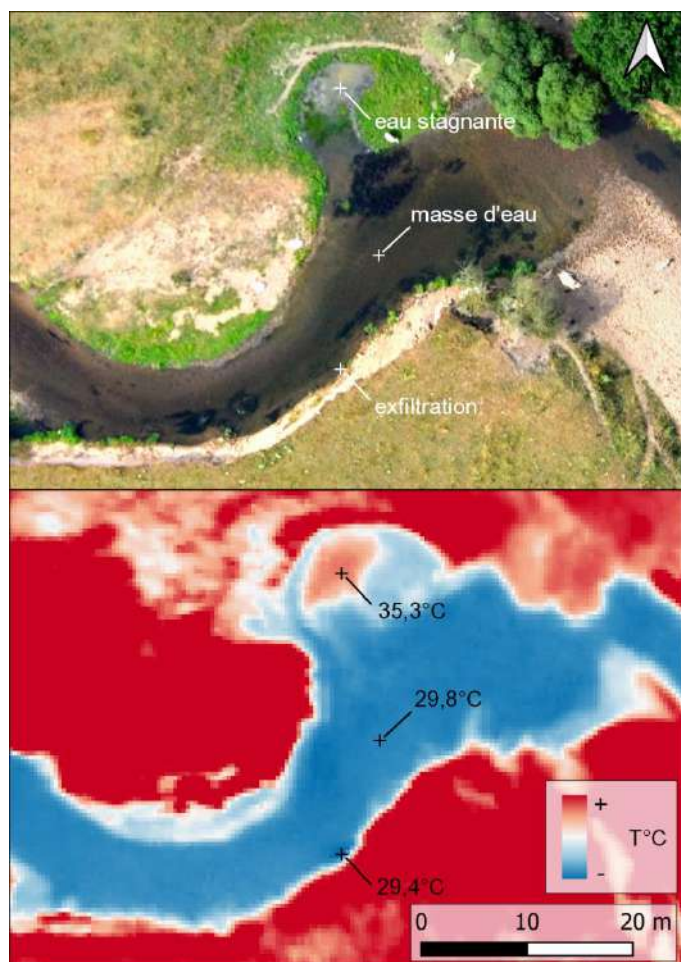


Figure 12. Illustration de la variabilité latérale de température observée sur une rivière de plaine (ici : la Bourbince (71)) lorsque celle-ci n'est pas soumise à l'influence d'ouvrages ou de rectifications majeures. Survol réalisé le 24/07/2019, avec une température de l'air supérieure à 39°C. En haut : orthophoto. En bas : image thermique, le bleu représentant les zones froides et le rouge les zones chaudes.

Ensuite, il faut garder en mémoire que l'information de température recueillie ne concernera que le miroir visible depuis les airs. Les secteurs où la rivière est busée, entourée d'une ripisylve très dense ou encore caractérisée par la présence de plantes aquatiques en surface ne pourront donc pas être imagés, ou seulement partiellement si le plan d'eau libre apparaît çà et là. Le rapport largeur/densité de la ripisylve est ainsi à prendre en compte, puisque le surplomb des arbres pourra laisser entrevoir un linéaire de miroir lorsque le cours d'eau sera suffisamment large. Il sera cependant impossible d'identifier les apports latéraux ou autres échanges en 2 dimensions, et seul le profil longitudinal de température pourra être exploité. Dans le cas où le surplomb est important, l'information obtenue sera très parcellaire et avec une précision moindre (i.e. risque de pollution du signal reçu) (voir par exemple Figure 13).

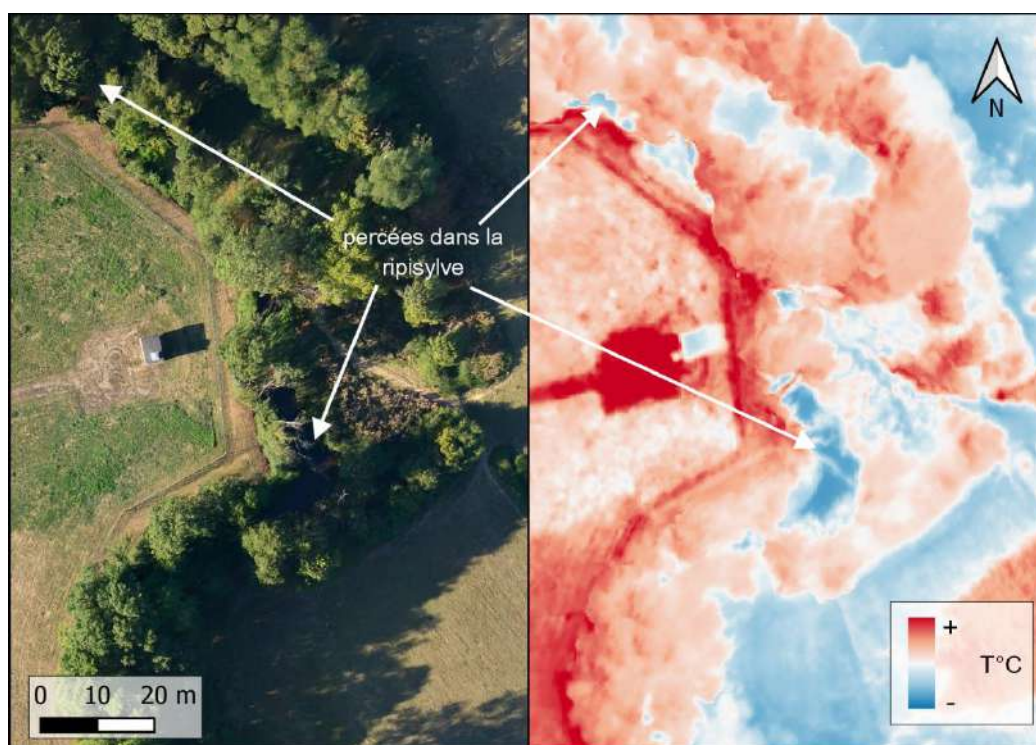


Figure 13. Une ripisylve trop dense sur un petit cours d'eau (ici : la Chalaronne (01)) n'offre que peu d'occasions d'observer le miroir depuis les airs. A gauche : orthophoto. A droite : image thermique, le bleu représentant les zones froides et le rouge les zones chaudes.

Enfin, il existe des contraintes réglementaires et de sécurité qu'il faut garder à l'esprit lors de la planification de ce genre de missions. D'un point de vue réglementaire, certaines zones sont interdites au survol, telles que les zones militaires ou les zones classées (ex. prisons, centrales nucléaires, grandes villes). D'autres sont soumises à des règles très strictes d'altitude minimum ou d'altitude maximum (ex. réserves naturelles, zones protégées par arrêté préfectoral, villes de taille moyenne) ou d'autorisations spéciales (ex. couloirs militaires, CTR des aéroports). Enfin, certaines contraintes supplémentaires peuvent exister le long des frontières (ex. ULM autorisé en France mais interdit en Suisse). Toutes ces contraintes sont connues par les pilotes prestataires de vol, que ce soit en hélicoptère, en ULM ou en drone, et il est possible de les anticiper en s'informant sur le site géoportail des consignes liées à l'aviation civile (www.geoportail.gouv.fr > Territoire et Transports > Transports > [Carte OACI-VFR](#)). D'un point de vue sécurité, les pilotes pourront refuser de travailler sur des secteurs très encaissés ou en gorges à moins de s'établir à une altitude minimale. Les contraintes en termes d'atterrissage et de décollage varient d'un vecteur à un autre et peuvent aussi limiter les possibilités de travailler sur certains secteurs.

2.4.2. Choisir son vecteur

En théorie, n'importe quel véhicule volant (ou vecteur) peut être utilisé pour de la télédétection, à condition qu'il puisse embarquer le ou les capteurs voulus et qu'il soit autorisé à voler. Cependant, des différences existent entre les vecteurs, et le choix de l'un ou de l'autre peut être guidé par plusieurs critères, notamment :

- les contraintes réglementaires : certains secteurs ne peuvent pas être survolés en drone ou en hélicoptère par exemple ;

- le linéaire d'étude : le drone pourra être utilisé sur des tronçons de quelques centaines de mètres tout au plus sans avoir à se poser. Ceci est lié à des questions réglementaires (vol à vue uniquement en France) et logistique (longévité des batteries), tandis que l'avion pourra parcourir de plus longues distances sans faire d'escale ;
- le type de capteur choisi : certains capteurs sont conçus pour être embarqués sur des vecteurs spécifiques, tandis que d'autres pourront s'adapter sur les vecteurs choisis afin de répondre au mieux aux besoins de l'étude (voir section 2.4.3) ;
- lorsque les options disponibles sont limitées, le choix peut être également guidé par les options proposées par le prestataire choisi.

La technologie drone est de plus en plus utilisée dans le domaine des géosciences (Smith et al., 2015), et notamment celui de la géomorphologie fluviale (Piégay et al., 2020). L'intérêt pour le drone est devenu croissant avec le développement de capteurs spécifiques, conçus pour être montés sur des modèles précis. La technologie IRT-a n'échappe pas à cette logique de développement, bien que certains paramètres particuliers soient à prendre en considération (voir section 2.4.3). Le choix du drone est généralement privilégié pour des études sur de courtes distances. Par exemple, Dugdale et al. (2019) ont travaillé sur un site de 1,2 km de long qu'ils ont pu imager en moins de 5 min (résolution des images non précisée, mais $<25 \text{ cm.pixel}^{-1}$) à l'aide d'un DJI Inspire 1 et d'une caméra DJI Zenmuse XT Radiometric (voir le drone, Figure 14-2). Wawrzyniak et al. (2013) ont également utilisé un drone pour survoler des tronçons de 700 à 900 m de long, mais en utilisant cette fois-ci un drone hélicoptère (DRELIO, Delacourt et al., 2009) sur lequel était installée une caméra non-spécifique (Figure 14-4, photo au centre). Ils ont alors obtenu des images à haute résolution (15 cm.pixel^{-1}) lors de vols de 20 à 30 min. En revanche, pour couvrir les 50 km de leur étude en drone, Casas-Mulet et al. (2020) ont dû étaler leurs prises de vues sur 5 jours, avec 49 points de décollage différents et deux drones en vol simultané (même drone et capteur que Dugdale et al. (2019), altitude 120 m, vitesse 15 km.h^{-1} , résolution finale des images autour de 10 cm.pixel^{-1} , Figure 14-2). Un tel protocole augmente les risques d'un changement de température entre le début et la fin de l'acquisition au cours d'une même journée (plusieurs plans de vol par jour entre 11h et 15h), mais surtout des différences de température et de débit d'un jour à l'autre. De plus, les caméras spécifiques dédiées aux drones présentent certains inconvénients que n'ont pas d'autres capteurs (voir section 2.4.3). Lorsque le linéaire d'intérêt dépasse ce qui peut être réalisé en drone en moins de 2h, il est donc préférable de se tourner vers d'autres combinaisons de vecteur/capteur.

D'autres vecteurs permettent de travailler sur des distances relativement courtes et à basse altitude. Par exemple, Eschbach et al. (2017) ont pu couvrir 3,8 km de cours d'eau en environ 50 min à l'aide d'un paramoteur (altitude 250 m, vitesse 30 km.h^{-1} , ex. Figure 14-4). Également en paramoteur, Wawrzyniak et al. (2013) ont obtenu des images sur des tronçons de 0,7 à 1,9 km en 15 à 40 min suivant les sites (résolution entre 14 et 27 cm.pixel^{-1}). Pour pouvoir étendre le linéaire d'étude, certains auteurs ont utilisé des ULM. C'est le cas par exemple de Marteau et al. (Marteau, Michel, et al., 2022) qui ont travaillé sur des linéaires de 15 à 20 km de cours d'eau, à une altitude de 355 à 490 m et une résolution d'image entre 30 et 40 cm.pixel^{-1} . L'ULM permet également de travailler sur de plus grandes distances, par exemple 25 à 35 km (Marteau, Piégay, et al., 2022), >50 km (Wawrzyniak, Piégay, Allemand, et al., 2016) voire >70 km (Marteau, Moatar, et al., s. d.). Les paramètres critiques, au-delà d'une distance de ~50 km, sont à la fois la durée de vie des batteries des appareils et la durée totale de l'acquisition. En effet, avec une vitesse moyenne de 90 km.h^{-1} , il

est possible d'imager 70 à 80 km de cours d'eau en moins de 2h (aller-retour), c'est-à-dire de rester dans une fenêtre temporelle où les changements de température restent modérés (voir section 2.4.4 pour plus d'informations à ce sujet).

L'hélicoptère et l'avion sont également utilisés pour la télédétection IRT-a, notamment dans les pays anglo-saxons. L'avion est fréquemment employé aux États-Unis pour des acquisitions régulières dans le cadre de programmes scientifiques de la NASA. Un instrument nommé MASTER, similaire aux instruments MODIS/ASTER utilisés sur les satellites, est embarqué dans un avion de type King Air B200 (Figure 14-1) ou autre (voir <https://airbornescience.nasa.gov/instrument/MASTER> pour plus de détails). En travaillant à deux altitudes différentes, ce programme fournit des données à une résolution spatiale de 5 et 15 m.pixel⁻¹. Bien que leur résolution soit plus grossière que celle fournie par des drones ou des ULM, ces données sont régulièrement exploitées dans le domaine fluvial (Cherkauer et al., 2005; Handcock et al., 2006; J. E. Kay et al., 2005; Tan & Cherkauer, 2013). D'autres auteurs ont utilisé l'avion pour des études ponctuelles, avec du matériel embarqué non-spécifique (Figure 14-5), mais ces études ne sont pas très nombreuses (Danielescu et al., 2009; e.g. Smikrud et al., 2008). Le vecteur le plus utilisé dans la littérature scientifique est l'hélicoptère (Tableau 3), notamment en Amérique du Nord, que ce soit avec des capteurs spécifiques (Figure 14-3) ou avec des systèmes adaptés (Figure 14-6). De nombreuses études aux États-Unis reposent sur des prestataires privés (ex. Watershed Science Inc.) qui proposent des prestations en routine sur une large partie du territoire ouest du pays. Les premières études remontent au début des années 2000 (Faux et al., 2001; Faux & McIntosh, 2000; Torgersen et al., 2001) et ont été pionnières en la matière à l'échelle internationale. D'autres études au Canada (Dugdale et al., 2013, 2015) ont été menées à large échelle (échelle du bassin versant, ~700 km sur 2 ans) par des équipes de recherche (INRS, Québec). Quelques exemples existent en France également (Dole-Olivier et al., 2019; Wawrzyniak, Piégay, Allemand, et al., 2016; Wawrzyniak et al., 2017), bien que ces études ne pourraient être reconduites comme telles aujourd'hui du fait de l'évolution des contraintes réglementaires.

Enfin, au-delà des contraintes logistiques et réglementaires, le choix de l'un ou l'autre des vecteurs peut également être conditionné par le prix de la prestation et la fréquence d'utilisation. L'utilisation de l'avion nécessite de faire appel à des prestataires particuliers avec de nombreuses contraintes réglementaires et logistiques, ce qui explique leur utilisation limitée en dehors des programmes de recherche spécifiques (ex. programme de la NASA, Figure 14-1). Le travail en hélicoptère est également strictement réglementé, et il n'est plus possible aujourd'hui d'embarquer du matériel qui n'ait pas été validé et certifié par les instances de l'aviation civile européenne (EASA). De plus, le coût horaire d'un vol en hélicoptère (en France) est assez élevé (en moyenne 900€ HT). L'ULM et le paramoteur sont des vecteurs dont l'utilisation est plus flexible et moins onéreuse. Bien qu'ils soient également soumis à des règles de circulation et d'utilisation strictes, il est plus facile d'y embarquer des instruments non-spécifiques, dans le respect des limites de poids et de sécurité imposées par le pilote. Enfin, la réglementation pour l'utilisation de drones a évolué récemment, et il est nécessaire de faire appel à un pilote professionnel, ou de posséder soit même un permis drone, pour pouvoir l'utiliser. De plus, s'ils sont plus accessibles à l'achat que les vecteurs de plus grande envergure, ils restent des outils (notamment les drones multicapteurs) relativement onéreux si l'usage n'en est que ponctuel. Enfin, les drones vendus avec des capteurs spécifiques deviennent de plus en plus abordables à mesure que le marché se développe. En revanche, la qualité des capteurs (et donc

indirectement la qualité des résultats) reste très moyenne pour la plupart des modèles actuellement disponibles.

Tableau 3. Liste (non-exhaustive) des publications scientifiques et des vecteurs utilisés pour des études IRT-a.

	Avion	Hélicoptère	ULM	Paramoteur	Drone non-spécifique	Drone spécifique	Au sol
Cherkauer et al. (2005)	X						
Danielescu et al. (2009)	X						
Handcock et al. (2006)	X						
Kay et al. (2005)	X						
Smikrud et al. (2008)	X						
Tan & Cherkauer (2013)	X						
Burkholder et al. (2008)		X					
Cristea & Burges (2009)		X					
Dole-Olivier et al. (2019)		X					
Dugdale et al. (2013)		X					
Dugdale et al. (2015)		X					
Faux et al. (2001)		X					
Fullerton et al. (2015)		X					
Fullerton et al. (2018)		X					
Lalot et al. (pers. com.)		X					
Loheide & Gorelick (2006)		X					
Madej et al. (2006)		X					
Mejia et al. (2020)		X					
Monk et al. (2013)		X					
Torgersen et al. (2001)		X					
Wawrzyniak et al. (2016)		X	X				
Wawrzyniak et al. (2017)		X	X				
Marteau et al. (2020)			X				
Marteau et al. (2021a)			X				
Marteau et al. (2021b)			X				
Eschbach et al. (2017)				X			
Wawrzyniak et al. (2013)				X	X		
Casas-Mulet et al. (2020)						X	
Dugdale et al. (2019)						X	
Kuhn et al. (2021)						X	
Baker et al. (2019)							X
Cardenas et al. (2008)							X
Deitchman & Loheide (2009)							X
Dunckel et al. (2009)							X
Hare et al. (2015)							X
Tonolla et al. (2010)							X

2.4.3. Choisir son capteur

Comme défini précédemment, le choix du capteur se fait en partie en fonction du vecteur, mais avant tout en fonction des objectifs de l'étude. Il existe différentes caméras sur le marché, dont le prix d'achat varie entre 250 et 80 000€. Les capteurs d'entrée de gamme, tels que les caméras FLIR One (caméra sans écran, avec adaptateur USB pour smartphone), ne pourront pas servir pour un usage scientifique ou opérationnel. Les caméras conçues pour être embarquées sur des drones coûtent entre 2 100 et 4 000€ chez FLIR suivant les modèles (ex. FLIR Vue Pro (Figure 14-2), FLIR Vue Pro R) et jusqu'à 11 200€ chez DJI (Zenmuse XT, aussi manufacturée par FLIR). FLIR propose également des modèles plus performants, plus chers (de 5 500 à 11 000€) et qui ne sont pas nécessairement prévus à l'origine pour de la télédétection (ex. FLIR SC3000, Figure 14-5 ; FLIR

SC660, Figure 14-6, respectivement). Enfin, d'autres modèles à visée industrielle ou de recherche peuvent être utilisés, comme les caméras HD Head et HD Research de chez VarioCAM (ex. Figure 14-4), dont le prix se situe entre 40 000 et 50 000€. En revanche, tous ces modèles ne se valent pas en termes de résolution d'image, de résolution de mesure, ainsi que de précision absolue et relative de cette mesure.

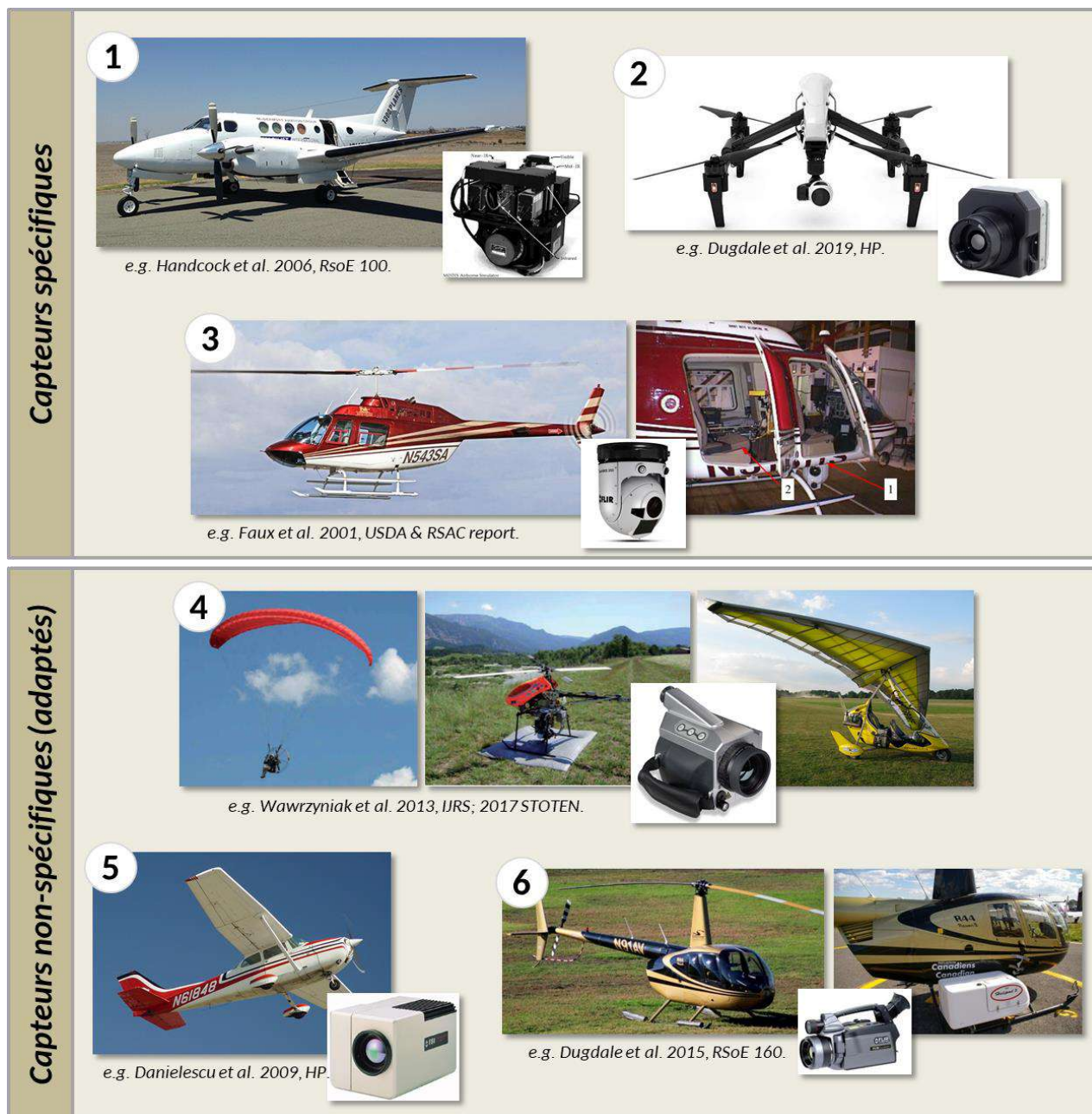


Figure 14. Exemples de capteurs (et vecteurs associés) recensés dans la littérature, différenciant les capteurs spécifiques (en haut) et les capteurs non-spécifiques mais qui ont été adaptés pour un usage en télédétection (en bas).

Tableau 4. Liste et caractéristiques des capteurs utilisés dans les études IRT-a (littérature non-exhaustive)

	Sensor	Image resolution nb pixels	Ground resolution m	Altitude m	Temp. precision °C	Temp. Accuracy °C
Baker et al. (2019)	VarioCam (Infratec)	-	0.5 / 0.1	110 / 51 (g)	Vary with angle of view	
Burkholder et al. (2008)	-§	-	0.9	-	0.5	-
Cardenas et al. (2008)	P65 (FLIR)	320 × 240	-	~2 (g)	-	2%*
Casas-Mulet et al. (2020), Kuhn et al. (2021)	Zenmuse XT (DJI)	640 × 512	0.23	120	-	-
Cherkauer et al. (2005)	MASTER	-	15	6000	0.5-1.6	0.8-5.5*
Cherkauer et al. (2005)	MASTER	-	5	2000	0.4-1.4	1.0-1.9*
Cristea & Burges (2009)	-§	-	1	-	-	0.5*
Danielescu et al. (2009)	SC-3000 (FLIR)	-	-	900	-	0.23**
Deitchman & Loheide (2009)	A320 (FLIR)	320 × 240	-	~2 (g)	-	-
Dole-Olivier et al. (2019)	VarioCAM hr research (Infratec)	640 × 480	0.6	400	0.3	0.9**
Dugdale et al. (2013)	SC660 (FLIR)	640 × 480	0.19	300	0.61	0.21**
Dugdale et al. (2015)	SC660 (FLIR)	640 × 480	0.14 - 0.49	221 - 775	0.45	-
Dugdale et al. (2019)	Zenmuse XT (DJI)	336 × 256	-	100	-	2.61**
Dunckel et al. (2009)	ThermaCAM SC640 (FLIR)	640 × 480	<0.01	2.5 (g)	-	1*
Dzara et al. (2019)	SC6000 (FLIR)§	640 × 480	0.6	610	-	0.5*
Eschbach et al. (2017)	FLIR B425 (FLIR)	360 × 240	0.35	250	-	-
Faux et al. (2001)	TH1000 (Agema thermovision)	-	0.18-0.54	305-914	-	-
Fullerton et al. (2015)	-§	-	Varying	Varying	0.05-3.04	0.10-2.65**
Fullerton et al. (2018)	-§	-	Varying	Varying	0.05-3.04	0.10-2.65**
George et al. (2016)	Wildfire Airborne Sensor Platform (WASP)	-	1	-	-	0.61
Handcock et al. (2006)	MASTER	-	15-5	6000/2000	0.3	1.2*
Hare et al. (2015)	T620bx & T640bx	640 × 480	-	~2 (g)	-	2*
Hillyard & Keeley 2012	FireMapper 2.0	320 × 240	0.95	300-400	-	-
Kay et al. (2005)	MASTER	-	15	6000	0.02-1.34	0.02-1.84*
Kay et al. (2005)	MASTER	-	5	2000	0.00-0.17	0.02-1.12*
Lalot et al. (pers. com.)	VarioCAM HD research 600 (Infratec)	640 × 480	1	300-400	-	0.3*
Loheide & Gorelick (2006)	S65 (FLIR)	320 × 240	0.16-0.21	120-160	-	0.55**
Madej et al. (2006)	-§	-	-	425	-	0.5*
Marteau et al. (2020)	VarioCAM HD research 600 (Infratec)	640 × 480	0.5	380	0.3	0.3**
Marteau et al. (2022a)	VarioCAM HD research 600 (Infratec)	640 × 480	0.30-0.40	355-489	0.25-0.57	0.27*
Marteau et al. (2022b)	VarioCAM HD research 600 (Infratec)	640 × 480	0.3	299-422	0.3	0.27*
Mejia et al. (2020)	-	-	0.8	1372	-	0.5*
Monk et al. (2013)	SC3000 LWIR (FLIR)§	-	0.44	400	0.1	0.2**
O'Sullivan et al. (2021)	Zenmuse XT2 (Tau 2) (FLIR)	640 × 512	0.07	-	-	-
Smikrud et al. (2008)	ThermaCam S40 (FLIR)	320 × 240	1.88	1414	-	0.8*
Tan & Cherkauer (2013)	MASTER	-	5	2000	0.015-1.125	-0.17 - 0.29**
Tan & Cherkauer (2013)	MASTER	-	15	6000	0.02 - 1.84	-0.63 - 1.34**
Tonolla et al. (2010)	TH 3102 MR (NEC)	255 × 207	-	- (g)	-	0.5*
Tonolla et al. (2012)	VarioCam HR Head (InfraTec)	640 × 480	0.25	300	0.4	0.2*
Torgersen et al. (2001)	Thermovision 1000 (FLIR)	600 × 400	0.2-0.4	-	-	0.5*
Vatland et al. (2015)	ThermaCam SC640 (FLIR)	640 × 480	1	1524-1219	-	0.43**
Wawrzyniak et al. (2013) [1]	VarioCAM hr head (Infratec)	384 × 288	0.15-0.16	-	0.6	0.7*
Wawrzyniak et al. (2013) [2]	VarioCAM hr research (Infratec)	640 × 480	0.14-0.27	-	0.6	0.7*
Wawrzyniak et al. (2016, 2017) [1]	Thermo Tracer TH7800 (NEC)	320 × 240	1.5	-	-	0.4**
Wawrzyniak et al. (2016, 2017) [2]	VarioCAM hr head (Infratec)	384 × 288	0.7	-	-	1.6**
Wawrzyniak et al. (2016, 2017) [3]	VarioCAM hr research (Infratec)	640 × 480	0.6	400	0.3	0.9**
Watershed Science Inc. (2006)	FireMapper 2.0	320 × 240	0.86	335	0.2	0.66*
Wirth et al. (2012)	ThermoVision A320G (FLIR)	320 × 240	1.7	1300	-	0.2**

* Testé

** Tel que fourni par le constructeur

§ Données produites par Watershed Sciences LLC

2.4.4. Choisir la période et le moment de la mission

La stratégie menant au choix de la période idéale pour la cartographie thermique dépend essentiellement des objectifs de l'étude. Si l'objectif est avant tout de comprendre le fonctionnement du point de vue physique, ou hydromorphologique, on privilégiera les périodes où les contrastes thermiques seront les plus forts. Si l'étude se rapporte à des conditions hydrologiques/météorologiques particulières, alors le choix de la période sera guidé par ces contraintes physiques. Enfin, si l'objet de l'étude est de faire le lien avec des aspects biologiques ou

écologiques, le choix de la période sera alors contraint par les exigences spécifiques des espèces ou guildes d'espèces cibles, voire au moment particulier du cycle biologique d'intérêt.

2.4.4.1. Optimisation des contrastes

2.4.4.1.1. Choix de la saison

Il existe deux fenêtres saisonnières de prédilection pour mener ce genre de campagne. Le choix de la saison repose sur le même principe de base : optimiser le contraste de températures entre les différentes ambiances thermiques de la masse d'eau. Ce principe est notamment basé sur le fait que la température de l'eau des nappes (qu'elles soient alluviales ou phréatiques) est relativement constante à l'échelle de la France (entre 11 et 15°C dans la plupart de nos régions françaises, Martin (2013)) et au cours de l'année, contrairement à la température des cours d'eau qui suit les cycles saisonniers.

La majorité des utilisateurs privilégie la période estivale, lorsque les débits sont faibles (idéalement à l'étiage) et que la température de l'eau est élevée ; le contraste thermique entre la masse d'eau relativement chaude (~18 à 30°C) et les apports d'eau froide (~13°C) est alors à son maximum. Il est alors plus aisé d'identifier et de caractériser les apports (hyporhéiques, phréatiques, tributaires, etc.) qui ponctuent les rivières, ce qui est généralement l'objectif principal de l'utilisation de l'outil.

D'autres utilisateurs, moins nombreux, réalisent leurs campagnes de mesure en hiver, lorsque la température de la masse d'eau est la plus faible (attention à éviter les éventuels épisodes de glace). En hiver, les apports phréatiques apparaissent alors comme plus chauds (~13°C) au sein d'une masse d'eau froide (~2 à 10°C). Une campagne de mesure hivernale a l'avantage de bénéficier d'une végétation sans feuilles et donc d'une meilleure visibilité du miroir depuis les airs. En revanche, il est généralement plus difficile d'obtenir des conditions de débits suffisamment bas pour que les apports ne soient pas dilués dans la masse d'eau. Cependant, tout est question de régime hydrologique. Les rivières alpines qui présentent des hautes eaux plutôt en été et des basses eaux en hiver peuvent alors être imagées en hiver ou à la toute fin de l'été.

2.4.4.1.2. Moment optimal au cours de la journée

Le moment optimal au cours de la journée pour réaliser une acquisition est également en partie guidé par la nécessité d'optimiser les contrastes thermiques de la masse d'eau. Lors d'une campagne estivale, il faudra donc privilégier l'acquisition des données au moment où la température de l'eau atteint son maximum journalier, généralement entre 16h et 18h suivant les régions, l'hydrologie de la rivière et les conditions météorologiques le jour du vol. En plus de représenter le moment où les contrastes sont importants, ce créneau horaire permet d'assurer la stabilité des valeurs de température et ce même si le survol dure plus d'1h. En effet, la température de l'eau varie peu entre le moment où elle termine d'augmenter et celui où elle amorce sa diminution.

En hiver, la mission sera plutôt réalisée tôt le matin, avant que les rayonnements solaires n'aient eu le temps de chauffer la masse d'eau et l'atmosphère, soit généralement avant 9h (voir par exemple Eschbach et al., 2017).

Enfin, l'heure de survol peut être modulée lorsque d'autres paramètres apparaissent plus importants que le contraste thermique. Par exemple, il est acquis qu'à la suite d'un épisode très chaud, les résurgences karstiques nettement plus froides et généralement assez marquées seront identifiables

quel que soit le moment de la journée. Il est alors possible d'aménager le plan de vol pour, par exemple, privilégier les mesures au zénith et ainsi limiter les ombres portées, éviter la présence de nombreux baigneurs ou kayakistes sur les secteurs fréquentés, faciliter l'obtention des autorisations nécessaires sur les secteurs soumis à réglementation stricte, etc.

La démarche de suivi temporel, testée par Wawrzyniak et al. (2013), a permis de mieux appréhender ces dynamiques journalières et leur importance lors d'une campagne IRT-a. Ici, l'exemple présenté est celui de la Drôme, où une acquisition IRT-a a été réalisée sur une journée à 4 moments différents : 10:00, 13:00, 16:00 et 18:30. Ils ont alors mis en évidence la stabilité thermique des chenaux alimentés par des eaux souterraines (« ES », Figure 15) ainsi que celle des chenaux alluviaux (« AL »), qui contrastent avec la variabilité du chenal principal et des chenaux secondaires dont la température moyenne augmente de 5 à 6°C au cours de la journée. Enfin, les mares déconnectées peuvent atteindre des températures supérieures à 30°C au moment le plus chaud de la journée (« M », 16:00). Le delta de température à l'échelle d'une tresse peut donc atteindre près de 20°C entre les secteurs les plus froids et ceux les plus chauds.

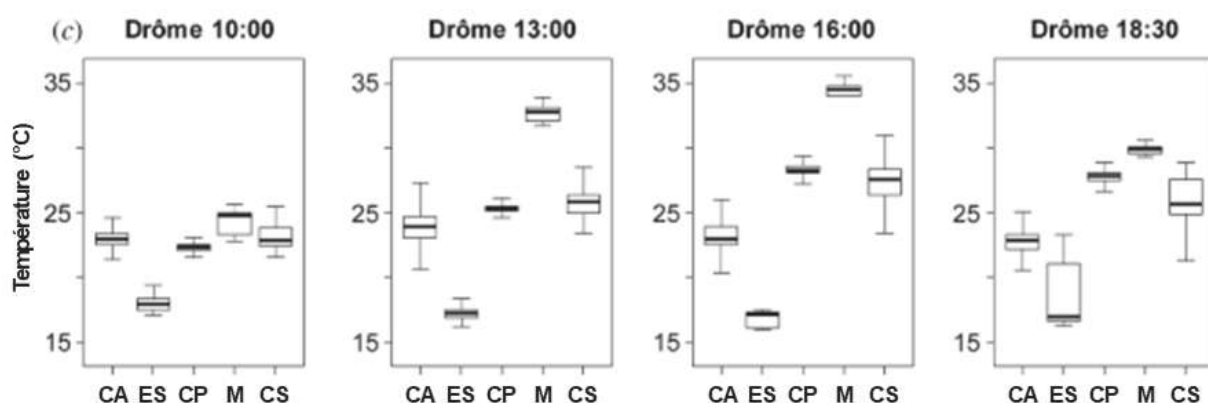


Figure 15. Evolution temporelle de la température des différentes structures géomorphologiques identifiées sur la Drôme (CA = chenaux alluviaux, ES = chenaux alimentés par des eaux souterraines, CP = chenal principal, M = mares, CS = chenaux secondaires). (Source : Wawrzyniak et al. (2013)).

2.4.4.1. Stratégie liée à la biologie

La stratégie de choix de la saison et du moment de la journée pour l'étude des refuges thermiques en rivière est similaire à la stratégie présentée précédemment, puisque ces refuges sont utilisés par les espèces thermosensibles (notamment les poissons) lors des épisodes les estivaux les plus chauds et/ou les épisodes hivernaux les plus froids. Ainsi, la plupart des études en lien avec la biologie se sont appliquées à recenser les refuges thermiques en lien avec une espèce cible sans chercher à caler la période d'étude sur un épisode particulier du cycle biologique de l'espèce en question (Dugdale et al., 2013; George et al., 2016; Hillyard & Keeley, 2012).

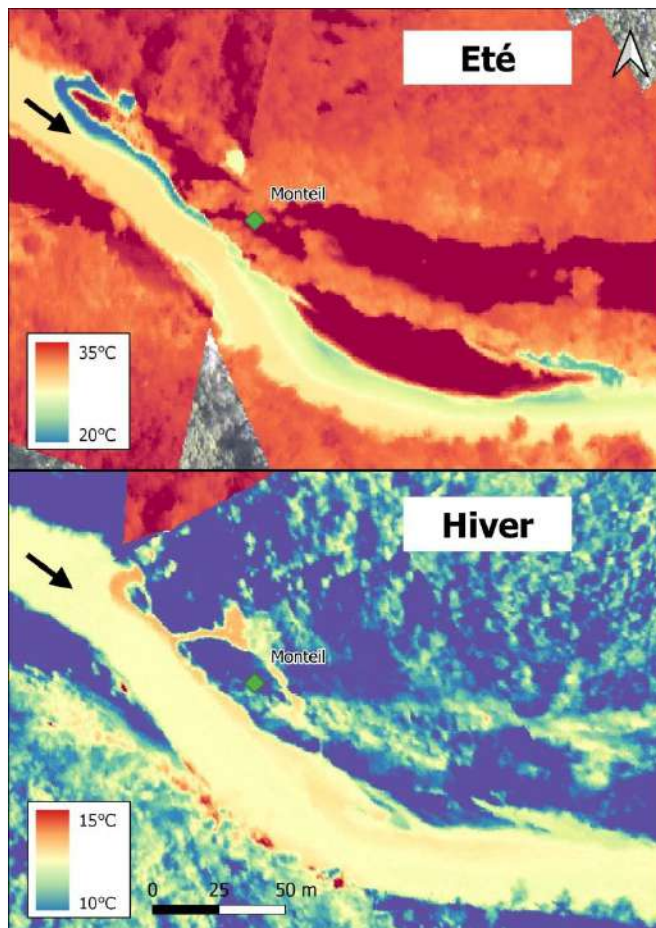
D'autres études ont été menées sur des périodes données (ici, en fonction des débits) avec pour objectif de regarder l'ensemble des espèces de poissons à l'échelle de la plaine alluviale, et non de se focaliser sur une ou quelques espèces spécifiques (Tonolla et al., 2012). Enfin, quelques exemples existent où l'IRT-a a été utilisé pour cibler une phase spécifique du cycle de vie des espèces, mais ces cas d'études restent à l'heure actuelle assez rares. On peut citer par exemple la modélisation des zones de frai sur les rivières d'Alaska (Wirth et al., 2012), ou l'observation de phénomènes

particuliers de thermorégulation et de répartition des individus suivant l'espèce et l'âge au sein de refuges thermiques (O'Sullivan et al., 2021).

ENCART 1. DETECTION DES ANOMALIES THERMIQUES EN ETE ET EN HIVER

En été, les apports liés à des échanges hyporhéiques ou phréatiques apparaissent comme étant plus froids que la masse d'eau. Ici, des « taches » bleues apparaissent alors à la surface de la Cèze et permettent de bien détecter des résurgences karstiques.

En revanche, c'est le phénomène inverse qui est observable en hiver ; des « taches » rouges/oranges apparaissent au milieu d'une masse d'eau froide lorsque les résurgences plus « chaudes » atteignent la surface. (Figure : V. Wawrzyniak & J. Ré-Bahuaud, 2014).



3. COMPRENDRE ET ANALYSER DES DONNEES DE TEMPERATURE IRT-A

Pour pouvoir appréhender l'intérêt et les limites de l'outil IRT-a, et évaluer son utilisation potentielle sur un site ou un contexte donné, il est nécessaire de bien saisir la portée des informations qui sont produites. Cette section illustre différentes utilisations qui ont été faites des cartographies thermiques en contexte fluvial dans le cadre d'études menées principalement au sein du bassin Rhône-Méditerranée, mais pas uniquement. Nous proposons tout d'abord un focus sur ce qu'est et ce que n'est pas une donnée de température IRT-a.

3.1.Des données de température IRT-a : à quoi ça ressemble ?

Les résultats qui sont présentés dans les exemples à suivre sont tous issus d'une chaîne de traitement plus ou moins identique, permettant de passer d'une image « brute » de valeurs de radiance (ou parfois de température non-calibrée) à une mosaïque représentant une carte des températures réelles. L'image « brute » est en fait une image d'une zone donnée découpée en tout petits carrés de quelques cm², que l'on appelle pixels, et qui disposent chacun d'une valeur de radiance (ou de température brute). La chaîne de traitement des images dites « raster » cherche donc à convertir ces valeurs de radiance en température, à valider/corriger ces valeurs selon différentes méthodes, puis à assembler l'ensemble des images disponibles pour obtenir une mosaïque, ou orthophoto thermique. Enfin, des post-traitements semi-automatiques sont possibles pour passer d'une carte globale de températures à des éléments géographiques plus facilement interprétables que ce soit des anomalies thermiques ou des tronçons thermiquement homogènes. Plusieurs étapes sont nécessaires, et concernent notamment (Figure 16) :

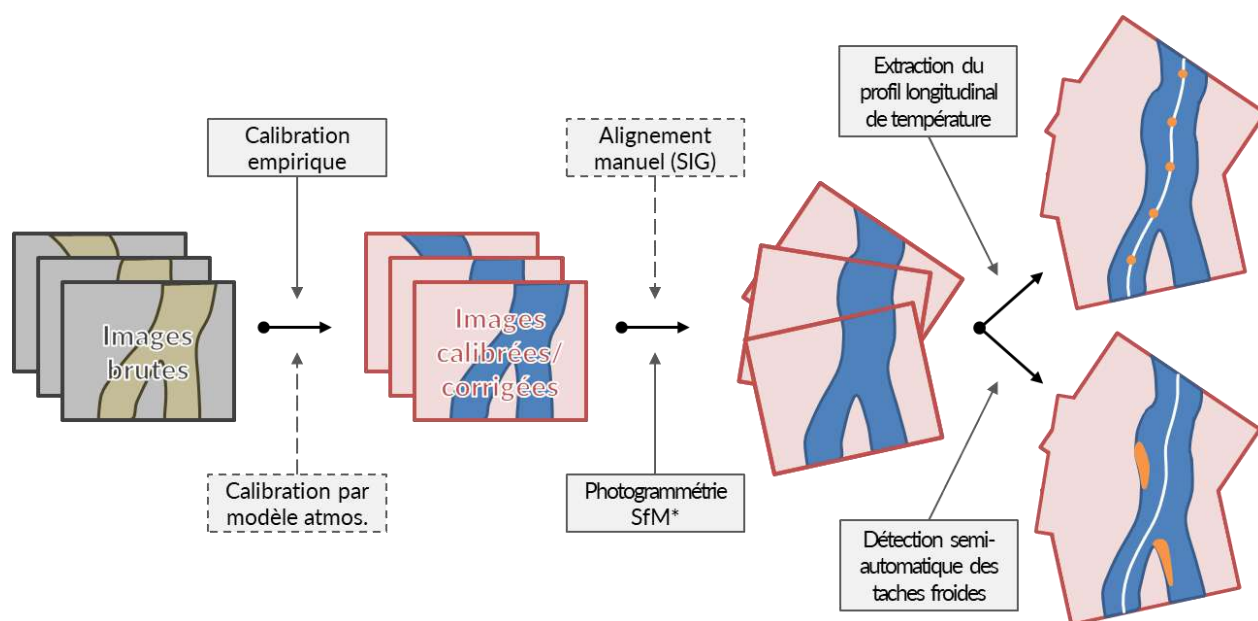


Figure 16. Chaîne de traitement des images infrarouges pour la création d'une mosaïque thermique et l'extraction des deux produits principaux : le profil longitudinal de température et la détection des anomalies thermiques (ou taches froides).

- La correction/calibration des images (voir la partie 2.3 *Validation des données*) ;
- L'alignement des images les unes par rapport aux autres et, dans le même temps, au sein d'un référentiel commun permettant de les géoréférencer dans l'espace :
 - cette étape est traditionnellement réalisée « manuellement », en s'appuyant sur des orthophotos IGN ou des images satellites à haute résolution et en recherchant des objets communs entre la lecture qui peut être faite des images thermiques et le paysage visible sur les orthophotos ;
 - mais elle peut également être réalisée à l'aide d'un logiciel de photogrammétrie SfM⁴, qui utilise des algorithmes de détection d'objets en commun sur les images successives pour les aligner et proposer une reconstruction en 3D des objets imagés. Cette routine, une fois maîtrisée, permet d'accélérer considérablement le post-traitement des images. Elle nécessite d'inclure quelques points de calage, soit obtenus sur le terrain à l'aide d'un GPS, soit extraits des mêmes orthophotos IGN ou images satellites que précédemment.
- Le chargement de la mosaïque ainsi obtenue dans un logiciel de SIG (ou autre visionneur d'images) pour une lecture visuelle des données. En jouant sur le dégradé de couleurs (choix des couleurs, histogramme représenté, etc.), la carte de température révèle de nombreux phénomènes à différentes échelles (Encart 2).
- Le traitement numérique de la mosaïque ainsi obtenue, afin d'en extraire deux types d'informations principales : un profil longitudinal de température, et une carte des « anomalies » thermiques. Des logiciels de SIG⁵ sont ensuite utilisés pour visualiser et analyser les résultats. Ces deux catégories sont explicitées ci-dessous et schématisées en Figure 17.

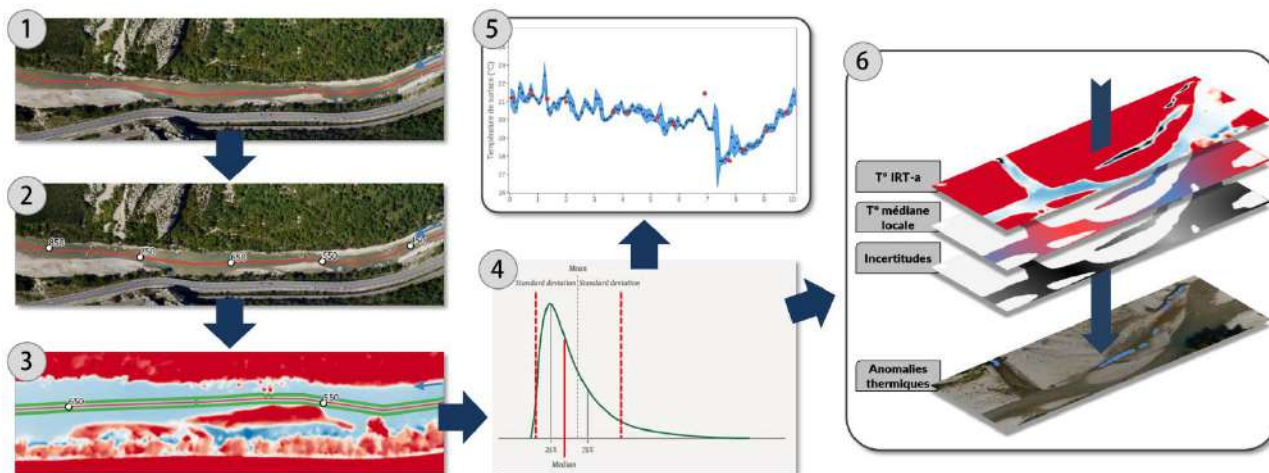


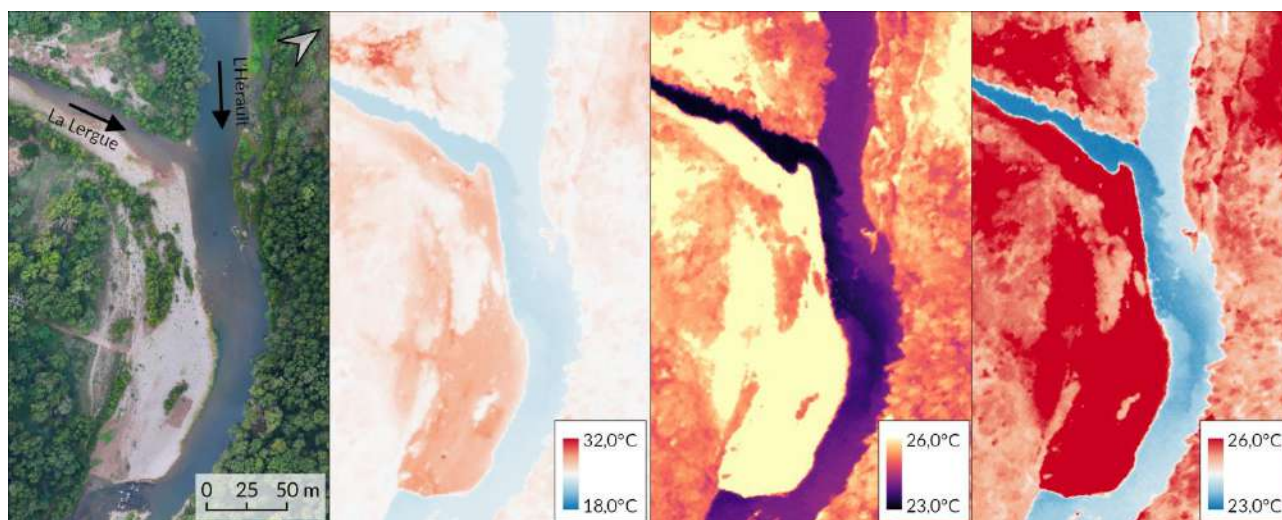
Figure 17. Schématisation de la chaîne de traitement des images IRT-a pour l'obtention des deux produits principaux : le profil longitudinal de température et la carte des anomalies thermiques. Pour la description des étapes, se référer au texte. Etapes : 1) digitalisation du centre du chenal ; 2) ajout de points régulièrement espacés le long de la ligne centrale ; 3) création d'une zone tampon le long de la ligne centrale et découpage selon les points ; 4) extraction des valeurs de température, et notamment la médiane et l'écart-type ; 5) production du profil longitudinal de température (incluant l'écart-type comme évaluation des incertitudes) et 6) utilisation des extractions (médiane et écart-type) pour identifier les anomalies thermiques.

⁴ *Structure-from-Motion* : englobe l'ensemble des outils numériques et algorithmiques qui permettent la reconstruction en 3D d'objets à partir d'images se chevauchant les unes les autres, c'est-à-dire obtenues par le mouvement de l'appareil.

⁵ SIG : Système d'Information Géographique. Exemples de logiciels : QGIS, SAGA GIS, ArcGIS, etc.

ENCART 2. LES IMAGES THERMIQUES COMME SUPPORT VISUEL

Les images thermiques sont des supports visuels qu'il est relativement simple d'explorer à l'aide de logiciels libres, notamment des logiciels de SIG (ici : QGIS). Cette approche qualitative donne à voir les données IRT-a de façon accessible et interprétable, avec la possibilité d'observer l'orthophoto « classique » comme support confirmatoire. Du plus, comme illustré ci-dessous, il est facile de modifier la partie de l'histogramme que l'on souhaite représenter, ainsi que de jouer sur le dégradé de couleurs souhaité, pour observer au mieux certains phénomènes particuliers. Illustration ici avec la confluence de la Lergue avec l'Hérault (34). Le panache de température plus froide apportée par la Lergue est d'autant plus visible que l'histogramme sélectionné est réduit et centré autour de la température observée (Crédit : B. Marteau, 2021).



3.1.1. Extraction du profil longitudinal de température

Les étapes initiales qui permettent d'obtenir le profil de température et la carte des anomalies thermiques sont identiques et sont plus facilement réalisées à l'aide d'un logiciel de SIG (Figure 17).

- 1) Il s'agit tout d'abord de digitaliser la ligne centrale du chenal en eau (il est possible de s'appuyer sur une base de données existante pour simplifier cette tâche) ;
- 2) Ensuite, des points sont ajoutés le long de cette ligne centrale à intervalles réguliers, l'espacement des points dépendant des objectifs de l'étude et de la largeur moyenne de la rivière. Cet espacement varie généralement entre 10 (images issues de drone, très haute résolution) et 250 m (moyenne ~100 m) ;
- 3) Un tampon autour de la ligne centrale est ajouté, lui-même découpé autour des points équidistants, afin d'extraire les informations de température de l'eau par sous-section de longueur égale. Ici aussi, le choix de la largeur du tampon dépend de la largeur du chenal et de la résolution au sol des images. Il faut considérer, dans la mesure du possible, l'inclusion d'au moins 6 pixels latéralement (3 de part et d'autre de la ligne centrale). ;
- 4) Pour chaque élément régulièrement espacé, des statistiques de température sont extraites de l'orthophoto thermique, notamment la température médiane et l'écart-type. De manière générale, la valeur médiane est préférée à la moyenne lors de l'analyse de rasters de température car la moyenne est plus sensible à la présence de pixels aberrants ou à des

- erreurs de digitalisation (bancs mal découpés, présence d'artefacts comme des kayaks, nageurs, ponts, etc.) ;
- 5) Les valeurs de température médiane ainsi extraites dans un référentiel linéaire permettent de construire le profil longitudinal de température.

3.1.2. Extraction des « anomalies thermiques »

L'étape (6) de la Figure 17 se fait en exploitant les résultats des étapes précédentes : une couche raster des températures médianes locales est générée à l'aide d'outils de spatialisation (ex. krigeage), à laquelle est alors comparée une couche raster de températures de surface IRT-a. Il est également possible d'intégrer dans la procédure une couche raster d'incertitude liée à la mesure, qui peut être construite de manière plus ou moins complexe suivant les besoins et les informations disponibles. Celle-ci peut servir de paramètre « seuil » pour définir la valeur au-delà de laquelle une anomalie thermique peut être considérée comme « réelle » ou plausible. De nombreuses études ont utilisé une valeur seuil fixe, allant de 0,5 à 3°C (Dugdale et al., 2013), parfois choisie de manière arbitraire (Ebersole et al., 2001; Monk et al., 2013; Ozaki, 1988; Wawrzyniak, Piégay, Allemand, et al., 2016) ou bien en lien avec le *preferendum* thermique de certaines espèces piscicoles (e.g. Dugdale et al., 2013). D'autres encore ont utilisé une approche géostatistique pour définir une valeur-seuil qui puisse être variable, et construite sur les sources d'erreurs identifiées dans la chaîne de traitement (Marteau, Michel, et al., 2022). Quelle que soit la méthode utilisée, le seuillage est important à considérer car il définira l'interprétation qui sera faite des anomalies thermiques ainsi détectées.

3.2. Approches géographiques

La nature même de l'outil IRT-a permet de cartographier les températures de surface. L'analyse spatiale de la thermie des cours d'eau s'inscrit dans ce cadre. On peut même distinguer plusieurs approches géographiques dans l'analyse des données de température IRT-a appliquée aux rivières, en différenciant par exemple les approches bidimensionnelles qui se focalisent sur les habitats thermiques des approches longitudinales, qui sont mises en œuvre pour identifier l'origine potentielle de l'eau ou les facteurs à l'origine de réchauffement ou de refroidissement de la masse d'eau. A cela s'ajoute la possibilité de multiplier les suivis au cours du temps pour comparer les situations thermiques de la rivière et mieux rendre compte des situations observées. Ce cas de figure reste relativement contraignant à cause de la nature et du coût de la méthode (il existe cependant quelques exemples dans la littérature). Chacune de ces approches est détaillée et illustrée dans les sections suivantes.

3.2.1. La cartographie 2D des habitats thermiques

Le développement premier de l'outil IRT et son intérêt grandissant dans la littérature scientifique s'est construit autour de son atout principal : pouvoir détecter des « anomalies thermiques », c'est-à-dire des différences de température au sein de la masse d'eau. Les premiers usages sont observés dans le domaine côtier ; ils visaient notamment à quantifier les apports d'eau douce le long des côtes aquitaines (Lévêque et al., 1972). L'usage de l'IRT, souvent satellitaire, est désormais courant dans la détection de pollutions thermiques issues des centrales nucléaires (Chen et al., 2014; Ling et al., 2017; ex. Zoran et al., 2012). Mais à l'échelle plus fine, l'IRT-a permet de détecter des différences de température <1°C et donc de déceler des poches d'eau froide (ou chaude), même celles de taille relativement limitée (suivant la résolution des images, généralement <1m). D'une

manière générale, la présence d'une diversité d'ambiances thermiques au sein d'une rivière est un signe d'un bon fonctionnement, qui retranscrit des échanges significatifs entre la nappe et les écoulements de surface. C'est notamment le cas des rivières en tresses, pour lesquels les échanges de la rivière avec la nappe et les versants peuvent être importants (Arscott et al., 2001) et qui se reflète sur la diversité des températures (Wawrzyniak et al., 2013). Etudier la distribution, la diversité et les caractéristiques de ces poches d'eau froide estivales permet d'identifier l'état de fonctionnement des hydrosystèmes (Marteau, Michel, et al., 2022). De plus, lorsque ces poches sont accessibles et disponibles en période critique (par exemple, lors des épisodes chauds d'été), elles représentent des refuges thermiques potentiels pour de nombreuses espèces piscicoles thermosensibles, notamment les salmonidés. De fait, de nombreuses études basées sur l'IRT-a ont été effectuées sur le continent américain afin de caractériser la présence/absence de ces refuges thermiques sur des cours d'eau salmonicoles et évaluer ainsi leur état fonctionnel (Dugdale et al., 2015; Faux et al., 2001; Fullerton et al., 2018).

3.2.1.1. Appréhender le fonctionnement des hydrosystèmes

Exemple des rivières en tresses

L'étude du comportement thermique des rivières en tresses sur le piedmont alpin a permis de mieux appréhender leur fonctionnement et d'identifier les facteurs qui influencent l'hétérogénéité spatiale qui les caractérise (Wawrzyniak et al., 2013). Les 9 rivières étudiées dans le bassin du Rhône ont ainsi démontré la variabilité spatiale et temporelle des habitats thermiques sur ces systèmes particuliers, avec deux grandes catégories de rivières : celles qui sont d'origine proglaciaire (c'est-à-dire qui sont soumises à la fonte des glaciers, voire des neiges) et celles qui ne le sont pas. En effet, leurs régimes thermiques sont différents, puisque la température des rivières proglaciaires est avant tout contrôlée par les fontes ; elle est donc généralement plus faible et moins sensible aux conditions atmosphériques durant la période estivale. A contrario, la température des rivières non-proglaciaires est davantage contrôlée par les conditions météorologiques durant l'été (Figure 18a). Les auteurs ont également démontré que les rivières non-proglaciaires présentent une plus grande diversité thermique en période estivale que les rivières proglaciaires. Cela s'explique notamment par leur positionnement plus éloigné des têtes de bassin (Arscott et al., 2001) et la plus grande activité hyporhéique (diversité verticale) et phréatique (diversité latérale) retrouvée sur ces rivières (Figure 18b).

Grâce aux propriétés d'échantillonnage quasi-exhaustif que permet l'IRT-a (les deux facteurs limitant l'exhaustivité spatiale étant la densité de la ripisylve et la résolution des images), Wawrzyniak et al. (2013) ont permis d'avancer sur la compréhension du fonctionnement thermique des rivières en tresses, de faire le lien avec les paramètres géomorphologiques de ces systèmes particuliers (Belletti et al., 2013) et d'aboutir à une meilleure appréciation des enjeux et menaces les concernant (Terrier et al., 2019).

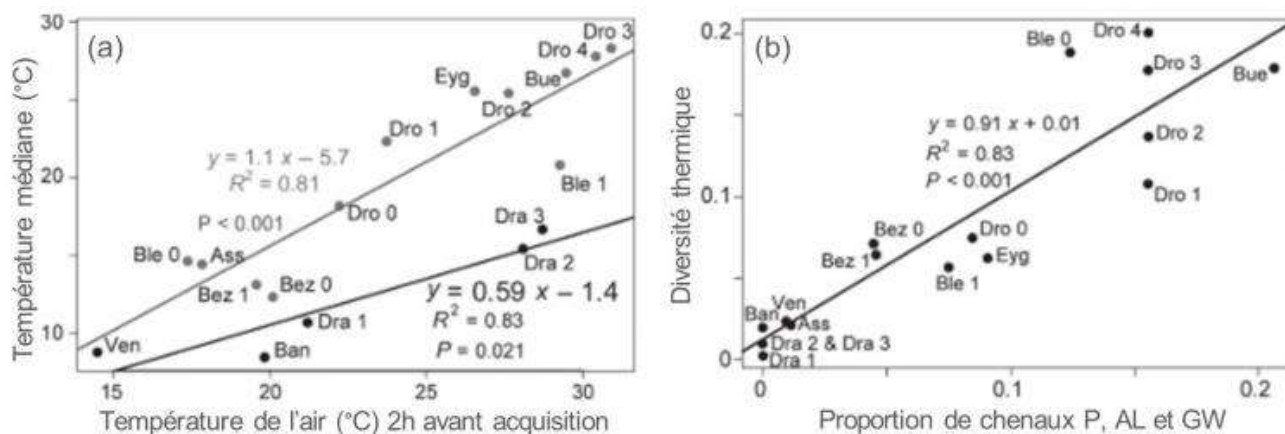


Figure 18. (a) Les rivières proglaciaires et non-proglaciaires répondent différemment à la température de l'air (noir : rivières proglaciaires ; gris = rivières non- proglaciaires). (b) La diversité des habitats thermiques est fortement corrélée à la présence de structures géomorphologiques particulières. Types de chenaux : P = mares (*ponds*), AL = chenaux alluviaux, GW = chenaux phréatiques (*groundwater-fed*) (source : Wawrzyniak et al. (2013)).

Exemple du fleuve Rhône

Le survol de plusieurs sections court-circuitées du Rhône a aussi permis d'établir la dynamique thermique des annexes, et notamment des casiers Girardon⁶. A l'étiage, les casiers sont généralement stagnants et la température de surface y est alors plus élevée que le Rhône court-circuité (RCC) lui-même (Figure 19). En revanche, certains apparaissent plus froids que le Rhône (ici notamment en rive gauche), car ils sont alimentés par des contre-canaux, eux-mêmes alimentés par les nappes en quantité suffisamment importante pour jouer un rôle de potentiel refuge thermique (Wawrzyniak, Piégay, & Graillot, 2016). Au regard de ces observations, et de la morphologie de ces structures, les auteurs ont pu proposer des actions pour favoriser la reconnexion des casiers Girardon aux contre-canaux, lorsque cela est possible, afin d'offrir davantage de refuges thermiques aux espèces qui peuplent le Rhône.

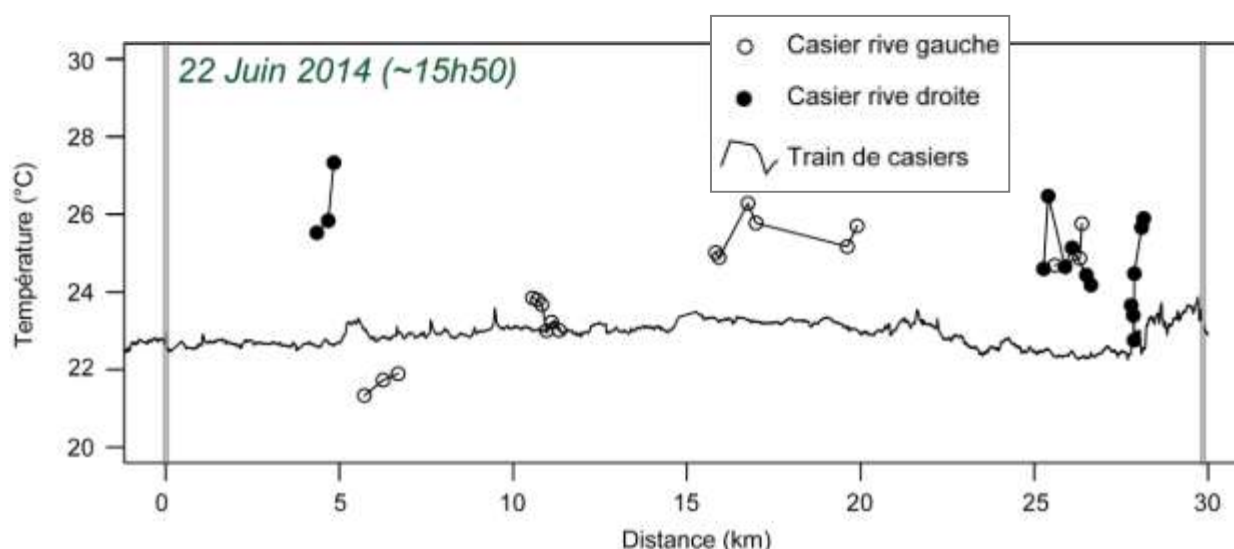


Figure 19. Température des trains de casiers Girardon le long du RCC de Péage-de-Roussillon.

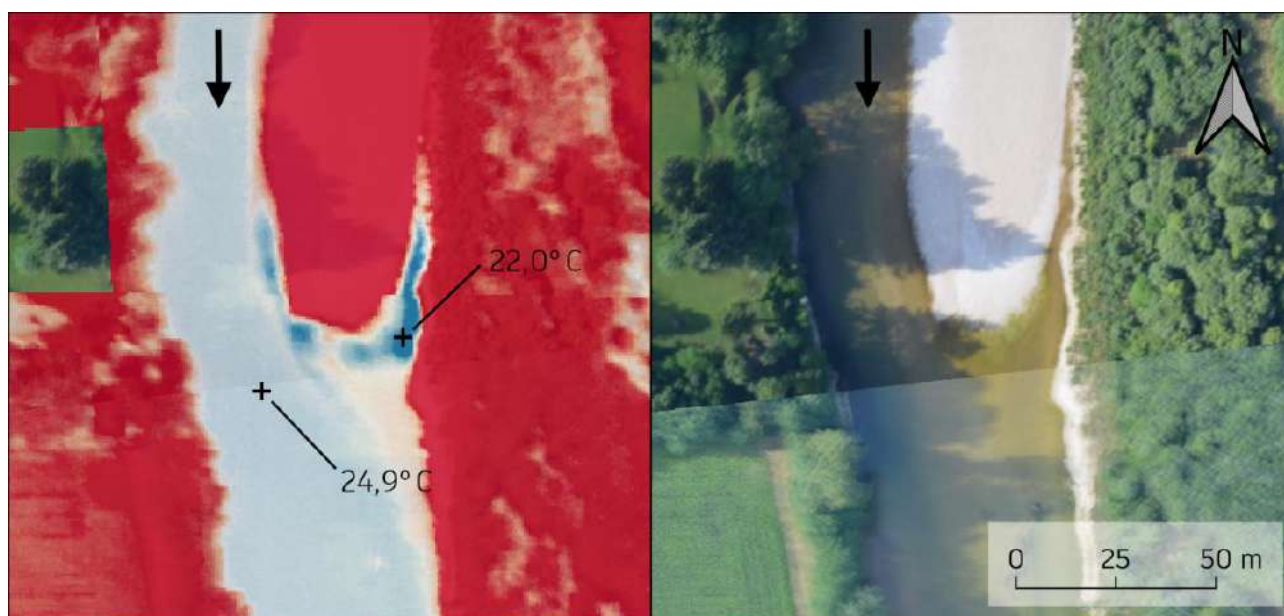
⁶ Casiers Girardon : structures rectangulaires délimitées par des digues submersibles, construites dans le lit mineur du Rhône au XIX^e siècle sous l'égide de l'ingénieur Girardon, afin de faciliter la navigabilité du fleuve.

3.2.1.2. Déterminer et expliquer la distribution des refuges thermiques

Des études ont été réalisées sur différents types de rivières pour essayer de comprendre la distribution des refuges thermiques à l'échelle de la rivière, voire du bassin versant. C'est le cas par exemple de la rivière d'Ain en contexte alluvionnaire, ou de l'Arroux et la Bourbince en contexte sablonneux. Enfin, certaines études canadiennes ont mis en perspective la distribution des refuges thermiques à l'échelle de tout un réseau hydrographique.

ENCART 3. EXFILTRATION EN AVAL D'UN BANC DE GALETS SUR LA RIVIERE D'AIN

Les exfiltrations de bancs observées sur la rivière d'Ain sont parmi les plus importantes observées sur les rivières alluviales du bassin du Rhône (Crédit : V. Wawrzyniak, 2014).



Contexte alluvionnaire : l'exemple de la rivière d'Ain

Sur la rivière d'Ain, Wawrzyniak et al. (2016) ont étudié la distribution des taches d'eau froide à partir de 3 campagnes annuelles (2010, 2011 et 2014) réalisées sur un même tronçon de rivière. Ils ont alors remarqué que la présence de résurgences le long des bancs alluviaux, aussi appelées « exfiltrations de bancs », était importante sur les secteurs où un certain transport de la charge de fond était encore actif, alors que ces résurgences étaient peu fréquentes sur les secteurs pavés et colmatés du fait d'un fort déficit sédimentaire lié aux barrages (Figure 20a). De ces observations, ils ont ainsi démontré que la dynamique de certains refuges thermiques était directement liée à la dynamique sédimentaire de la rivière, et que cette dynamique était probablement plus importante au milieu du siècle dernier, lorsque le transport sédimentaire y était plus important (Figure 20b).

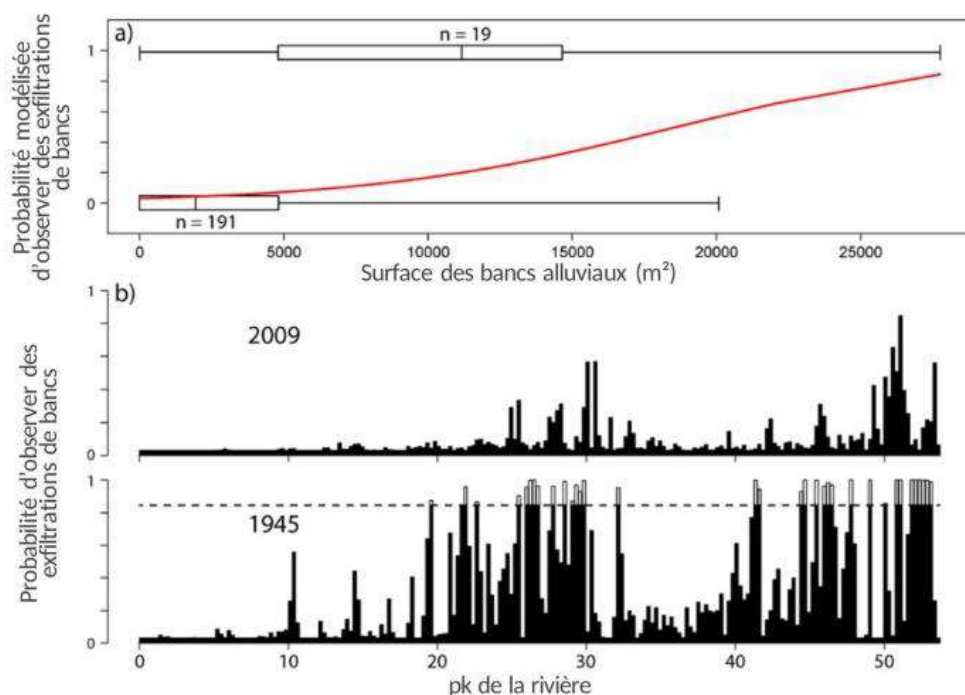


Figure 20. Probabilité d'observer des exfiltrations de bancs sur la rivière d'Ain. (a) Probabilité modélisée en fonction de la taille des bancs. (b) Probabilité observée en 2009, et prédite pour 1945 sur la base des bancs alluviaux observés sur les images aériennes de l'époque (source : Wawrzyniak et al. (2016)).

Exemple de rivières sablonneuses

Une étude plus récente a été réalisée sur deux rivières sableuses du bassin de la Loire : la Bourbince et l'Arroux. Sur ces rivières, les mesures ont été menées en période de canicule et d'été sévère, avec une température de l'eau supérieure à 30°C par endroits. Malgré cela, de nombreux petits

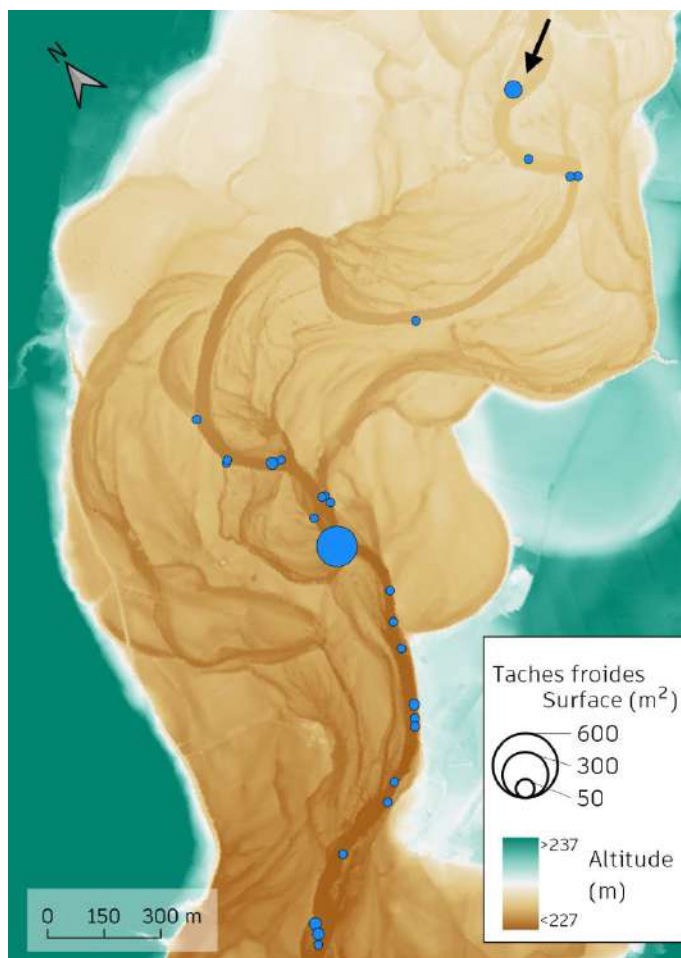


Figure 21. Sur l'Arroux (affluent RD de la Loire), de nombreux refuges thermiques ont été observés à l'exutoire de paléo-chenaux, chemins préférentiels d'écoulements de sub-surface sur ces environnements sablonneux.

refuges thermiques ont été observés, notamment en lien avec la présence de paléo-chenaux adjacents (Figure 21). Visibles sur le modèle numérique de terrain du RGE Alti©, ces anciens méandres semblent constituer des chemins préférentiels d'écoulement drainant la nappe, notamment en période d'étiage. Ils alimentent alors dans le chenal un certain nombre de poches d'eau plus froide de tailles variables, pouvant contribuer au maintien dans le chenal d'ambiances thermiques propices à la survie de la vie aquatique durant ces épisodes caniculaires.

Une étude à l'échelle du bassin versant au Canada

En survolant près de 700 km de cours d'eau sur le bassin versant de la rivière Restigouche, Dugdale et al. (2015) ont pu établir un inventaire quasi-exhaustif des refuges thermiques et analyser les facteurs à large échelle qui conditionnent leur distribution. Ils identifient deux paramètres particulièrement importants à cette échelle : (1) la proximité des affluents (Figure 22a), et (2) le degré de confinement de la vallée (Figure 22b). Ils expliquent le rôle thermique des affluents du fait qu'ils soient capables d'alimenter la rivière dans laquelle ils se jettent en eaux généralement plus fraîches, à la fois directement (confluence) et indirectement (apports diffus), en drainant les écoulements diffus et autres apports par les nappes d'accompagnement, et donc de contribuer au maintien de ces refuges thermiques. Le degré de confinement, quant à lui, a une influence sur la densité des refuges à l'échelle de la vallée. Une plus forte densité est observée lorsque le degré de confinement est moyen (vallées « semi-confinées »), grâce à la présence d'un réseau d'écoulement souterrain important et des forçages hydrauliques lorsque les marges alluviales sont proches du chenal. Lorsque la vallée est extrêmement resserrée, il n'y a pas ou peu d'écoulements souterrains puisque l'ensemble des écoulements est forcé vers les eaux de surface. À l'inverse, lorsque la rivière s'étale au fond d'une vallée élargie, les écoulements souterrains existent mais il y a peu de forçages hydrauliques ou géologiques pour engendrer une remontée des eaux froides vers la surface. C'est lorsque la vallée est semi-confinée que les conditions sont réunies pour avoir une densité plus importante : le réseau d'écoulements souterrains y est important, et des changements brusques de gradient hydraulique à l'approche des marges alluviales favorisent les exfiltrations de la nappe vers le cours d'eau.

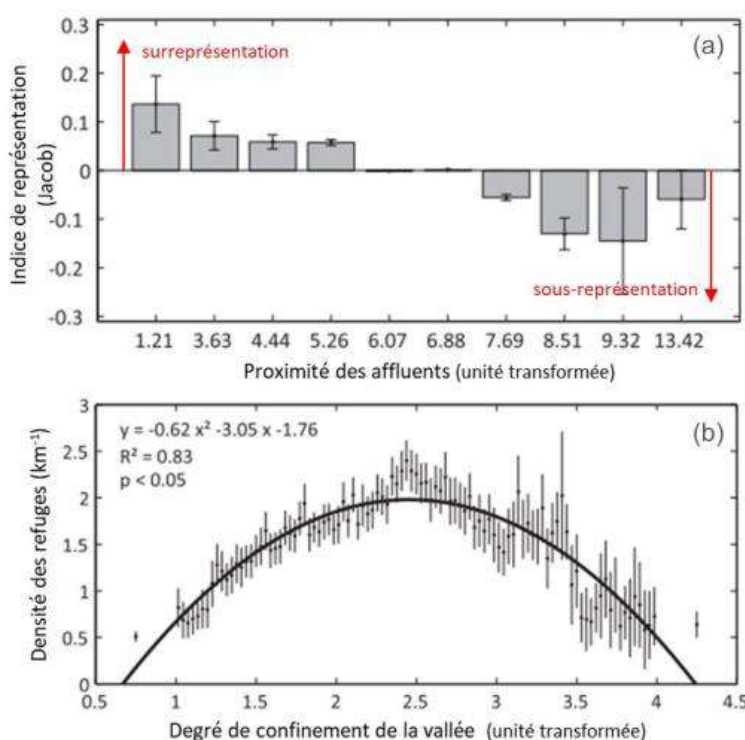


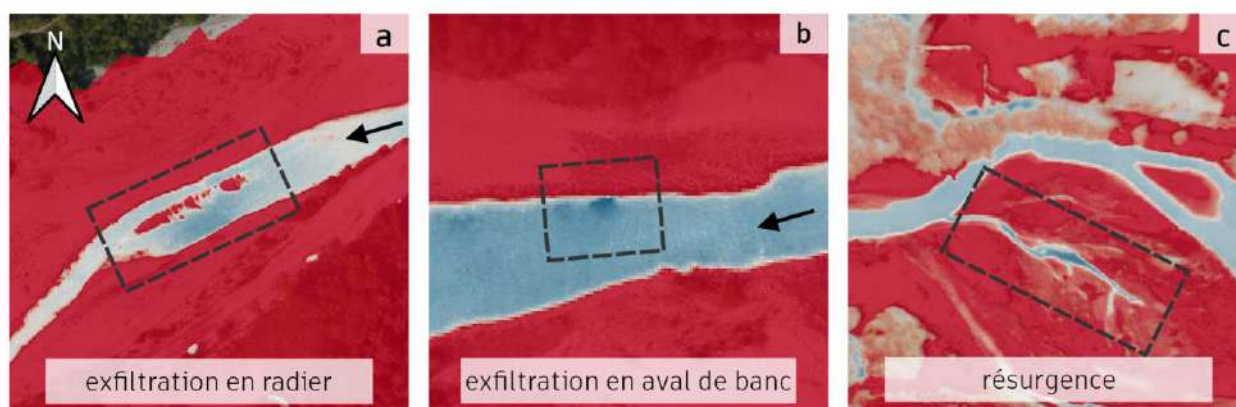
Figure 22. Les refuges thermiques sur le bassin versant de la rivière Restigouche (Ouest Canadien) sont fortement concentrés à proximité des affluents (a) et présents en plus grande densité pour un niveau de confinement moyen de la vallée (b) (Source : Dugdale et al. (2015)).

3.2.1.3. Etablir une nomenclature des « types » de refuges thermiques

Nombre de ces travaux ont également proposé une caractérisation plus fine de ces refuges thermiques, et notamment en les classant selon une typologie, reposant sur leur localisation au sein du chenal et/ou de la plaine alluviale, et donc sur leur source/origine potentielle. La classification des refuges thermiques n'est pas propre à la méthode proposée par l'IRT-a (ex. Bilby, 1984; Ebersole et al., 2003; Ozaki, 1988), bien que l'outil ait fourni de nombreuses avancées dans la définition d'une nomenclature qui est progressivement devenue un standard dans le domaine (Torgersen et al., 2012). Celle-ci a été reprise et illustrée par Dugdale et al. (2015) et présentée en Figure 23. Récemment, Sullivan et al. (2021) ont fait le point sur le vocabulaire utilisé dans la littérature (notamment anglophone) et ont souligné la nécessité de distinguer les « refuges thermiques » des « taches d'eau froide/chaude ». Le premier concept porte distinctement la notion d'utilisation ou d'utilisabilité (réelle ou potentielle) par des organismes poikilothermes (c'est-à-dire dont la température corporelle varie avec celle de leur environnement). Le second concept englobe plus largement l'ensemble des structures thermiques observables dans le milieu, quelque soit leur taille, accessibilité, etc. (voir Encart 4), sans qu'un lien fonctionnel explicite soit établi.

ENCART 4. CLASSIFICATION DES ANOMALIES THERMIQUES : ALLER AU-DELA DES REFUGES THERMIQUES

La notion de « refuge thermique » porte une condition préalable : avoir une fonction biologique de « refuge » pour les espèces, notamment piscicoles (Sullivan et al., 2021). En revanche, l'outil IRT-a permet aujourd'hui de recenser des anomalies thermiques qui peuvent informer sur les processus fonctionnels en jeu, sans pour autant remplir ce rôle de « refuge ». C'est par exemple le cas des résurgences en milieu de bancs (Figure c ci-dessous) qui présentent une lame d'eau trop faible pour pouvoir accueillir d'autres organismes que des macroinvertébrés. Certains auteurs ont donc utilisé une nomenclature plus détaillée pour illustrer les échanges nappe-rivière, notamment sur des rivières en tresses, en séparant par exemple les exfiltrations issues de bancs (b) des exfiltrations en aval de radiers (a). Les processus en jeu sont similaires, à savoir une remontée hyporhéique issue du recyclage de l'eau de la rivière, mais leurs fonctionnalités peuvent être différentes. (Source : Marteau et al. (2022a), modifié).



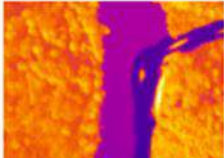
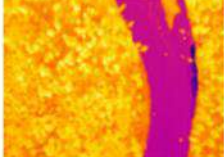
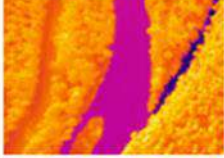
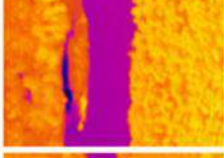
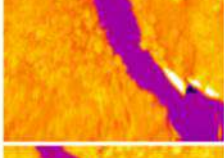
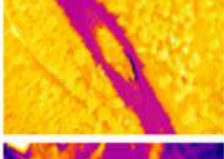
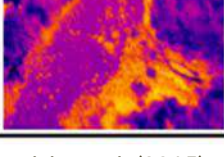
Refuge thermique	Références	Schéma	Exemple d'image aérienne	Exemple d'image IRT
Panache d'affluent	Torgersen et al. (2012)			
Suintement latéral	Bilby (1984) Ebersole et al. (2003a)			
Chenal issu de réurgence	Stanford and Ward (1993) Ebersole et al. (2003a)			
Chenal latéral phréatique	Ebersole et al. (2003a) Stevens and DuPont (2011)			
Alcôve	Ozaki (1988) Ebersole et al. (2003a)			
Exfiltration hyporhéique	Brunke and Gonser (1997) Poole and Berman (2001) Burkholder et al. (2008)			
Exfiltration en pied de versant	Peterson and Reid (1984) Torgersen et al. (2012)			

Figure 23. Nomenclature illustrée des types de refuges thermiques observés en rivière (Source : Dugdale et al. (2015) et références qui y sont citées).

De manière générale, sont distinguées deux grandes catégories de taches froides : celles issues d'écoulements phréatiques ou de versants, qui sont le fruit de remontées de nappes plus ou moins profondes ou de suintements en marge de la plaine alluviale ; et celles issues du « recyclage » local (pouvant s'étendre sur plusieurs dizaines de mètres) d'eaux de surface lors de leur passage au sein de la zone hyporhéique (voir par exemple Encart 4).

La classification des taches froides suivant leur typologie (que Sullivan et al. (2021) qualifient d'hydrologique, mais qui est également très fortement liée à la géomorphologie) peut permettre d'affiner la compréhension du comportement thermique observé localement.

3.2.2. Les profils longitudinaux de température

L'étude de la température moyenne longitudinale offre la possibilité de repérer des tronçons thermiquement caractéristiques, se distinguant clairement des autres soit par une température plus élevée ou plus faible, soit par une augmentation ou au contraire une diminution continue de la température. Ce travail de segmentation en tronçons thermiques caractéristiques permet de mieux diagnostiquer les facteurs influençant la température de la rivière et les anomalies thermiques en analysant notamment plus spécifiquement les caractères de ces tronçons (état de la ripisylve, forme de la vallée, présence d'ouvrages, confluences...). Ceci permet ainsi de comprendre leurs effets sur le régime thermique de la rivière étudiée et l'impact potentiel des anomalies sur ce régime thermique. Parmi les facteurs régissant l'organisation longitudinale du patron de température, certains sont naturels (ex. affluents), d'autres sont anthropiques (ex. barrages et seuils). Les deux exemples présentés ci-après illustrent les effets des altérations hydrauliques sur le continuum thermique des cours d'eau, et ce dans deux contextes différents.

3.2.2.1. Etude des tronçons « thermiquement homogènes »

Une étude sur le Drac amont a mis en évidence le lien fort entre le gradient thermique et la densité (et diversité) des taches froides (Figure 24). L'alternance observée correspond à la succession de tronçons en tresses (« T », gradient négatif et densité importante de taches) et de secteurs moins larges et donc plutôt à chenal unique (« U », gradient positif et taches moins nombreuses). L'exception observée (« Impact ») correspond à un secteur restauré où le fonctionnement apparaît comme différent d'un secteur naturel (cas évoqué en Encart 8). La caractérisation longitudinale et la cartographie des anomalies thermiques sont ainsi deux approches qui se complètent, la première étant susceptible d'être interprétée et mieux comprise en s'appuyant sur la seconde.

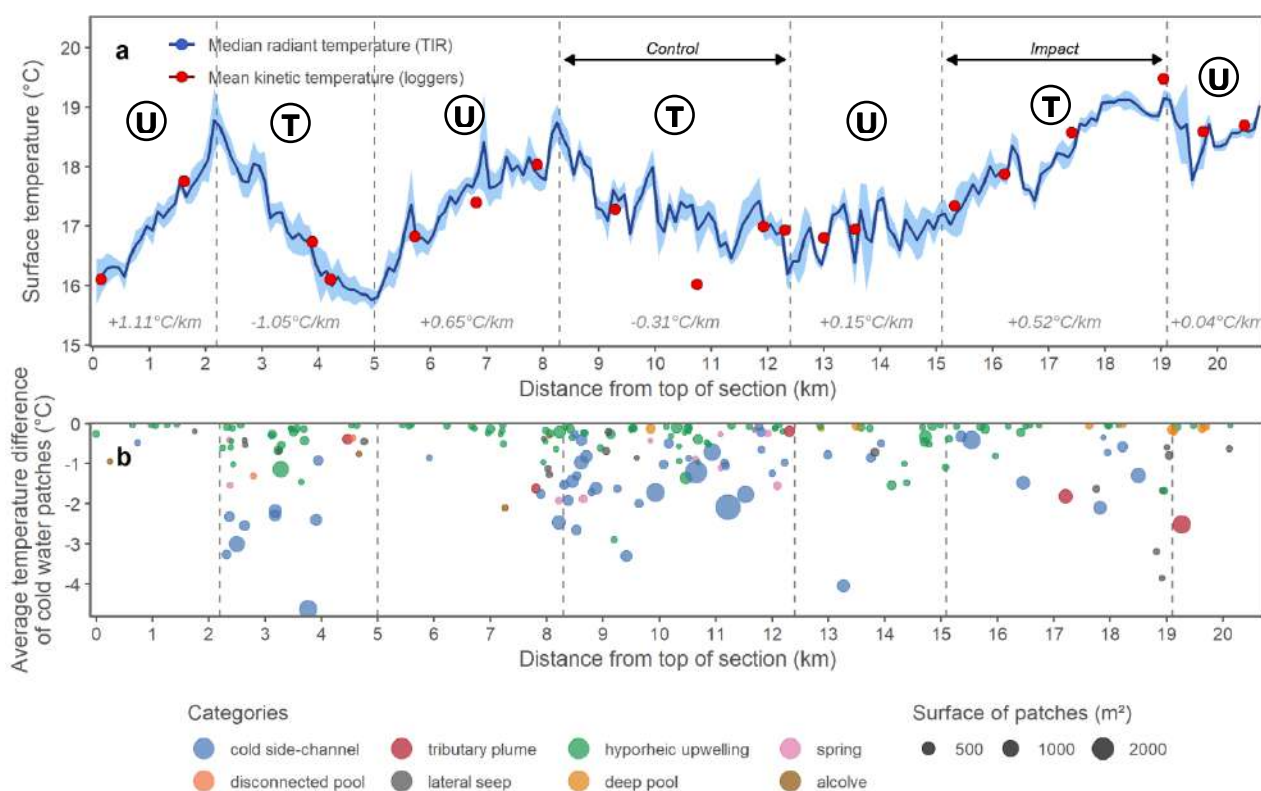


Figure 24. Sur la rivière Drac amont, l'analyse des données issues de l'IRT-a a permis d'associer la dynamique locale du gradient thermique avec les caractéristiques des taches froides observées (densité, diversité, taille et différentiel thermique), et de comparer également les secteurs au fonctionnement théorique similaire (ex. systèmes en tresse) les uns aux autres. (Source : Marteau et al. (2022a)).

3.2.2.2. Echauffement de la masse d'eau et altération thermique des cours d'eau de plaine : exemple de la plaine de la Bresse

L'IRT-a a été utilisé en 2018 pour étudier les effets respectifs de la présence/absence de ripisylve et celle des seuils sur des cours d'eau de plaine agricole fortement modifiés. Sur ces cours d'eau, les températures observées en été sont parfois très élevées et assez hétérogènes, avec des phénomènes d'échauffement marqués liés à la présence de seuils (Chandesris et al., 2019) et largement accentués lorsque la ripisylve est absente (car moins d'ombrage, Loicq et al., 2018). Cette étude visait donc à étudier le régime thermique de ces cours d'eau (ici, 9 sélectionnés au sein de la plaine de la Bresse) et comprendre comment la ripisylve joue son rôle de régulateur de l'échauffement (par l'ombrage) lorsque l'hydraulique est fortement altérée (Marteau, Piégay, et al., 2020, 2022).

L'étude des profils en long de température sur plusieurs dizaines de kilomètres a révélé un phénomène très fréquent sur les cours d'eau de la plaine de la Bresse : une chute brutale de la température de surface au passage des seuils (Figure 25). Bien que ces ruptures thermiques longitudinales varient en fonction des caractéristiques des structures (âge, matériaux, niveau d'entretien, type de vannage, etc.), ils reflètent de manière générale un phénomène de « dé-stratification » de la masse d'eau au passage de la chute. En période estivale, les écoulements sont très ralentis à l'amont et l'eau reçoit des rayonnements solaires en grande quantité, participant au réchauffement de la masse d'eau par la surface et donc à la mise en place d'une stratification thermique. Cette stratification disparaît après le seuil, grâce au mélange des eaux voire aux apports supplémentaires qui peuvent exister autour des ouvrages. Ainsi, le différentiel de température entre le réservoir et la fosse à l'aval d'un ouvrage (le ΔT) est apparu comme un indice d'altération thermo-hydraulique qui reflète assez bien la diversité des situations de rétention, de porosité et de mélange (hauteur de chute, volume de la rétention, longueur d'influence amont, etc.).

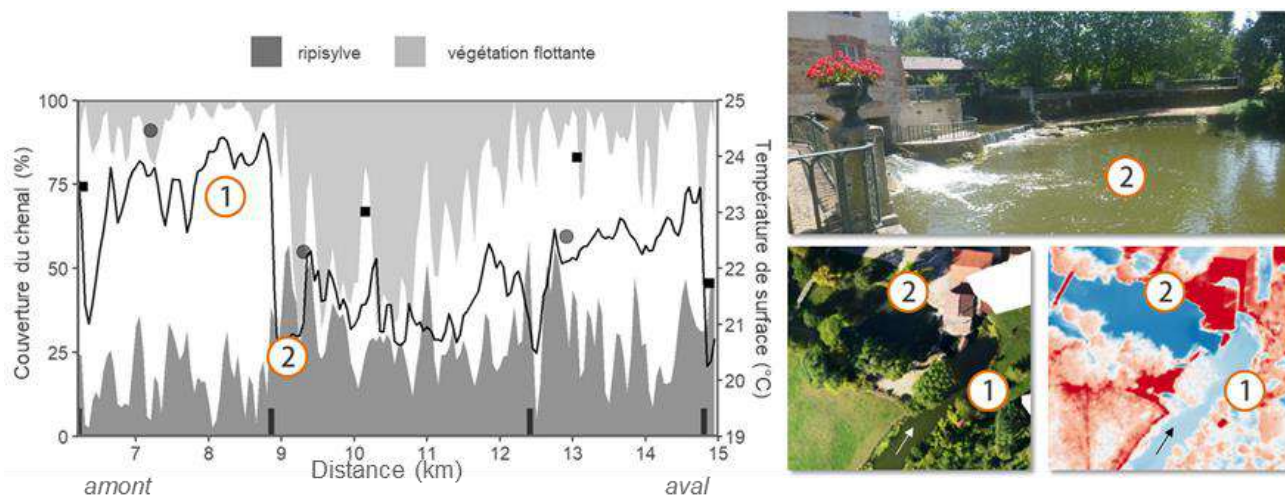


Figure 25. Au moment le plus chaud de la journée, un phénomène de "dé-stratification" thermique est observable sur la majorité des seuils de la Bresse, illustrant l'échauffement en surface de la masse d'eau et l'altération thermo-hydraulique sur système généré par la présence des seuils.

L'analyse de la relation entre la température et l'ombrage conduite à l'échelle de tronçons de plusieurs dizaines de km a démontré que celle-ci est toujours négative, c'est-à-dire qu'une augmentation de l'ombrage favorise un refroidissement de l'eau, mais que les caractéristiques de cette relation dépendent de deux facteurs principaux : le régime thermique « naturel » de la rivière (notamment les apports d'eau souterraine) et le degré d'altération thermo-hydraulique des ouvrages

transversaux ΔT (Figure 26). Les rivières dites « froides » ont une température relative plus faible (T_{wc} , ici température corrigée pour prendre en compte des différences de conditions atmosphériques lors des campagnes), sont moins sensibles à la présence de seuils (ΔT plus faible) ainsi qu'à la présence/absence de ripisylve (coefficient α). A l'opposé, les rivières dites « chaudes », qui sont généralement déconnectées de leur nappe d'accompagnement, sont plus sensibles à la présence de seuils (le linéaire influencé par les ouvrages dépassant régulièrement les 80%) et ainsi plus sensibles à l'échauffement lorsque la ripisylve est absente.

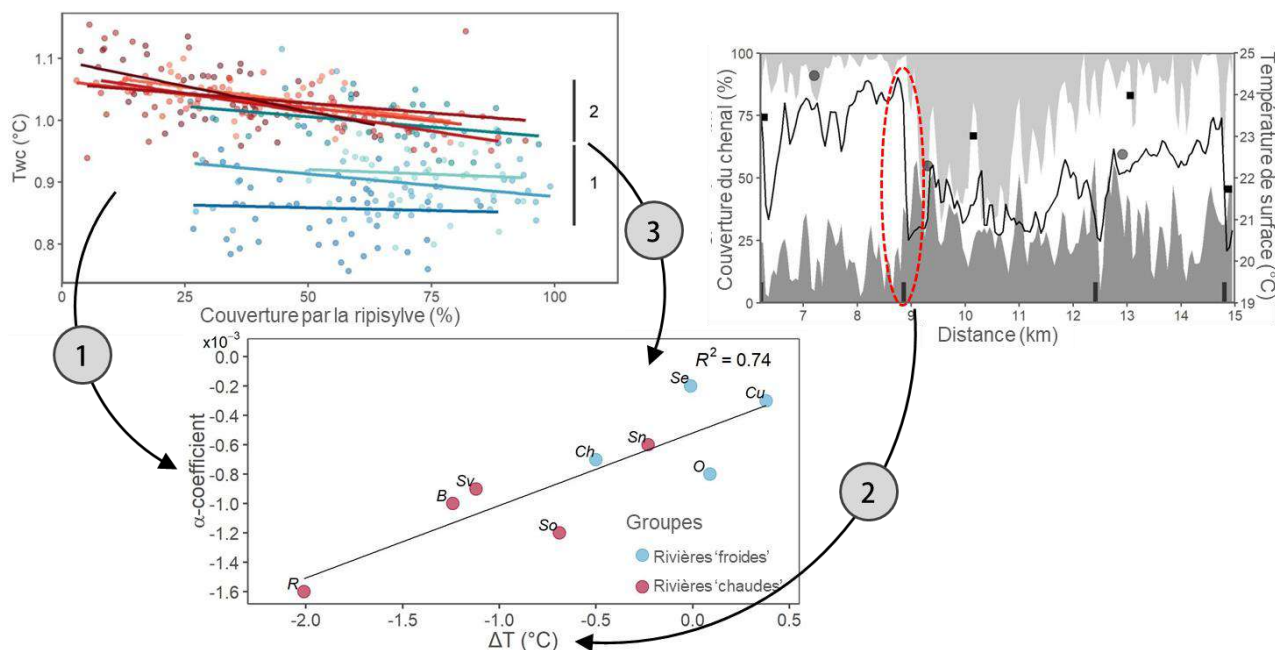


Figure 26. L'étude sur la plaine de la Bresse a mis en évidence le lien entre l'altération thermo-hydraulique des rivières de plaine et leur réponse à la présence/absence de ripisylve. Plus une rivière est fragmentée par des seuils affectant son régime hydraulique, plus elle sera sensible à l'ombrage, le tout modulé par le régime thermique de la rivière (notamment les échanges avec la nappe) (Marteau et al. (2022b).

C'est grâce à une acquisition de données sur plus de 260 km de cours d'eau et une démarche comparative inter-tronçon que l'IRT-a a permis d'affiner la compréhension de ces processus complexes d'échauffement dans ces hydrosystèmes où les pressions sont multiples et parfois difficiles à séparer les unes des autres.

ENCART 5. LA BRENNIE : UN COURS D'EAU TYPIQUE DE LA BRESSE

Illustration du paysage rivulaire typique d'un cours d'eau de la Bresse, ayant gardé certaines ondulations à travers la plaine mais dont l'hydraulique est fortement altérée (sur-élargissement, présence de seuils, recalibrage sur de nombreux secteurs). Cette photographie reflète également l'utilisation qui est faite du paysage dans ce secteur, avec une alternance de pâturages (dominants) et de cultures céréalières entrecoupée de petites parcelles forestières. La ripisylve y est généralement absente ou très artificielle. (Crédit : B. Marteau, juillet 2018).



3.2.2.3. Impact des barrages, du débit et des rejets sur le continuum thermique des grandes rivières

Le Rhône constitue un objet particulier pour l'étude des dynamiques thermiques des grands fleuves, et notamment pour ce qui est de la compréhension des effets des altérations anthropiques de différentes natures. Une campagne IRT-a menée sur le secteur de Donzère-Mondragon (DZM) entre l'entrée et la sortie du RCC a mis en évidence la présence d'une stratification thermique importante au sein de la retenue (Figure 27). Cet effet n'est pas observé tous les ans et semble avant tout localisé dans la retenue, avec peu d'effet à l'aval. De la même manière, lorsque le RCC rejoint le canal, le profil de température montre une rupture soudaine résultant d'apports plus froids du canal, où l'échauffement est beaucoup plus faible (voire absent) et les débits généralement supérieurs. Enfin, le gradient de température au sein du RCC est d'autant plus marqué que le débit est faible ($Q_{2014} > Q_{2013}$) mais aussi que le différentiel de température eau-air est important ($\Delta 2019 \gg \Delta 2013$) (Olivier et al., 2019; Wawrzyniak, Piégay, & Graillot, 2016).

ENCART 6. L'EFFET VISIBLE DU REJET DES CENTRALES NUCLEAIRES

Lors de cette campagne menée en juin 2013, Wawrzyniak et al. (2016) ont pu repérer le panache du rejet de la centrale nucléaire de Saint-Alban dans le Rhône. L'eau du fleuve est pompée en amont et utilisée pour refroidir les réacteurs. A la sortie de la centrale, la température de l'eau est supérieure à 27°C (dans les limites réglementaires), générant une rupture du profil thermique longitudinal, et créant un panache visible sur plus de 2 km. A noter également le passage d'une barge, du haut vers le bas, au sein du panache d'eau chaude et laissant sur son passage une marque d'eau visiblement moins chaude. Cela démontre que le panache se concentre plutôt à la surface générant une forme de stratification thermique. (Source : V. Wawrzyniak 2013, modifiée par B. Marteau, 2021).



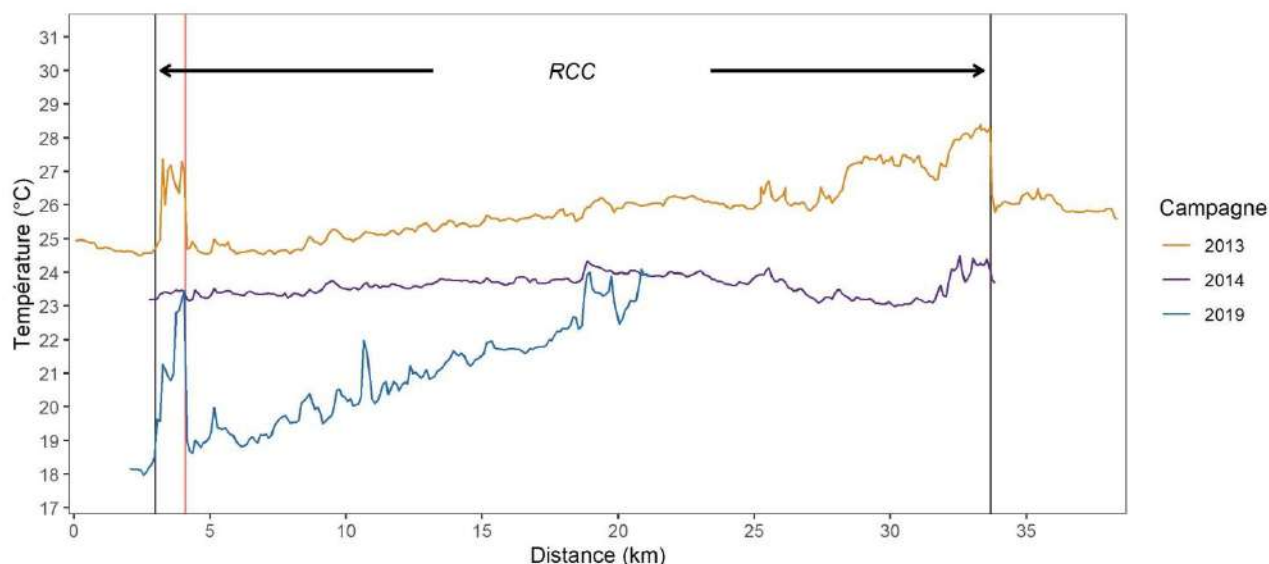


Figure 27. La rupture du profil de température sur le tronçon court-circuité du Rhône à Péage-de-Roussillon n'est pas observée tous les ans au passage du barrage de Saint-Pierre-de-Bœuf (ligne rouge, km 4,5). De la même manière, le gradient thermique au sein du RCC varie d'une année à l'autre, et ne semble pas dépendre uniquement du débit.

3.2.3. Approche spatio-temporelle des suivis

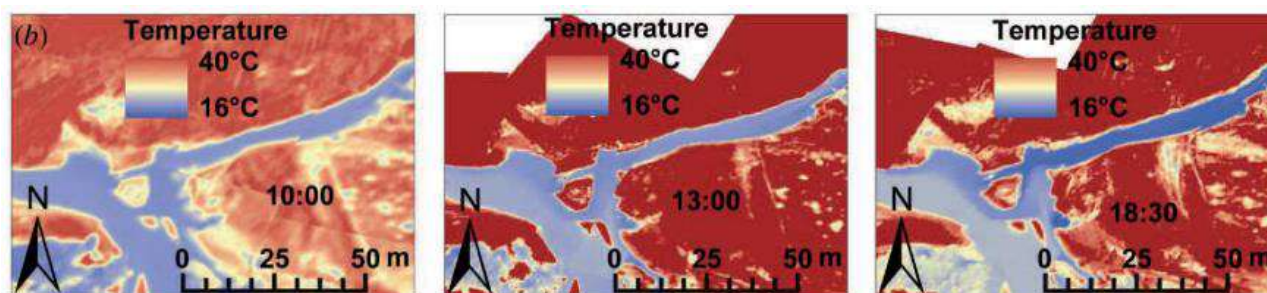
La nature même de l'IRT-a (matériel onéreux, compétences particulières, appel à des pilotes confirmés, technique émergente et exploratoire) fait que les suivis temporels sur un même site ou une même rivière sont plutôt rares. Les perspectives de diagnostic offertes par un premier suivi répondent déjà assez bien à certaines questions de caractérisation des conditions thermiques d'un tronçon. Malgré cela, quelques exemples de suivis répétés existent. Deux exemples sont repris ici ; le premier mené sur deux rivières à galets visait à étudier les dynamiques journalières et annuelles de tronçons de quelques centaines de mètres, tandis que le deuxième reprend la thématique du suivi post-réhabilitation sur le Drac. Ils illustrent ainsi l'intérêt de campagnes répétées dans le premier cas pour mieux évaluer la pérennité des taches d'eau froide estivales pouvant servir de refuges thermiques pour les salmonidés et dans le second cas pour déterminer à quelle échéance une action de restauration peut avoir une réponse thermique favorable.

3.2.3.1. Comportement temporel des dynamiques d'une rivière à galets

Dynamique journalière

La température est un paramètre dynamique qui évolue de manière cyclique au cours de la journée, en réponse aux variations atmosphériques. L'exemple proposé en §2.4.4.1.2 a déjà démontré que les contrastes de température étaient les plus forts en été autour de 16h-17h. Ici, ces contrastes sont directement observables sur les images thermiques (Encart 7). En plus d'informer sur la période la plus adéquate pour réaliser ce genre de suivi, l'outil IRT a permis une approche spatiale des dynamiques journalières en fonction des formes du lit et des types de chenaux : tous ne réagissent pas de la même manière. Leur réponse aux forçages atmosphériques dépend directement de l'origine de l'eau, par exemple eau de surface vs. résurgences phréatiques (voir partie introductive pour plus de détail sur ces phénomènes).

ENCART 7. EVOLUTION JOURNALIERE DES CONTRASTES THERMIQUES.



Les contrastes de température, entre les différents types de chenaux, est le plus important au moment où la température de l'eau atteint son maximum journalier. Suivant les systèmes, ce maximum apparaît généralement quelques heures après le maximum de température de l'air. L'augmentation de ces contrastes est directement observable sur les images thermiques (source : Wawrzyniak et al. (2013)).

Dynamique annuelle, liée aux cycles hydrologiques

Les cycles hydrologiques, de la crue à l'étiage, sont des phénomènes qui influencent fortement les dynamiques de température d'un cours d'eau. Dans une étude sur la rivière d'Ain, Wawrzyniak et al. (2016) se sont interrogés sur la façon dont le niveau des nappes pouvait également jouer sur la quantité et la distribution des anomalies thermiques observées en rivière. En effet, bon nombre de ces anomalies sont liées à des échanges plus ou moins directs avec la nappe. Leur présence et leur persistance dans le temps est donc susceptibles d'évoluer en fonction du niveau de la nappe alluviale. C'est en effet ce qu'ils ont démontré, en répétant des campagnes d'imagerie IRT sur plusieurs années, avec des conditions hydrogéologiques différentes. Certaines taches d'eau froides ont une taille qui évolue selon les périodes étudiées, et celle-ci est conditionnée par la hauteur de nappe au printemps. Il est ainsi possible de mieux prévoir la résilience de la rivière lors des périodes de canicule, et d'anticiper la perte de refuges thermiques potentiels quelques mois à l'avance.

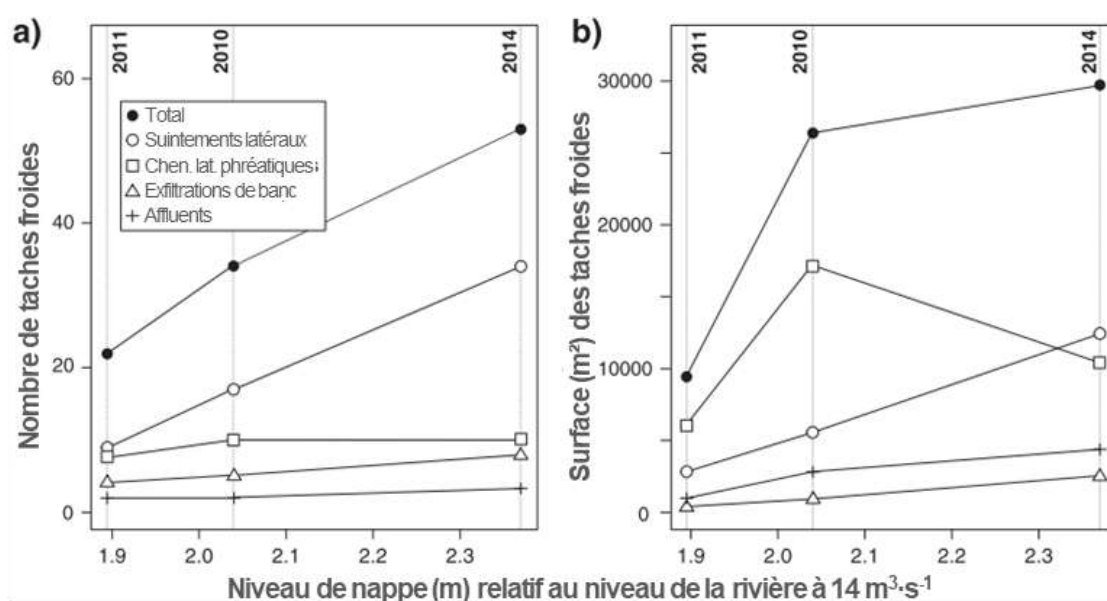


Figure 28. Relations entre le niveau de la nappe et le nombre d'anomalies thermiques (a) et la surface totale de ces anomalies (b) (Source : Wawrzyniak et al. (2016)).

3.2.3.2. L'utilisation de proxys pour comparer la situation actuelle à des référentiels passés

Comme expliqué dans la partie précédente, il existe peu de suivis temporels mobilisant l'IRT-a pour des raisons financières et logistiques et du fait de son caractère encore exploratoire. Dans ce cas, comment peut-on évaluer les conditions actuelles du fonctionnement thermique d'un système par rapport à un état passé plus ou moins lointain ? Cette question se pose fréquemment dans le cadre de la restauration ou réhabilitation des rivières (Piégay et al., 2023). Dans le cadre de la restauration de rivières en tresses, s'appuyant sur les indicateurs développés par Belletti et al. (2013), Marteau et al. (Marteau, Michel, et al., 2022) ont proposé une approche dite « BACI⁷ » basée sur l'analyse d'indicateurs fonctionnels considérés comme des proxys du régime thermique de la rivière et que l'on peut mesurer de manière répétée au cours du temps sur des photographies aériennes. Ils permettent également de définir une référence passée. Les données IRT-a acquises en phase post-réhabilitation sont alors comparées à ces indicateurs fonctionnels dans le cadre d'une approche comparative inter-tronçons, pour comprendre le fonctionnement actuel (Figure 29) et appréhender son fonctionnement passé (Figure 30).

Utilisée dans le cadre d'une mise en perspectives d'actions de restauration à large échelle, cette approche a permis d'expliquer en partie les écarts observés aujourd'hui entre les secteurs réhabilités et les secteurs de « contrôle » (choisis à la fois pour leur état apparent de fonctionnement aujourd'hui et leur trajectoire d'évolution). Par exemple, l'injection de 40 000 m³ de sédiments en aval du barrage de St Sauveur sur le Buëch a permis de restaurer une partie de la dynamique sédimentaire qui avait disparu (incision et rétrécissement du lit), mais n'a quasiment aucun effet sur les échanges nappe-rivière. Deux ans après la recharge, quelques processus hyporhéiques sont réapparus là où des bancs alluviaux se sont installés, mais les échanges plus profonds avec la nappe restent inexistant. L'influence du barrage sur ces échanges à plus large échelle est trop grande pour être restaurée par la simple recharge alluviale.

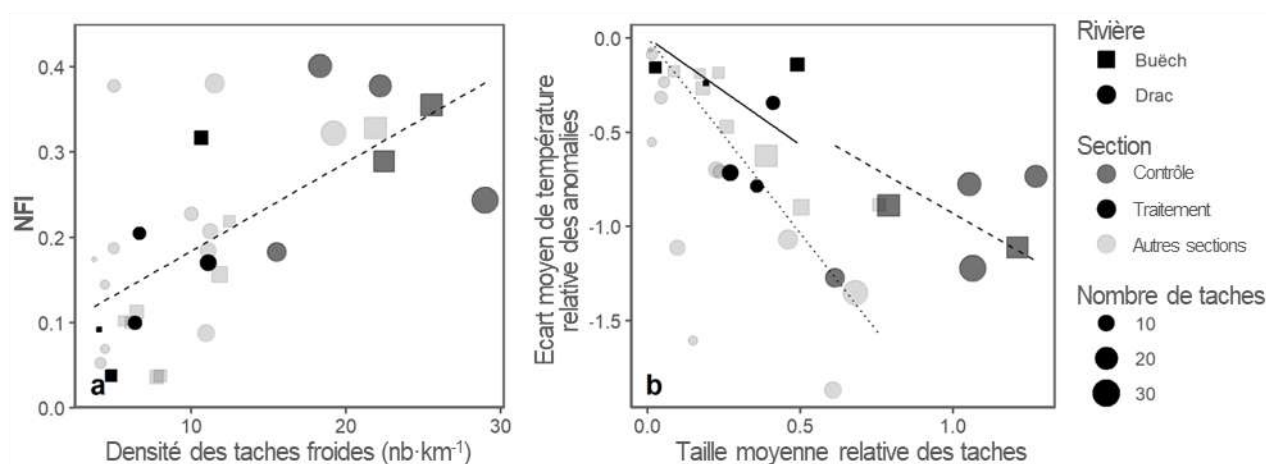


Figure 29. Indicateurs fonctionnels issus des observations actuelles sur des secteurs en tresses restaurés. a) Lien entre indices géomorphologiques de connectivité potentielle (densité de chenaux déconnectés ou uniquement connectés par l'aval) et leur densité. b) Différence observée de taille et de différentiel thermique sur les tronçons restaurés par rapport à un référentiel de contrôle.

⁷ BACI : Before-After Control-Impact,

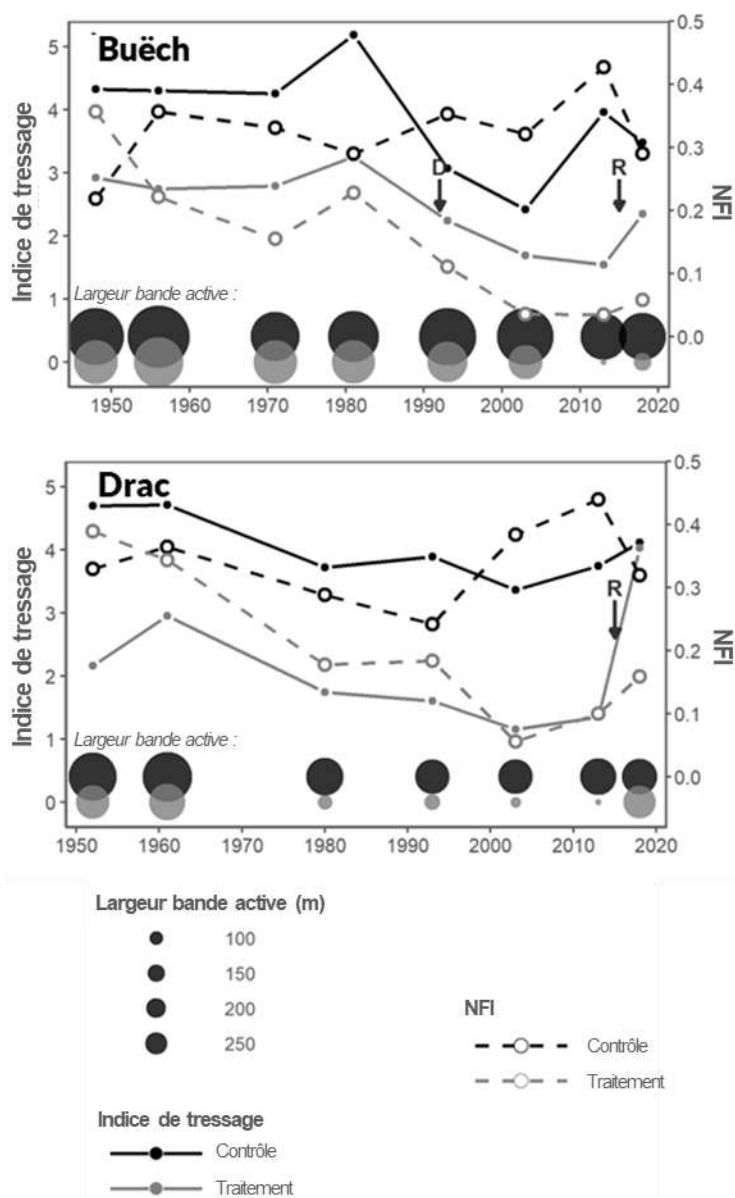
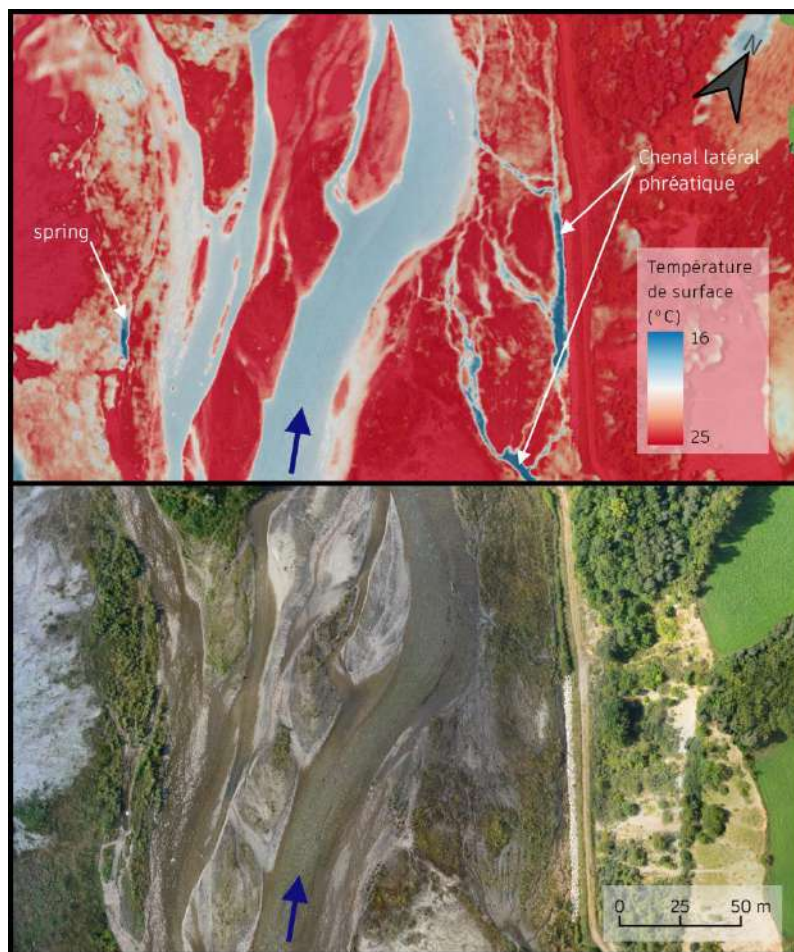


Figure 30. Évolution de différents indicateurs morphologiques sur les secteurs étudiés du Drac et du Buëch de 1950 à aujourd'hui. (Pttw : index de tressage ; NFI : indice de densité de chenaux relatifs aux écoulements de sub-surface ; Active width : largeur de la bande active). (Source : Marteau et al. (2021a), modifié).

Les observations faites sur le Drac amont sont de nature similaire. Deux ans après des travaux de très grande ampleur (élargissement de la bande active, injection de 400 000 m³ de sédiments, recréation d'annexes hydrauliques, etc.), le fonctionnement thermique du tronçon en tresses restauré reste différent du tronçon en tresses pris comme référence dans la comparaison. La rivière a retrouvé une largeur de bande active proche des conditions des années 1950, mais l'indice de tressage (Pttw, Figure 30) est plus élevé qu'il ne l'a été au cours des dernières décennies. L'indice morphologique relatif aux écoulements de sub-surface (NFI) est lui aussi restauré, mais sans commune mesure avec l'indice de tressage. Le décalage entre la valeur des indices Pttw vs. NFI aujourd'hui, et le fait que leur évolution ait été assez proche depuis les années 1950s sur le secteur restauré, montrent que les formes recrées ne présentent pas encore les fonctionnalités attendues en termes de connexion nappe-rivière. En revanche, le fait que la bande active soit restaurée et que l'indice de tressage ait augmenté suggèrent qu'un fonctionnement nappe-rivière plus proche de ce qui était observé au milieu du 20^e siècle est possible lorsque les sédiments auront été remobilisés et les formes remodelées par la rivière lors de crues suffisamment compétentes. Cette approche historique sur le Drac est venue compléter les conclusions faites en partie 3.2.1.3 sur l'interprétation de l'orthophoto thermique (Figure 29 et Encart 8).

ENCART 8. UNE TRESSE RESTAUREE MAIS NON RECONNECTEE

Le secteur restauré du Drac amont a été élargi, avec l'apport d'une quantité importante d'alluvions. Bien que les formes soient en apparence restaurées, la tresse était, en 2018, encore trop « artificielle » pour être thermiquement fonctionnelle. Ici, on peut voir post-restauration que le chenal principal est très large et donc fortement exposé aux rayonnements solaires, et que les chenaux latéraux phréatiques et les sources sont déconnectés du système. Du temps est sans doute nécessaire pour que la rivière remodèle ses formes et participe activement à la reconnexion à la fois latérale et verticale qui lui fait défaut actuellement. *(Source : B. Marteau, 2018).*



4. PASSER DE L'EXPLORATOIRE AU CONFIRMATOIRE

La démarche IRT-a permet de détecter les anomalies thermiques et les évolutions longitudinales de la température sur des étendues importantes. Elle est calée in situ sur un réseau de thermomètres. Elle permet de gagner énormément de temps par rapport à une caractérisation de la température réalisée lors de campagnes de terrain. Elle est avant tout exploratoire, localise les anomalies, identifie des tronçons caractéristiques et permet de formuler des interprétations qui méritent cependant d'être confirmées. Cette partie est illustrée par deux approches parfois abordées dans les exemples de cas ou dans la littérature, qui permettent à la fois de valider les mesures et les observations faites depuis les airs et de les expliquer (approche confirmatoire).

4.1. Vérification du profil longitudinal de température

Exemple de la Cèze (karstique)

Sur la Cèze, qui est une rivière karstique, un profil longitudinal de conductivité a été établi (Ré-Bahuaud et al., 2014) lors d'une descente en canoë (Encart 9). La conductivité est un paramètre fréquemment utilisé pour déceler les résurgences karstiques, car les eaux des karts sont

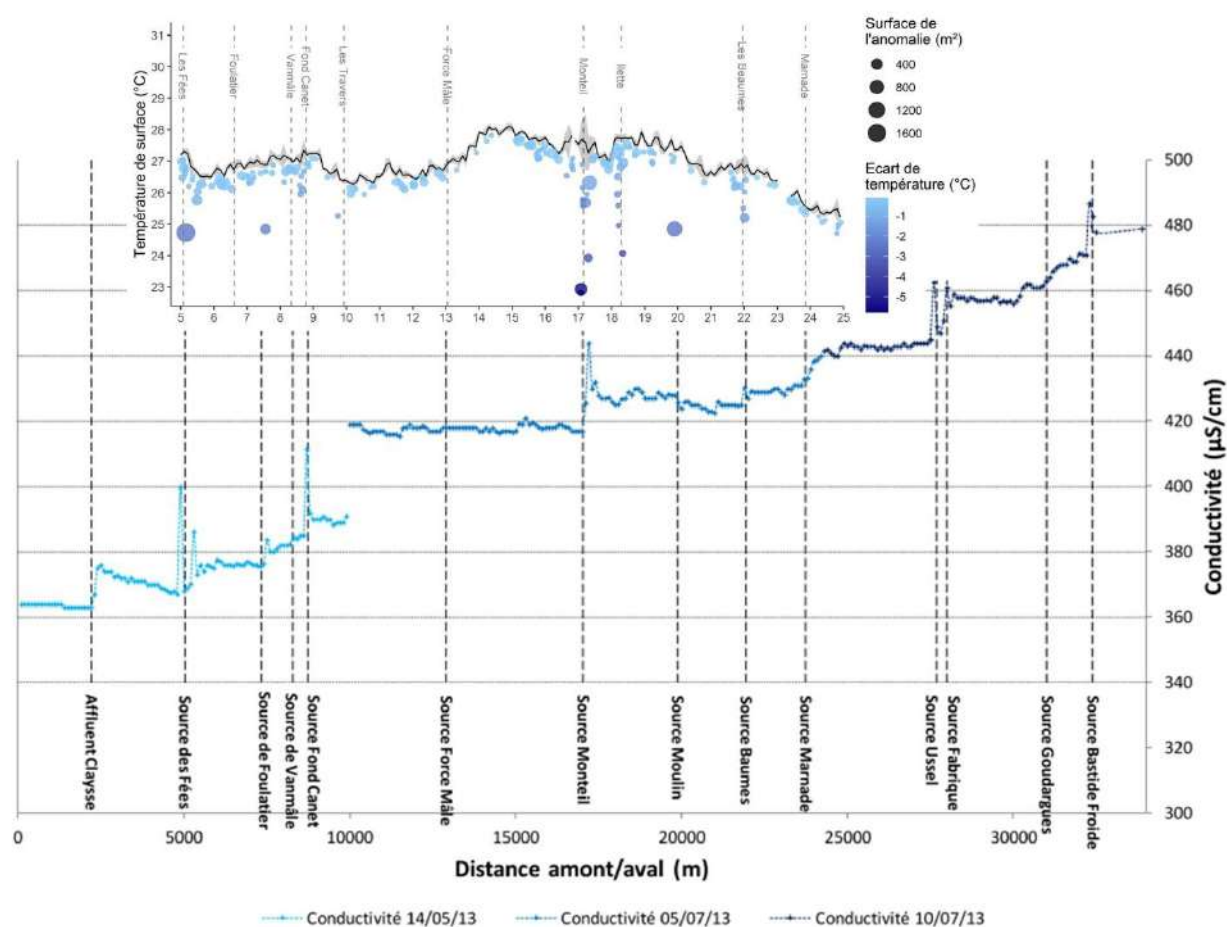


Figure 31. Illustration de la complémentarité des approches : l'IRT-a a permis de localiser des résurgences (et d'en déceler une nouvelle), tandis que le profil de conductivité a permis de déterminer les effets ponctuels ou diffus des résurgences karstiques (Sources : Ré-Bahuaud et al. (2014), Marteau et al. (2020b)).

généralement plus chargées en ions et en minéraux et sont donc caractérisées par une conductivité électrique plus élevée que l'eau de surface (Pascoletti et al., 2020). Ainsi, le profil de conductivité a pu être comparé à la détection des résurgences par IRT-a (Marteau, Ré-Bahuaud, et al., 2020) (Figure 31).

De manière générale, les deux méthodes ont permis de recenser les mêmes résurgences le long de la Cèze. De plus, la comparaison des deux profils (Figure 31) a mis en évidence des différences entre ces résurgences, notamment en termes de physico-chimie et donc potentiellement de l'origine ou du temps de rétention des eaux. Alors que certaines résurgences provoquent un pic élevé de conductivité et représentent des taches très importantes à la surface (ex. source des Fées, km 5 ; source de Monteil km 17), d'autres apparaissent comme relativement petites avec une forte activité conductimétrique (ex. source de Fond-Canet, km 8,8), tandis que certaines sont grandes mais sans effet sur la conductivité de la rivière (ex. source du Moulin, km 20). Une fois de plus, les deux méthodes apparaissent comme complémentaires l'une de l'autre.

ENCART 9. OBTENIR UN PROFIL DE CONDUCTIVITE *IN SITU*

Afin de mesurer la conductivité (et/ou la température) de surface, il est possible de descendre la rivière en canoë avec des sondes embarquées et un système de géopositionnement GPS. Cette méthode est notamment utile pour la conductivité qui ne se mesure pas à distance et qui ne varie quasiment pas au cours de la journée. (Source : Ré-Bahuaud et al. (2014)).



Exemple du Drac amont

Peu d'outils sont en mesure de définir le profil longitudinal de température d'une rivière de manière aussi précise que l'IRT-a. Les thermographes placés en rivière lors de l'acquisition permettent ponctuellement de s'assurer de la qualité de la mesure mais leur résolution spatiale est limitée au nombre de sondes déployées. Afin de prolonger la comparaison, le profil longitudinal IRT-a du Drac mesuré en septembre 2020 a été comparé à celui réalisé, 24h plus tard, par mesure *in situ* lors d'une descente en canoë. La température de surface était enregistrée à l'aide d'un thermomètre Vemco Minilog II (précision = 0,1°C, résolution = 0,1°C) tandis que le positionnement du bateau était relevé par un GPS GeoXH (précision décimétrique). Le principe est donc similaire à celui employé en Encart 9 mais avec l'utilisation d'un thermographe.

La température enregistrée (dite cinétique) lors de la descente en canoë a été ajustée pour prendre en compte l'évolution de la température au cours de l'après-midi (descente entre 15h50 et 19h20) ainsi que la différence cinétique entre l'amont et l'aval. Malgré une différence de conditions atmosphériques (et notamment de température de l'air) entre les deux jours, les deux profils de température sont très proches (Figure 32). La gamme de température observée est comparable

(température moyenne de 15,48 et 15,41 pour la température IRT-a et cinétique respectivement) et les variations longitudinales sont similaires. Les variations locales sont en revanche plus élevées pour la température IRT-a, ce qui peut s'expliquer par deux facteurs : la température issue des images est représentée par la valeur médiane des pixels au sein d'une zone tampon autour de la ligne centrale, et non une seule valeur (comme c'est le cas pour la température cinétique), et le thermomètre enregistreur possède une certaine latence pour réagir aux changements de température qui a pour effet de « lisser » le signal mesuré. Néanmoins, ces résultats démontrent la comparabilité des deux méthodes et affirme la validité des observations faites sur le profil longitudinal extrait des données IRT-a.

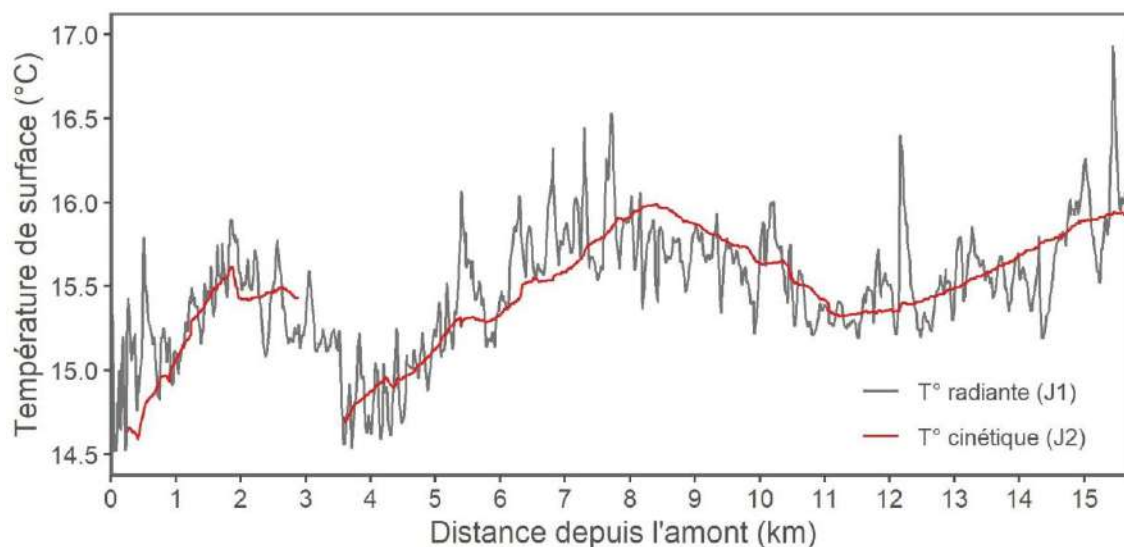


Figure 32. Comparaison des profils en long de température mesurés sur le Drac amont en juillet 2020, par IRT-a (T° radiante, le 6 septembre) et par thermographe « classique » et descente en canoë (T° cinétique, le 7 septembre). La température cinétique a été ajustée pour prendre en compte l'évolution au cours de la descente (~3h30) de la température de l'eau, la différence cinétique entre l'amont et l'aval ainsi que l'écart moyen de température entre les deux jours (Température de l'air en moyenne 3°C inférieure sur l'après-midi entre le 6 et le 7 septembre).

4.2. Détection et résilience des anomalies thermiques

La calibration des images thermiques se fait par comparaison des valeurs de température imagées avec les enregistrements réalisés par des thermographes immergés en rivière. En revanche, la détection des anomalies thermiques, sauf cas évidents tels que la présence d'affluents ou de chenaux multiples, est plus difficile à vérifier *in situ* et souffre parfois de questionnement sur la véracité de terrain des observations faites depuis les airs. Afin de vérifier la qualité des résultats obtenus par l'IRT-a, des tests ont été réalisés sur l'Ouvèze (Ardèche) en 2019-2020, et l'Ain (basse vallée), en 2014.

Le cas de l'Ouvèze ardéchoise

Après une campagne IRT-a réalisée sur l'Ouvèze en juillet 2019, 289 anomalies thermiques ont été répertoriées sur une distance de 18,5 km entre Privas (confluence de la Bayonne) et la confluence avec le Rhône. En 2020, 34 de ces anomalies ont été revisitées dans des conditions météorologiques et de débit comparables à celles observées lors de la mission de 2019. La méthode de revisite consistait en une recherche *in situ* des taches froides par prospection pédestre, à partir des coordonnées extraites des images de 2019, en mesurant la température de l'eau à l'aide d'une sonde multiparamètres. Une fois la tache froide repérée, la température de la zone froide est

comparée à celle du chenal principal pour définir le différentiel thermique de l'anomalie. Sur ces 34 anomalies, 30 ont été retrouvées (soit 88%), et 4 nouvelles ont été détectées lors de la prospection (Tableau 5). Deux petits chenaux latéraux supplémentaires ont été identifiés, sous le couvert de la canopée, tout comme un petit affluent en rive gauche, qui ne pouvaient être observés depuis les airs. Une des anomalies a également pu être re-catégorisée, puisque ce qui apparaissait comme un suintement latéral s'est avéré être le rejet domestique d'un particulier s'écoulant le long de la paroi. En revanche, certaines mouilles stratifiées n'ont pas été retrouvées, et la plupart de celles qui l'ont été n'étaient pas apparentes en surface (i.e. le différentiel thermique reporté est celui mesuré manuellement entre la surface et le fond). Ce sont les zones froides les plus délicates à observer par IRT-a, car si une stratification thermique est fréquemment observable, même en milieu naturel, au sein de formes géomorphologiques particulières (Nielsen et al., 1994; Torgersen et al., 2001), leur détection ne peut se faire que lorsque les conditions hydrauliques permettent à l'eau de fond de remonter à la surface.

Tableau 5. Anomalies thermiques détectées en 2019 et revisitées en 2020. *Une exfiltration latérale s'est avérée être un rejet domestique diffus. **Autres : rejets, et ombrage.

	Recherchées	Trouvées	Additionnelles
Chenal latéral phréatique	4	4	+2
Remontée de structure alluviale	14	14	
Exfiltration latérale	5	4*	
Mouille stratifiée (remous)	7	4	
Affluent	3	2	+1
Autres**	1	2*	+1
Total	34	30	+4

Cette approche confirmatoire, bien que limitée à une seule rivière et sur quelques tâches froides, a permis de mettre en avant les éléments suivants :

- les tâches d'eau froides identifiées par IRT-a sont détectables en prospection de terrain ; la méthode apparaît donc fiable. De plus, même les tâches les plus petites détectées par l'IRT-a sont vérifiables sur le terrain (voir Encart 10) ;
- bien que la rivière Ouvèze soit un cas parmi d'autres, la majorité des habitats thermiques « froids » qui s'y trouvent étaient présents 1 an après la campagne initiale ; ces refuges potentiels sont donc résilients sur le moyen terme (tant que les conditions hydrologiques, hydrogéologiques et géomorphologiques ne changent pas significativement) ;
- la méthode IRT-a reste aveugle à tout ce qui se trouve sous la canopée, et ne détecte probablement qu'une fraction limitée des habitats thermiques « froids » profonds (i.e. fonction des conditions hydrauliques). Une prospection *in situ* sur les secteurs couverts où les probabilités de trouver de tels refuges sont élevées peut permettre d'améliorer leur recensement et donc le diagnostic fin des habitats thermiques de la rivière.

ENCART 10. DETECTION DES PETITES RESURGENCES SUR L'OUBEZE.

Malgré le colmatage du lit et la faible taille des résurgences, ces exfiltrations le long d'un banc alluvial végétalisé sur l'Ouvèze a pu être détecté par IRT-a (2019) et retrouvé en prospection pédestre (2020). En 2019, la tâche détectée avait une surface de 0,6 m² et un différentiel de température de 0,36°C. En 2020, l'écart de température mesuré était de 1,02°C. (Photo : B. Marteau, Juillet 2020).



L'Ain dans sa basse vallée

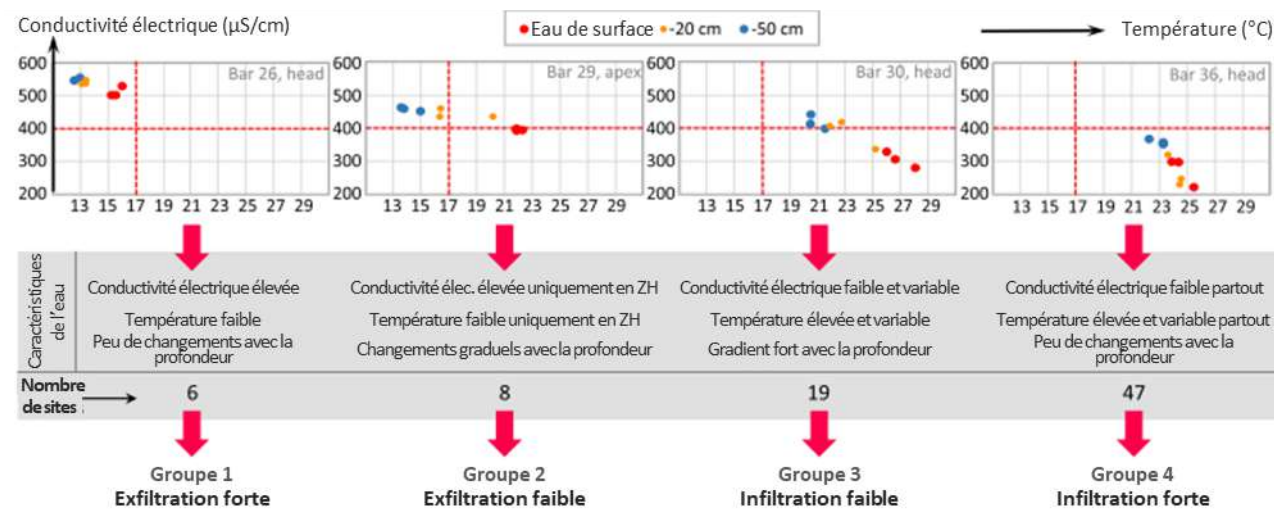
La dynamique des habitats thermiques de la basse vallée de l'Ain a fait l'objet d'un suivi particulier par le laboratoire EVS au milieu des années 2010. Dans ce cadre, deux méthodes de détection des échanges nappe-rivière ont été testées en 2014 : l'IRT-a et l'échantillonnage manuel du gradient hydraulique vertical (GHV, méthode d'après Baxter et al., 2003) associé à des mesures physico-chimiques (Encart 11). Alors que la méthode IRT-a est par définition non-spécifique (c'est-à-dire que l'ensemble de la zone d'étude a été imagée de la même manière), les mesures de GHV ne pouvaient pas être exhaustives. Le choix des stations de mesure a été guidé par les structures géomorphologiques du lit et les connaissances du site (pour plus de détails, se référer à l'article de Dole-Olivier et al. (2019)). Cette étude a mis en évidence 3 éléments principaux :

- la quasi-exhaustivité de la méthode IRT-a, tout en considérant les limites de l'outil (notamment visibilité du miroir, structurations en 3D, instantanéité de la mesure) a permis de détecter beaucoup plus de tâches d'eau froides que la prospection de terrain guidée par les formes du lit (44 des 57 tâches –soit 77%– détectées par IRT-a ont été manquées par la prospection pédestre) ;

- l'IRT-a n'identifie que les exfiltrations (i.e. échanges de la nappe vers la rivière), tandis que l'outil GHV permet d'identifier les infiltrations tout en apportant une valeur quantitative à ces échanges ;
- même les échanges les plus fins, c'est-à-dire répertoriés comme « exfiltrations faibles » par la méthode GHV, ont pu être observés sur les images thermiques.

ENCART 11. DE L'APPROCHE CONFIRMATOIRE A L'APPROCHE COMBINATOIRE

L'utilisation séparée des deux outils dans cette étude a montré les atouts de la méthode, et notamment au regard du nombre plus important de taches froides identifiées par l'IRT-a. Elle a aussi souligné l'intérêt de les utiliser de manière combinée pour une caractérisation plus fine des échanges nappe-rivière, l'IRT-a permettant de rapidement détecter un grand nombre de résurgences et de les localiser précisément, et la mesure GHV (+ physico-chimie) offrant la possibilité de quantifier ces échanges et d'en établir une classification telle que celle proposée par Dole-Olivier et al. (2019). * ZH = Zone hyporhéique.



5. PASSER DU DIAGNOSTIC AU PRONOSTIC, APPROCHES STATISTIQUE ET HYBRIDE

Cette section illustre l'utilisation des données IRT-a pour envisager des approches de modélisation permettant d'évaluer les risques d'échauffement. La première est statistique et propose une extrapolation de résultats acquis au niveau de tronçons à une échelle régionale. La seconde souligne l'intérêt des données IRT-a dans une approche physique permettant d'appuyer des modèles mécanistiques ayant une portée plus explicative (approche physique). Une fois de plus, ces exemples illustrent la complémentarité des approches et la façon dont elles peuvent être utilisées ensemble pour une meilleure compréhension des processus observés.

5.1. Modélisation prospective à l'échelle régionale

Lorsque le jeu de données IRT-a est construit autour d'une logique géographique (par exemple celle des hydroécorégions, Wasson et al., 2002), il est également possible de réaliser un exercice de modélisation à l'échelle de l'entité géographique pour prédire une ou plusieurs métriques d'intérêt. Ainsi, à la suite de l'étude menée au sein de la plaine de la Bresse et déjà évoquée précédemment (§3.2.2.2), une extrapolation à l'échelle de la plaine de la Bresse a été réalisée pour estimer le risque d'échauffement estival lié notamment à la présence de seuils et à la présence/absence de ripisylve, tout en incluant un ensemble de variables morphologiques susceptibles d'influencer le régime thermique des rivières (altitude, largeur, sinuosité, orientation, taille du bassin versant amont, pente, occupation du sol, etc.). Ce travail de modélisation est détaillé dans le rapport Marteau et al. (2020). Une variable de « risque d'échauffement estival » (Tm) a ainsi été déterminée à l'échelle de la plaine de la Bresse, à l'aide d'une modélisation de type GAM⁸. Cette modélisation spatiale a ensuite été représentée de manière cartographique pour en faire une interprétation géographique. Ce type de modèle est à mettre en lien avec la caractéristique des données utilisées en entrée, à savoir ici des données de température de surface acquises en période estivale à l'étiage. Ici, la carte permet de localiser les secteurs de la Bresse les plus susceptibles d'être soumis à une altération estivale des températures, et notamment les secteurs qui concentrent la majorité des obstacles à l'écoulement et des terres agricoles céréalières (nord-ouest et centre de la région), ainsi que la vallée de la Saône où se concentrent les grandes villes et les industries. A l'opposé, le Revermont (secteur nord-est) semble peu sujet au risque d'échauffement estival du fait de son altitude plus élevée et son couvert forestier. Le secteur des Dombes, recouvrant la partie sud de la région étudiée, présente également peu de risque d'échauffement estival. Dans les faits, ce secteur possède de très nombreux lacs et étangs et une nappe alluviale assez puissante.

Bien que le modèle utilisé puisse être amélioré, par l'ajout de nouvelles variables explicatives (ex. la géologie et l'hydrogéologie) ou d'interactions supplémentaires par exemple, le résultat produit permet déjà d'obtenir une information riche et utile pour appréhender les risques d'échauffement liés à l'altération thermo-hydraulique des cours d'eau de la région, et peut donc servir d'aide à la

⁸ GAM : Generalised Additive Model, Modèle Additif Généralisé. Modèle qui permet d'introduire des relations non-linéaires qui peuvent exister entre les variables explicatives et la variable à expliquer, et d'y introduire des paramètres de « lissage » qui viennent moduler l'effet de certaines variables en fonction d'une autre. Pour plus de détail, se référer à Jackson et al. (2018).

prise de décision pour les gestionnaires et les décideurs. De plus, il démontre l'intérêt que peut avoir l'IRT-a pour alimenter des modèles spatiaux plus complexes.

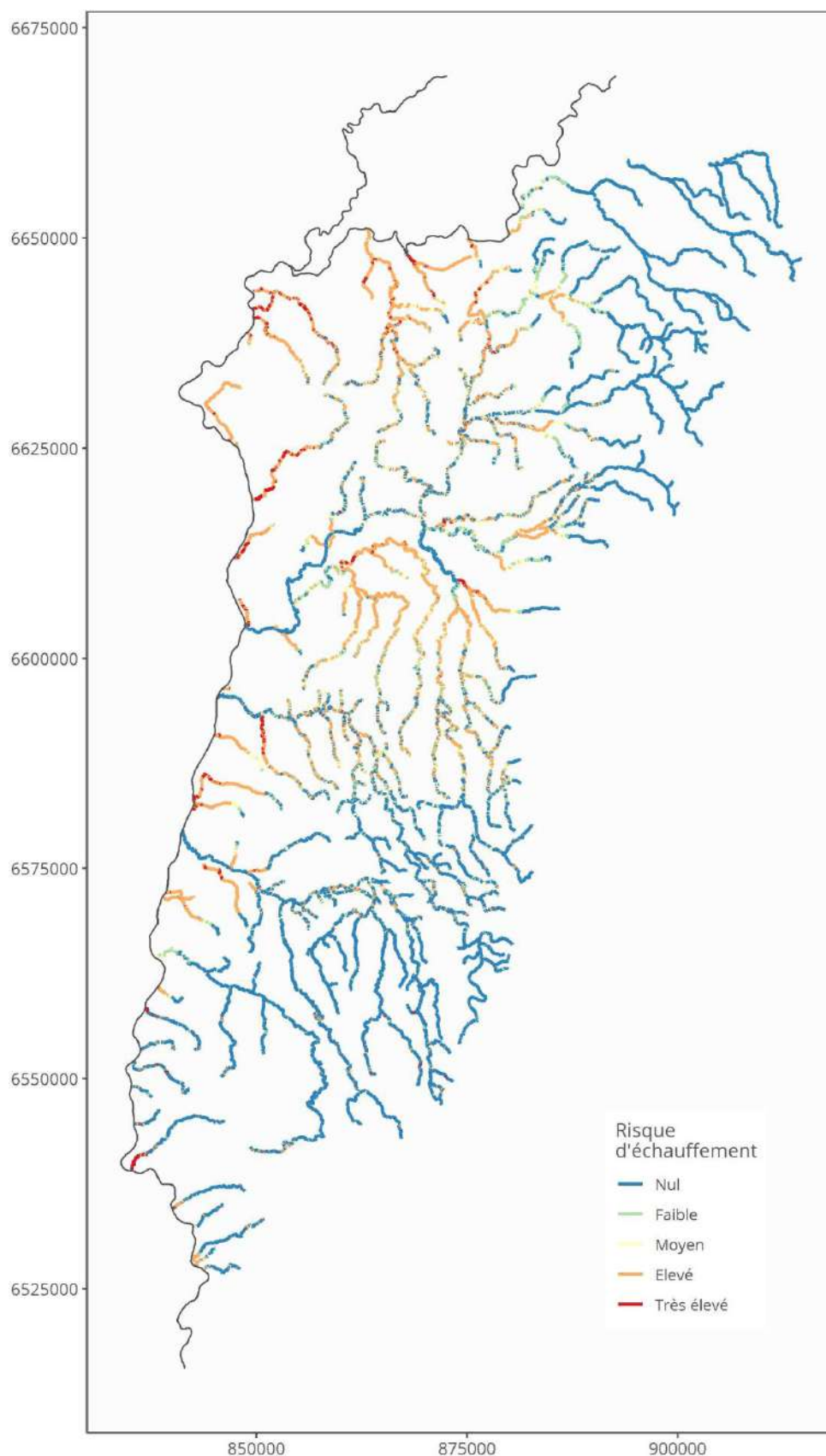


Figure 33. Cartographie du risque d'échauffement de la plaine de la Bresse résultant de la modélisation régionale à partir des données IRT-a collectées sur un échantillon de rivières de la région (HER Plain de la Bresse) (Source : Marteau et al. 2020a).

5.2. Approche physique fondée sur des données IRT-a

Les outils de télédétection deviennent généralement de plus en plus performants et accessibles. C'est le cas notamment du LiDAR⁹, qui permet d'obtenir un modèle numérique de surface (haut de la canopée) voire de terrain (sans la végétation) à haute résolution. Ces modèles qui représentent à la fois les formes du lit et les caractéristiques de la végétation peuvent servir à alimenter des modèles de température dits déterministes, c'est-à-dire construits sur les lois connues de la physique et de la thermodynamique qui régissent les échanges de chaleur entre l'eau de la rivière et son environnement. On retrouve dans ces modèles plusieurs compartiments, et notamment les effets du rayonnement solaire modulés par l'ombrage, les échanges eau-atmosphère à la surface du miroir, etc. L'une des composantes les plus difficiles à modéliser est l'interface eau-lit, et notamment les échanges avec la nappe. Lorsque ces échanges sont importants, comme sur les rivières à galets, ils peuvent considérablement en modifier le régime thermique. Dans cet exemple, ici sur l'Ain, Wawrzyniak et al. (2017) ont utilisé des données de température issues de l'IRT-a pour estimer les apports de nappe le long d'une section d'environ 20 km et ainsi améliorer les performances du modèle à base physique (Figure 34).

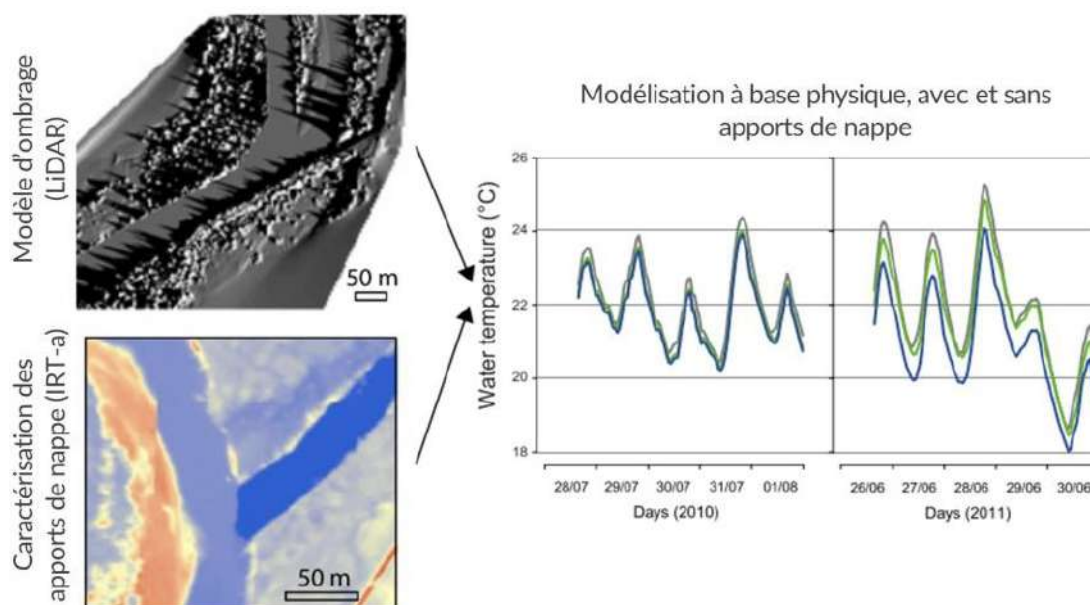


Figure 34. En combinant des données LiDAR (modélisation de l'ombrage) et des données IRT-a (quantification des apports de nappe) au sein d'une modélisation à base "physique", il est possible de simuler les dynamiques thermiques journalières de manière très précise (Source : Wawrzyniak et al. (2017)).

Grâce à cette combinaison d'informations, ils ont pu mettre en évidence le rôle relatif inversé de l'ombrage et des apports de nappes pour réguler la température de l'Ain sur un cycle journalier : l'ombrage est principalement effectif lorsque le soleil est au plus haut, tandis que l'importance relative des apports souterrains, qui restent stables au cours de la journée, se fait davantage ressentir la nuit. Ils ont également noté que l'importance des apports de nappe pouvait varier d'une période à une autre (ici effet moyen de $-0,11^{\circ}\text{C}$ en été 2010, contre $-0,68^{\circ}\text{C}$ en été 2011) en fonction notamment de la contribution des nappes au débit de la rivière (2,1% en 2010, 15,7% en 2011).

⁹ LiDAR : acronyme de « *Laser imaging, detection and ranging* », est une technique qui utilise le temps de retour nécessaire à un faisceau lumineux (laser) pour rejoindre l'émetteur pour mesurer la distance de l'objet qui l'a réfléchi.

6. CE QUE NE FAIT PAS L'IRT-A MAIS FONT D'AUTRES METHODES ET OUTILS

6.1. Les outils de base pour une acquisition locale

Comme décrit dans la partie 2 et illustré par les différents exemples de la partie 3, l'IRT-a est un outil parmi d'autres mais qui est rarement utilisé seul et qui ne convient pas à tous les environnements ni tous les objectifs d'étude ou de recherche. C'est un outil qui permet une approche spatiale de la question de la température des cours d'eau, voire des corridors fluviaux, mais dont les portées temporelle et tridimensionnelle sont limitées. Bien sûr, d'autres outils existent, qui sont connus de tous et plus fréquemment utilisés. D'autres encore le sont moins et leur utilisation reste pour le moment limitée à une utilisation de recherche. Cette partie du guide vise donc à présenter succinctement ces outils, en recensant quelques références pour permettre au lecteur de poursuivre d'éventuelles investigations.

6.1.1. Les sondes thermométriques

Outil indispensable de toute personne qui s'intéresse de près ou de loin à la température : le thermomètre. Pour des mesures ponctuelles ou synoptiques, le thermomètre « classique » peut suffire (thermomètres à plonger dans l'eau pour une lecture instantanée). Il est également utile lors de l'installation de thermomètres enregistreurs (aussi appelés thermographes) afin de valider l'emplacement choisi en fonction des objectifs de leur déploiement (ex. éviter les zones d'échanges nappe-rivière si suivi pluriannuel). En revanche, les sondes les plus largement utilisées sont les thermographes (Figure 35). Ceux-ci permettent de mesurer en continu la température à intervalle régulier, généralement entre 15 et 60 min, afin d'appréhender les dynamiques temporelles sur le site où ils sont installés. Il en existe de plusieurs sortes et plusieurs marques, avec des caractéristiques particulières. En France, les plus utilisés sont celles présentés sur la Figure 35 et le Tableau 6. De manière générale, tous ces enregistreurs possèdent des gammes d'enregistrement similaires et des paramètres de précision et de résolution du même ordre de grandeur. Lorsque les sondes sont installées en réseau et sur de longues périodes, il est indispensable de vérifier régulièrement leur positionnement (attention aux mises hors d'eau, au vandalisme, à l'enfouissement sous les sédiments, etc.), le niveau de batterie et de mémoire de stockage, ainsi que de corriger une éventuelle dérive de leur horloge interne (jusqu'à 1 min/mois sur certains modèles).

Depuis peu, des solutions de capteurs connectés se développent, permettant un suivi continu et en direct de certains paramètres dont la température (ex. Therm'eau, de la société SQUAMA). Ces derniers sont plus chers à l'achat et à l'utilisation (abonnement réseau/internet, forfait stockage des données en ligne, etc.) mais proposent des outils particulièrement utiles pour certaines applications (ex. suivi des passes à poissons), tels que des alertes lorsque des paramètres seuils sont atteints (température, niveau d'eau, oxygène, turbidité, etc.) ou lorsque la sonde dysfonctionne (vandalisme, passage d'une crue, batterie faible en hiver, valeurs aberrantes), ainsi que l'assurance de conserver la donnée en cas de perte du capteur (télétransmission en direct).



Figure 35. Illustration des enregistreurs de température les plus fréquemment utilisés. Les numéros associés se réfèrent au Tableau 6 et aux sources des photos ci-dessous :

- 1 : <https://www.gemindataloggers.com/fr/data-loggers/tinytag-aquatic2/tg-4100>
- 2 : <https://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/ua-001-64>
- 3 : <https://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/utbi-001>
- 4 : <http://www.fishsonic.com/English/Product/4213092554.html>
- 5 : <https://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/u22-001>
- 6 : <https://www.squama.fr/solutions>

Enfin, il est également impératif de s'assurer du bon fonctionnement des thermographes, quels que soient les modèles, avant leur déploiement sur le terrain et au moins une fois par an, par étalonnage, en suivant par exemple la méthode proposée par Dunham et al. (2005) (méthode dite « du bain de glace »). Leur installation en rivière doit également faire l'objet d'une réflexion et analyse de conditions locales afin de s'assurer de la représentativité de la mesure. Pour plus de détail, il est possible de se référer aux supports de la *Pêche aux outils scientifiques* organisée par le GRAIE et consacrée au thème suivant : *Réaliser le diagnostic thermique d'un cours d'eau par mesure physique*¹⁰. Parmi les supports d'intervention, l'un d'entre eux détaille ce qu'il faut faire et ne pas faire pour lors de l'installation d'un enregistreur en rivière.

Enfin, lorsque les données ont été relevées, une procédure de vérification est nécessaire pour s'assurer de la qualité des données, et ainsi éliminer les valeurs dites « erratiques ». Celles-ci peuvent être causées par des périodes hors d'eau ou d'enfouissement (à la suite de crues par exemple), ou à certains dysfonctionnements propres aux enregistreurs. Plusieurs stratégies existent pour « nettoyer » un jeu de données issu de sondes de température, qui a également fait l'objet de discussions lors de la *Pêche aux outils scientifiques* du GRAIE. Pour plus d'informations : <https://asso.graie.org/portail/peche-aux-outils4/>.

¹⁰ <https://asso.graie.org/portail/peche-aux-outils4/>

Tableau 6. Quelques caractéristiques des enregistreurs de température les plus fréquemment utilisés.

	Température de fonctionnement	Profondeur d'étanchéité	Mémoire de stockage	Résolution	Précision ¹	Temps de réponse ²	Batterie	Prix H.T. ³
	°C	m	Nb d'éch.	°C	°C	min	-	€
1 Tinytag Aquatic 2	-40 - +70°C	500 m	32 000	0.01	0.50	20	1 an - remplaçable	120
2 Hobo Pendant (U64)	-20 - +70°C	30 m	52 000	0.14	0.53	5	1 an - remplaçable	62
3 Hobo TidbiT v2	-20 - +70°C	300 m	42 000	0.02	0.21	5	> 5 ans - non remplaçable	132
4 VEMCO Minilog-II-T	-30 - +80°C	500 m	1 000 000	0.01	0.10	< 5	10 ans - non remplaçable	rupture
5 Temp Pro v2 (U22)	-40 - +70°C	120 m	42 000	0.02	0.21	5	> 6 ans - non remplaçable	127
6 Squama Therm'leau	-20°C - +60°C	25 m	transmission réseau/3G	0.01	0.10	< 5	panneaux solaires ⁴	1 000

¹ Généralement entre 0 et 50°C² Pour atteindre 90% dans l'eau³ Prix constaté sur internet⁴ Durée de vie estimée à 10 ans

6.1.2. Les cannes thermométriques

Les cannes thermométriques prennent la forme d'un tube en métal au sein duquel sont situés des capteurs de température, positionnés à intervalles réguliers (Encart 12). Elles peuvent être disposées au sein de la colonne d'eau, pour obtenir par exemple une information sur la dynamique de stratification verticale. Elles peuvent également être enfoncées dans la matrice sédimentaire pour étudier les échanges qui se font au sein des berges ou au fond du lit (Figure 36). Ici, la température est utilisée comme « traceur » pour pouvoir déterminer les flux au sein de la zone hyporhéique, en fonction de paramètres tels que la porosité, la conductivité thermique ou encore la dispersivité thermique des sédiments (Le Lay, 2019).

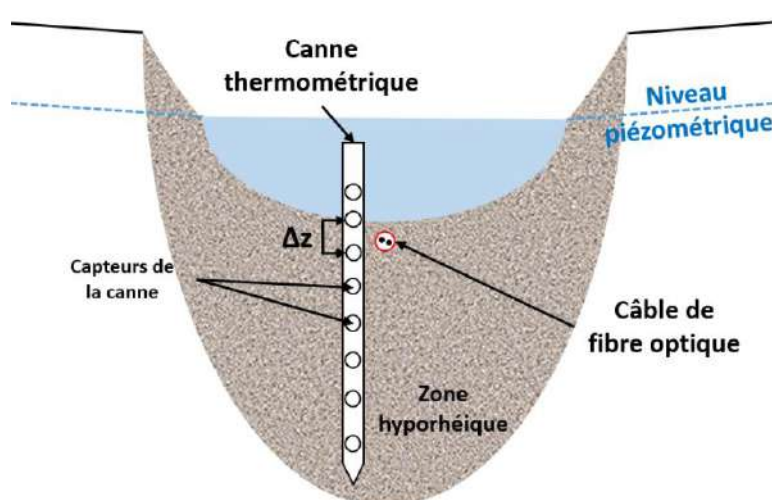


Figure 36. Schéma d'installation d'une canne thermométrique dans le lit de la rivière pour quantifier les échanges hyporhéiques. Dans cette étude, les cannes thermométriques ont été combinées à la fibre optique (voir § ci-dessous) pour une « cartographie » en 3D des échanges au sein de la zone hyporhéique (Source : Le Lay, 2019).

ENCART 12. CANNES THERMOMETRIQUES : DU MODELE SIMPLE AU MODELE EXPORT.

Il existe plusieurs modèles de cannes thermométriques disponibles sur le marché. Par exemple, Le Lay et al. (2019b) ont utilisé le modèle RS 485 (UIT, Dresden, photo ci-contre) capable de mesurer entre -20 et 50°C, avec une résolution de 0,03°C et une précision de 0,1°C pour une longueur de 66 cm. Dans leur étude, ils expliquent également avoir utilisé un système plus simple, constitué d'une colonne de thermomètres installés dans un tube PVC crépiné à la hauteur de chaque enregistreur pour permettre à l'eau de circuler.



(Crédit : H. Le Lay, 2019)

6.1.3. La fibre optique

La technologie de mesure de température par fibre optique, appelée « DTS » (pour Distributed Temperature Sensing) est basée sur l'utilisation d'impulsions électriques lumineuses pour détecter des changements dans les propriétés de ces impulsions, et ainsi déterminer une valeur de température. Cette technologie est fréquemment utilisée dans le domaine industriel, par exemple le contrôle des pipelines de gaz et des barrages hydro-électriques, la protection incendie des parkings souterrains ou des réservoirs d'hydrocarbures, etc. Depuis une quinzaine d'année, elle est également utilisée pour des applications de recherche en hydrogéologie (Tufillaro et al., 2008). La fibre optique DTS permet un échantillonnage spatial et temporel fin (jusqu'à 0,50 m et 1 sec pour les meilleurs outils, Le Lay, 2019) avec une haute précision (jusqu'à 0,01°C). La fréquence d'échantillonnage dépend notamment de la longueur du câble utilisé, puisqu'elle est limitée à un nombre maximal de points qu'elle peut traiter simultanément. Ainsi, Westhoff et al. (2007) ont pu mesurer la température tous les 1,5 m à un pas de temps de 2 min sur 1 500 m ; Le Lay et al. (2019a) ont échantillonné sur 620 m à un pas de temps de 40 min et une résolution de 0,25 m, etc.

La fibre optique est très utile pour localiser précisément les zones d'échanges avec la nappe, ou certaines anomalies thermiques particulières (e.g. Westhoff et al., 2007). Elle permet notamment de mesurer certains processus qui sont délicats à identifier par d'autres méthodes, comme la conduction des sédiments par exemple (Figure 37) (O'Donnell Meininger & Selker, 2015). Une partie des échanges thermiques en rivière se fait à l'interface eau-sédiments, mais celle-ci est fréquemment négligée ou simplifiée dans les modèles car difficile à quantifier. Pouvoir la quantifier à l'aide d'outils de mesure permet de combler ces manques de connaissance.

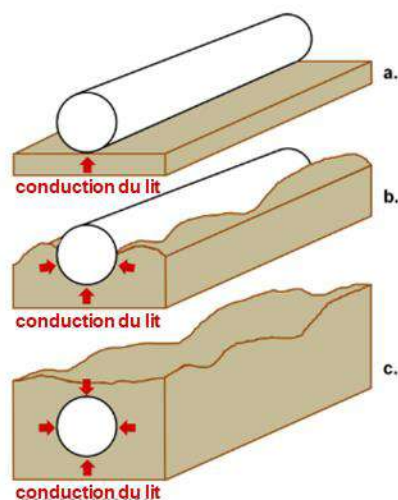


Figure 37. Illustration des scénarios d'installation possibles de la fibre optique pour mesurer la conduction thermique du lit (Source : O'Donnell Meininger et al. (2015)).

En revanche, plusieurs paramètres font de la fibre optique un outil difficile à utiliser sur le terrain. D'un point de vue logistique, son installation sur plusieurs centaines de mètres est fastidieuse (déploiement et maintien en place au fond du lit, Encart 13) et nécessite une installation électrique, un abri sécurisé et des bains de calibration. Enfin, le post-traitement des données est une tâche qui requiert une formation scientifique particulière (maîtrise des équations de physique et de thermodynamique, e.g. Hausner et al., 2011) et qui peut être longue à acquérir. C'est pourquoi l'utilisation de cet outil s'est globalement limitée au domaine de la recherche, sur des systèmes plutôt de petite taille (rang de Strahler 2 à 3, Lay et al., 2019b), voire dans des canaux en laboratoire (Le Lay et al., 2020). Son potentiel d'opérationnalité est donc faible et son coût total (investissement, manutention et traitement de la donnée) peut être prohibitif.

ENCART 13. DEPLOIEMENT DE LA FIBRE OPTIQUE DTS SUR LE TERRAIN.

Le déploiement de la fibre optique sur le terrain (photo de gauche) et la logistique autour de son installation (photo de droite) sont des freins à son utilisation à plus large échelle (Crédit : H. Le Lay, 2019).

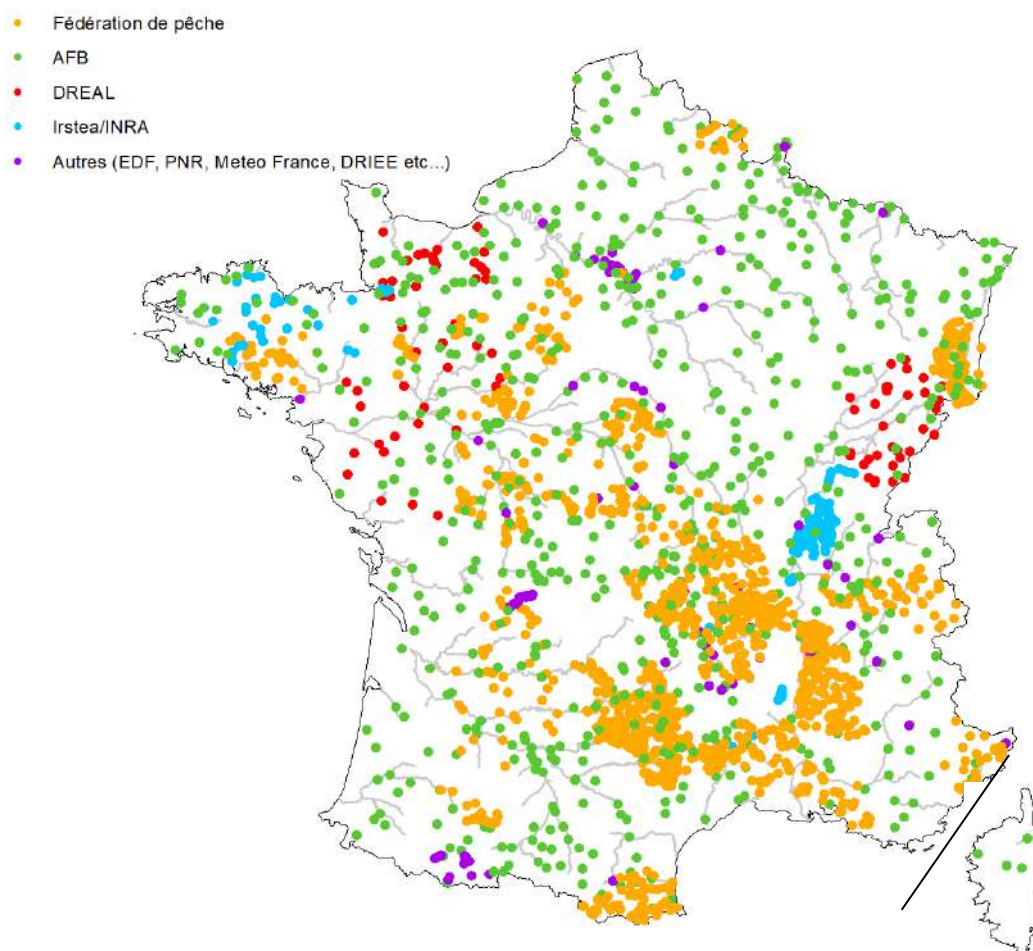


6.2. Les réseaux de sonde à l'échelle des grands bassins

Les réseaux de thermographes déployés à l'échelle régionale voire nationale sont des sources d'information indispensables pour comprendre les dynamiques thermiques à large échelle. La construction d'un tel réseau a été initiée en 2008 à l'échelle nationale en France par l'OFB¹¹. Ceci a permis de suivre la température sur l'ensemble du territoire pendant quelques années (Encart 14).

ENCART 14. DES RESEAUX DE SUIVI HETEROGENES A L'ECHELLE NATIONALE ([HTTPS://THERMIE-RIVIERES.INRAE.FR](https://thermie-rivieres.inrae.fr))

Dans leur rapport à l'OFB/INRAE, Beaufort et al. (2020) ont utilisé un jeu de données à l'échelle nationale construit sur les stations de mesure qui leur ont été mises à disposition. Parmi ces 2700 stations, 60% proviennent des fédérations de pêches, et 24% sont issues du Réseau National Température (RNT) mis en place par l'OFB en 2008. Cette figure illustre à la fois les dynamiques locales qui peuvent exister, les fortes disparités régionales en termes de qualité de suivi, et reflète également la difficulté de maintenir dans le temps et de mutualiser ce genre de bases de données à l'échelle nationale (Beaufort, Moatar, & Sauquet, 2020).



Ces données peuvent notamment servir à valider des modèles, qu'ils soient à base physique ou statistique, qui permettent à la fois d'étudier les dynamiques passées et de se projeter vers des

¹¹ OFB : Office Français pour la Biodiversité. Né en 2020 de la fusion entre l'ONCFS et l'AFB, lui-même appelé ONEMA lors de la mise en place du RNT.

scénarios futurs (Seyedhashemi et al., 2022). Le modèle T-NET par exemple, est un modèle à base physique qui a été appliqué sur le bassin de la Loire (Beaufort et al., 2016; Loicq et al., 2018; Seyedhashemi et al., 2022, 2023). Il a permis de reconstruire des événements particuliers pour en comprendre les mécanismes (ex. été froid de 2002, canicule de 2003, crues de l'été 1992 et de l'hiver 2003, etc.) et de simuler l'impact du changement climatique et hydrologique jusqu'en 2100.

Des approches géostatistiques construites sur ces réseaux de thermographes à large échelle ont permis d'identifier des métriques de température illustrant l'influence des grands barrages et des petits seuils sur ce même bassin de la Loire (Seyedhashemi et al., 2021). Une approche similaire menée récemment à l'échelle nationale a abouti à la reconstitution de deux métriques extrêmes (Figure 38) et à la classification des régimes thermiques en 4 grands ensembles, offrant ainsi une base solide pour l'interprétation des observations faites à une échelle plus locale au sein d'un contexte national bien défini (Beaufort et al., 2022; Beaufort, Moatar, & Sauquet, 2020).

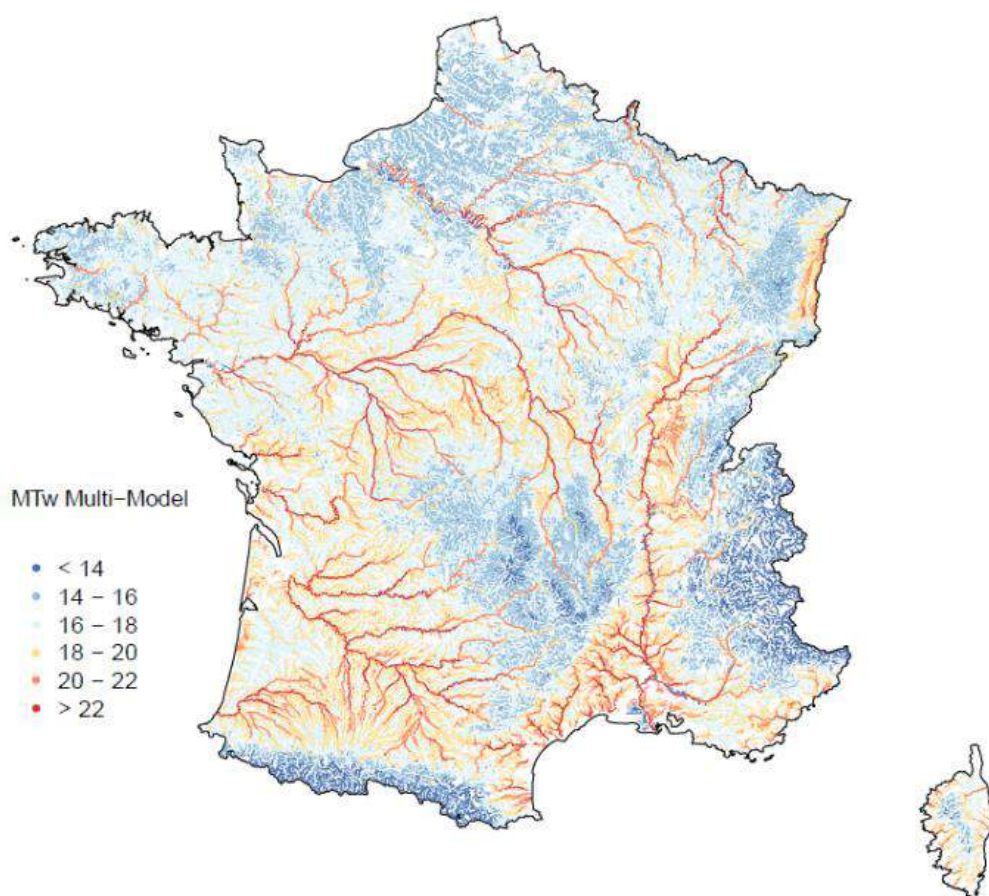


Figure 38. Reconstitution statistique de la moyenne des 30 jours consécutifs les plus chauds (2009-2018). Beaufort et al., (2020) (<https://thermie-rivieres.inrae.fr>).

Enfin, sur les bassins où les réseaux sont quasi-inexistants, il est possible de les construire de manière optimisée en suivant certaines stratégies d'installations telles que celle proposée par Daigle et al. (2017). Testé à l'échelle du département de la Haute-Savoie, et optimisé pour répondre aux enjeux liés à une espèce cible (ici : la truite), le modèle proposé par les auteurs est construit sur quelques variables physico-climatiques permettant d'optimiser l'installation des thermographes en réseau cohérent : la température moyenne annuelle de l'air, l'altitude, le pourcentage de terres agricoles, la superficie du bassin versant et la pente au niveau de la station. A noter également que d'autres modèles existent dans la littérature scientifique, construits généralement à des fins plus hydrologiques.

6.3. Les données d'archives

Certaines stations de mesure de la température existent depuis de nombreuses années, avec des chroniques de mesure allant jusqu'à plusieurs dizaines d'années, bien qu'elles ne soient pas initialement installées dans le but de fournir une information à des fins scientifiques. Deux exemples sont présentés ici, qui ont fait l'objet d'exploitations différentes ; le premier est issu des mesures réglementaires des opérateurs de centrales nucléaires en France (EDF) dont le lien a été fait avec des indicateurs hydrobiologiques, tandis que le deuxième est issu des stations de jaugeage des rivières belges où la température est mesurée comme sous-produit, afin de calculer des hauteurs d'eau avec précision, mais dont l'exploitation à l'échelle régionale a permis d'identifier des dynamiques différentes le long du réseau hydrographique.

6.3.1. Exploitation de bases de données réglementaires

Certains acteurs de l'eau sont tenus de mesurer la température à des fins réglementaires. C'est le cas par exemple des exploitants des centrales nucléaires, qui doivent connaître la température à l'amont d'une centrale pour s'assurer que le rejet à l'aval corresponde aux normes imposées. Le parc nucléaire français ayant été construit à partir de la fin des années 1970, ces données d'archives offrent des chroniques temporelles uniques bien qu'elles restent limitées dans l'espace. C'est ce type de données qui a permis à Maire et al. (2019) de mettre en évidence un échauffement général des grandes rivières de France (Figure 39). Sans chercher à caractériser des guildes d'espèces en fonction de leurs tolérances thermiques, ils ont montré que la majorité des espèces, notamment natives, ont une tendance à s'installer plus en amont sur ces grandes rivières (Figure 39). Cette tendance a également été observée pour d'autres organismes, et bien que le lien soit parfois difficile à démontrer de manière statistique, ces tendances sont généralement attribuées au réchauffement généralisé des masses d'eau causé par les changements globaux.

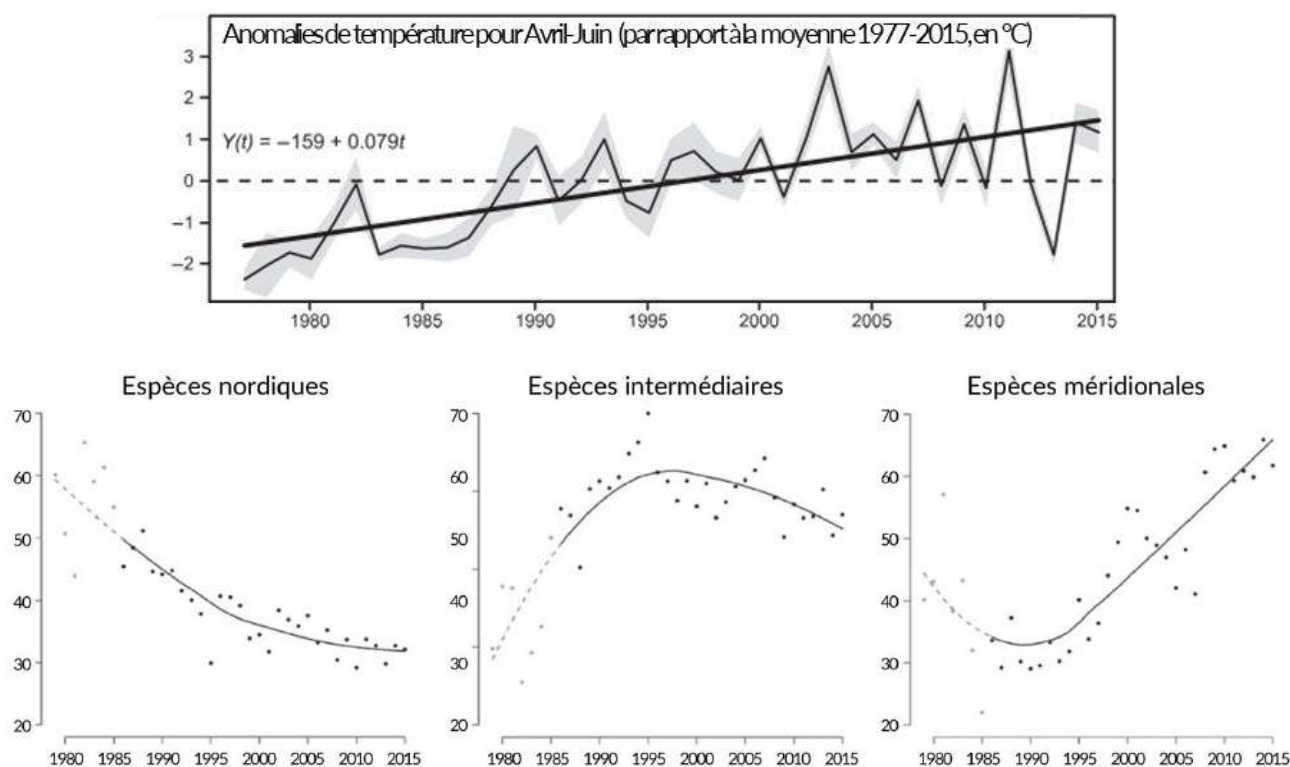


Figure 39. Tendance générale observée pour la température des grandes rivières (haut), et modélisation de l'évolution des espèces classées comme nordiques, intermédiaires et méridionales au cours du temps (Source : Maire et al. (2019)).

6.3.2. Exploitation de bases de données auxiliaires

En plus des réseaux de suivi existants de la température, certains réseaux de suivi enregistrent la température comme « donnée auxiliaire », c'est-à-dire comme donnée permettant de calibrer une sonde ou corriger une mesure. C'est le cas notamment de certaines sondes de hauteur d'eau, installées sur des stations de jaugeage et utilisées pour le suivi hydrologique des cours d'eau (e.g. Ferchichi & St-Hilaire, 2023; Georges et al., 2020). L'étendue des réseaux de stations de jaugeage existants dans certains pays offre des perspectives intéressantes pour l'exploitation d'un tel jeu de données à l'échelle régionale. Ainsi, Georges et al. (2020) ont pu étudier les dynamiques thermiques à l'échelle du réseau hydrographique sur l'ensemble de la Wallonie. Les auteurs ont également pu faire le lien avec le *preferendum* thermique d'une espèce cible (ici : la truite commune) afin de définir les secteurs où la température est un facteur limitant pour cette espèce (Figure 40) (Georges et al., 2020).

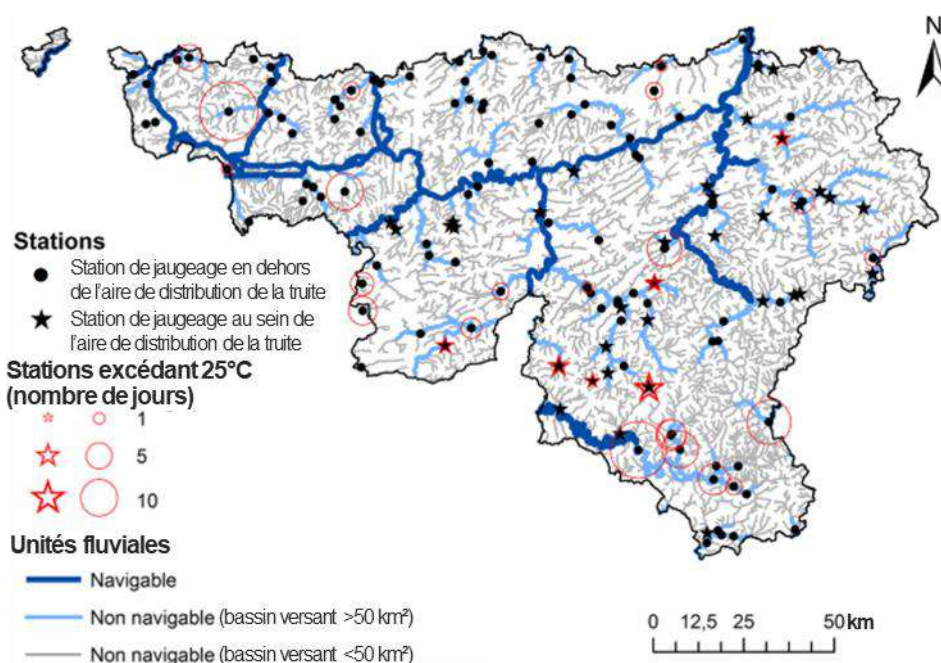


Figure 40. Carte des stations de mesure de la température issues du réseau de jaugeage, et résultats de l'analyse de ces données en lien avec la biologie de la truite commune européenne (*Salmo trutta*, L. 1758) en Wallonie, Belgique (Source : traduit de Georges et al., 2020, Figure 9).

7. QUEL OUTIL CHOISIR POUR QUELLE QUESTION ?

Ce guide méthodologique a été construit autour de l'outil IRT-a, et les nombreux exemples présentés démontrent de la pluralité des questions auxquelles il permet de répondre. Mais la dernière partie de ce guide a aussi montré que d'autres outils sont disponibles, qui sont soit mieux adaptés à certaines situations ou problématiques, soit complémentaires les uns des autres. Cependant, tous ont leurs avantages et leurs inconvénients. La liste de recommandations proposées ici est destinée à guider le lecteur vers le choix d'un ou plusieurs outil(s) mais n'a pas vocation à fournir une solution définitive à une problématique donnée.

7.1.Des outils et méthodes complémentaires

De manière générale, toute personne ayant cherché à caractériser un phénomène particulier ou à réaliser un suivi de température s'est confronté à la réalité du terrain, qui veut que la formule « une question = une solution » n'existe pas. Les différents outils disponibles pour étudier la température des cours d'eau sont de nature complémentaire, notamment parce qu'ils permettent de travailler à des échelles spatiales et temporelles différentes (Figure 41). Et de fait, les questions que l'on se pose en lien avec la caractérisation de la thermie des cours d'eau s'appliquent à différentes échelles, à la fois dans le temps et dans l'espace (voir Figure 7).

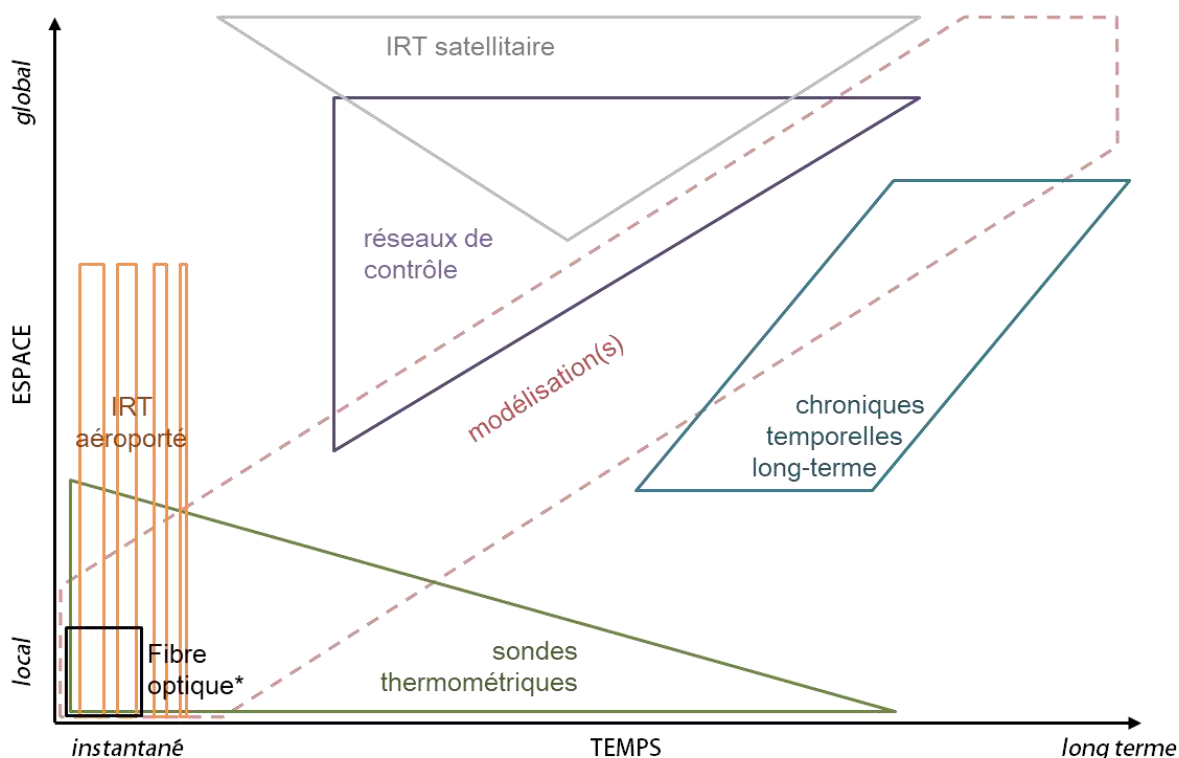


Figure 41. Positionnement théorique des principaux outils présentés dans ce guide sur cette matrice dimensionnelle « espace-temps », qui reflète la complémentarité des outils et méthodes pour couvrir l'ensemble du spectre des enjeux liés à la thermie des cours d'eau.

L'intérêt d'une approche multi-outil est d'autant plus probant que la majorité des hydrosystèmes sont aujourd'hui soumis à des pressions multiples (urbanisation, rejets industriels, agriculture, seuils

et moulins, pompage, etc.). De plus, les changements globaux viennent désormais modifier la façon dont ces pressions influencent le fonctionnement des cours d'eau, mais aussi la façon dont nous sommes capables de les déceler et de les séparer. Les besoins d'outils innovants, ou l'adaptation d'outils existants à des situations nouvelles et à des enjeux qui évoluent, vont s'accélérer à mesure que les problématiques liées à la thermie des cours d'eau se complexifient.

Il ressort de ce guide que l'IRT-a permet de répondre à de nombreuses questions de l'ordre du spatial. Cette approche géographique de l'étude distribuée des températures de surface apparaît comme un outil de diagnostic exploratoire performant (haute résolution spatiale, haute précision de la mesure) et applicable à de nombreux cas de figure, notamment pour appréhender les situations à risques. Il gagnera à s'inscrire plus largement dans une stratégie de recherche d'une compréhension globale du fonctionnement thermique d'une rivière, préalable à la mise en place de réseaux de suivi plus localisés ou d'instrumentation spécifique pour une meilleure appréhension de phénomènes particuliers. La complémentarité de l'IRT-a avec les autres outils s'inscrit donc également dans la chronologie de leur utilisation potentielle. Par exemple, l'étude des profils longitudinaux de température des cours d'eau de la Bresse (§3.2.2.2), qui a mis en évidence des gradients d'altération thermo-hydraulique avec pour conséquence de modifier le rôle joué par l'ombrage de la ripisylve pour limiter l'échauffement estival, a mis en évidence l'intérêt d'affiner les connaissances sur les cycles de stratification thermique que se mettent en place dans les retenues. Ceci pourrait se faire grâce à l'utilisation de thermographes installés en colonnes ou de cannes thermométriques, couplées par exemple à un exercice de modélisation hydraulique autour du seuil étudié.

Pour guider ces choix, il existe des phases préalables indispensables, et notamment :

- La définition d'objectifs clairs et précis ;
- L'inventaire des données déjà existantes ;
- L'inventaire du matériel déjà disponible et des ressources mobilisables.

7.2. Approche spatiale ou temporelle : faut-il choisir ? Définir des objectifs précis

Comme démontré précédemment, chaque outil s'inscrit dans une logique d'approche spatiale ou temporelle qui lui est propre. Le choix de l'un ou de l'autre devra donc se faire notamment en fonction des objectifs de l'étude (Figure 42).

7.2.1. Les thermographes : éléments de base de la boîte à outils

Les enregistreurs de température sont les plus utilisés pour l'étude de la thermie des cours d'eau, et à raison : ce sont des éléments indispensables. Il existe de nombreux modèles avec des caractéristiques différentes, dont le choix revient à l'opérateur suivant la précision voulue et le nombre de capteurs désirés en fonction du budget disponible. Ils permettent de répondre à une large gamme de problématiques, qui pourront être abordées différemment selon le protocole d'échantillonnage choisi et les outils de traitement disponibles/exploités :

- Une caractérisation longitudinale pourra être approchée en installant des thermographes sur le linéaire choisi (ex.1 tous les 2 à 10 km) ;

- A l'échelle d'un petit bassin, il est également possible de construire un plan d'échantillonnage autour de la caractérisation des différents affluents ainsi que du cours principal en quelques localisations stratégiques ;
- Si le nombre de thermographes disponibles est suffisant, une approche ciblée telle que celle proposée par Daigle et al. (2017) sera pertinente (basée sur une espèce cible) ;
- Lorsque des enjeux particuliers sont déjà connus, les thermographes peuvent être placés en série pour capturer l'influence de ces enjeux, comme par exemple amont-aval de seuils ou barrages, de plans d'eau, de rejets (stations d'épuration, centrales), etc.
- Les thermographes peuvent également être placés en colonne afin d'appréhender des phénomènes en 3 dimensions : par exemple dans la retenue d'un barrage ou seuil (stratification thermique), à différentes profondeurs au sein de la matrice sédimentaire (échanges hyporhéiques), dans et en dehors de refuges thermiques avérés, etc.
- Ils sont indispensables pour la correction et/ou validation des mesures réalisées avec d'autres outils (IRT-a, fibre optique) ;
- Enfin, leur installation est facilitée après un diagnostic de type IRT-a (voir ci-dessous).

Le protocole d'échantillonnage doit également être défini en termes de période, fréquence et durée. La plupart des suivis à moyen et long terme se font au pas de temps horaire sur l'ensemble de la saison, et si possible sur plusieurs années. C'est sur ce genre de chroniques que peuvent être calculés des indices spécifiques, soit de nature statistique ou « hydrologique », soit de nature « biologique » en lien avec un espèce cible (ex. périodes propices au développement de la Maladie Rénale Proliférative (MRP) chez les salmonidés). Pour des objectifs plus précis, comme la mesure

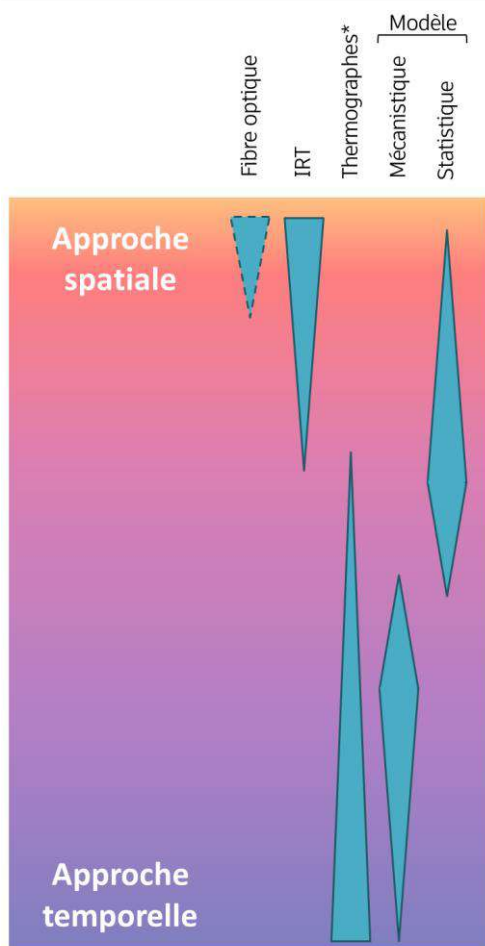


Figure 42. Le choix d'un ou de plusieurs outils pour étudier la thermie d'un cours d'eau se fait généralement le long d'un gradient virtuel entre les approches spatiales et les approches temporelles. Le choix de l'un ou l'autre des outils, voire leur combinaison, passe par la définition d'objectifs précis en amont et l'optimisation des ressources disponibles pour mener à bien cette étude.

des processus de stratification/dé-stratification en amont d'un seuil, la fréquence de mesure pourra être plus élevée (1/2h ou 1/4h) mais la durée plus limitée (ex. quelques jours ou semaines). Enfin, lorsque l'objectif est de calibrer d'autres outils, comme une campagne IRT-a par exemple, alors la fréquence de mesure sera encore plus élevée (~5 min) mais la durée très courte (quelques heures).

7.2.2. L'IRT-a pour un diagnostic exploratoire

A cause de la résolution souvent grossière des images, l'IRT satellitaire n'est que peu applicable aux rivières de France. Wawrzyniak et al. (2012) ont utilisé des images Landsat 7 avec une résolution de 60 m sur le Rhône entre 1999 et 2009, avec quelques résultats intéressants sur les secteurs les plus larges mais avec de nombreuses « zones blanches », notamment au niveau des bypass des centrales hydroélectriques et des affluents. Pour tout fleuve plus étroit que le Rhône, il n'existe pas à l'heure actuelle de données satellites exploitables dans le domaine de l'infrarouge thermique.

L'IRT-a, en revanche, peut être adapté aux besoins de résolution des images et de longueur de cours d'eau à analyser, en modulant le choix du capteur et du vecteur (voir première partie du guide). Il offre la possibilité de rapidement obtenir une cartographie des températures de surface sur un linéaire allant jusqu'à plusieurs dizaines de km. En choisissant correctement la période (été ou hiver) et la fenêtre de vol (après-midi ou matin), les contrastes de température observés à la surface de la majorité des cours d'eau sont représentatifs de ceux de la colonne d'eau. Des difficultés supplémentaires apparaissent lorsque la rivière est fortement recouverte par la végétation riparienne, ou par la végétation flottante à la surface. Comme présenté au début du guide, les résultats obtenus peuvent être interprétés à plusieurs niveaux ; par lecture et interprétation visuelle des contrastes de couleur (et donc de température) à l'aide d'un logiciel de visualisation d'images ou de SIG, par détection semi-automatique des taches d'eau froide (en été) et l'extraction du profil longitudinal de température, par la classification typologique des taches froides et l'analyse statistique des composantes thermiques longitudinales, jusqu'à la combinaison avec des d'autres jeux de données (géomorphologiques, écologiques, physicochimiques, géographiques, etc.) pour étendre l'exploitation des résultats et en alimenter l'interprétation. De manière générale, l'IRT-a offre de précieuses informations et observations sur des phénomènes plus ponctuels ou des problématiques locales qui peuvent ensuite être abordées grâce à d'autres outils dans le cadre d'études plus détaillées. Son utilisation comme outil de diagnostic exploratoire sera amenée à s'étendre dès lors qu'il sera plus connu et accessible au monde opérationnel de la gestion des cours d'eau.

7.2.3. Les cannes thermométriques et la fibre optique pour l'étude de processus fins

Ces deux outils sont différents mais leurs usages se rapprochent : tous deux permettent d'obtenir une information fine, du point de vue à la fois spatial et temporel, sur des échanges à petite échelle. Ainsi, les cannes peuvent être utilisées pour étudier les phénomènes de stratification/dé-stratification dans des retenues peu profondes, ou pour appréhender les processus d'exfiltration et d'infiltration au sein d'une berge, de la zone hyporhéique ou d'un banc alluvial. Les cannes peuvent également être remplacées par des thermographes montés en série au sein d'un tube PVC crépiné.

La fibre optique est plus délicate à déployer et nécessite des compétences et des outils très spécifiques pour être exploitée. Son utilisation à plus large échelle et sa transmission vers le monde opérationnel n'est pas anticipé par les chercheurs qui sont amenés à l'utiliser pour leurs études.

Néanmoins, elle peut permettre de répondre à des questions spécifiques, notamment en ce qui concerne les interactions eau-sédiment.

7.2.4. L'analyse statistique pour aller au-delà des observations

Les données de température, quel que soit l'outil utilisé, peuvent être exploitées de plusieurs manières : elles peuvent servir à une description ou une comparaison simple, sur la base de quelques graphiques ou quelques métriques cibles ; elles peuvent aussi faire l'objet de traitements statistiques plus poussés, avec le calcul de métriques générales (voir par exemple les propositions présentées lors de la pêche aux outils scientifiques du GRAIE, §6.1.1 du guide et <https://asso.graie.org/portail/peche-aux-outils4/>) ou encore avec l'utilisation d'outils plus spécifiques, conçus pour calculer des métriques biologiques et orientées vers des espèces cibles (ex. l'outil MACMA Salmo pour la truite, <https://www.pechehautesavoie.com/telechargement/etude-et-publications/outils-et-methodologies/>). Enfin, les données peuvent servir à alimenter et/ou tester différents types de modèles dont quelques-uns sont présentés ci-dessous.

7.2.5. La modélisation physique (ou mécanistique) pour découper les composantes thermiques et simuler le futur

La modélisation dite « physique » ou « mécanistique » est construite autour de la connaissance que nous avons des processus qui gouvernent les dynamiques thermiques des cours d'eau. La température de l'eau, à chaque pas de temps et dans un sous-tronçon donné, est le résultat des bilans énergétiques à l'interface eau-air (ensoleillement, température de l'air, précipitations, vitesse et direction du vent, etc.) et à l'interface eau-sédiment (échanges hyporhéiques, conduction, apports phréatiques), auxquelles viennent s'ajouter les conditions advectives (profondeur, vitesse) et les conditions environnementales (ombrage orographique, de la ripisylve). Chaque élément de l'équation générale doit donc être résolu (lorsqu'il n'est pas négligé si certaines conditions particulières sont prédéfinies) sur la base de formules physiques qui régissent ces interactions (conduction, convection, évaporation, condensation, radiations solaires). Ces modèles nécessitent des données de « forçages » atmosphérique, de géométries hydrauliques et de conditions hydrauliques pour pouvoir être utilisés, mais ils permettent de modéliser de manière assez précise les échanges d'énergie et donc les variations de température à différentes échelles temporelles (horaire, journalière) et spatiales (locale, rivière ou régionale). Ils permettent ainsi de pointer le ou les facteurs qui sont potentiellement responsables de différences entre les observations et les résultats de la modélisation et ainsi d'identifier d'éventuelles problématiques spécifiques au cours d'eau étudié (ex. problème d'ombrage, présence/absence d'apports de nappe, altérations hydrauliques, etc.). C'est ainsi que Wawrzyniak et al. (2017) ont pu estimer l'amélioration qu'apportait la quantification des échanges nappe-rivière par l'IRT-a sur les résultats de la modélisation physique.

L'un des intérêts de ces modèles réside dans leur capacité à simuler des conditions futures en fonction de scénarios climatiques et hydrologiques (Seyedhashemi et al., 2023). Une large gamme de modèles existe dans la littérature, mais avec peu de modèles couplant hydrologie et thermie (Dugdale et al., 2017). Un tel couplage est à l'étude entre les modèles spatialisés J-2000 (Branger et al., 2016) et T-NET (Beaufort et al., 2016) afin d'étudier l'impact du changement climatique dans le bassin de la Saône (équipe RiverLy, INRAE, travail en cours). Un travail similaire a été réalisé sur le bassin de la Loire. Les simulations passées (1963-2019) et les projections hydrologiques thermiques

futures jusqu'en 2100 sont accessibles en téléchargement au pas de temps journalier, pour les 55 000 tronçons de rivières qui composent le bassin de la Loire (Seyedhashemi et al., 2023).

7.2.6. La modélisation (géo)statistique pour analyser son cours d'eau au regard de grands ensembles

Plusieurs types de modèles statistiques et géostatistiques (c'est-à-dire qui considèrent les liens spatiaux entre les points du modèle) sont utilisés dans la littérature. De manière générale, ils reposent sur la prédiction d'une ou plusieurs métriques de température (ex. température moyenne journalière) sur des sites où la température n'est pas connue, à partir de variables environnementales connues pour affecter la température. Pour cela, le modèle est construit à partir de ces mêmes variables environnementales collectées sur des stations où des chroniques de température sont disponibles. L'utilisation de tels modèles se justifie lorsque le jeu de données

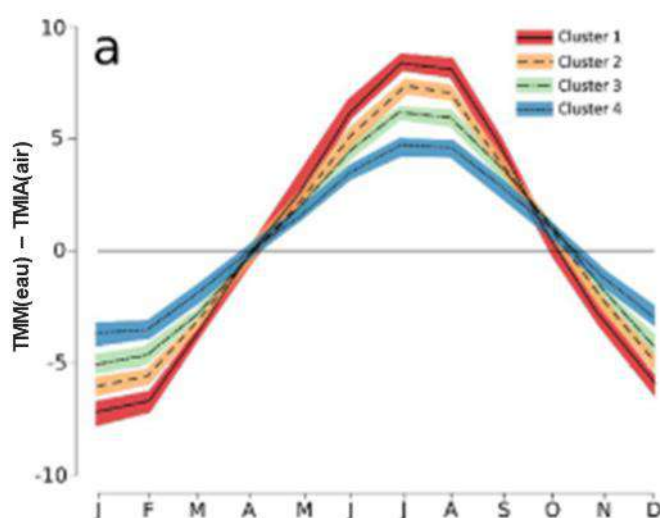


Figure 43. Illustration de la différence entre les 4 régimes thermiques déterminés par Beaufort et al. (2020), ici représentée par la différence entre la température moyenne mensuelle de l'eau et la température moyenne interannuelle de l'air. (Source : Beaufort et al. (2020)).

d'entraînement est suffisant et que l'échelle d'intérêt est relativement grande (temporellement : métrique journalière ou hebdomadaire ; spatialement : échelle du réseau hydrographique d'un moyen ou grand bassin). En revanche, l'utilisation de résultats existants peut permettre de replacer son site d'étude au sein de contextes régionaux ou typologiques facilitant l'interprétation des observations. C'est à cette fin que Beaufort et al. (2020) ont classé les cours d'eau en 4 grands régimes thermiques (Figure 43) qu'il est possible de déterminer en étudiant la relation entre la température de l'eau et la température de l'air. A la suite de cette étude, un outil en ligne a été développé pour voir les résultats des différentes stations utilisées dans l'analyse et identifier directement les caractéristiques de certains cours d'eau (<https://thermie-rivieres.inrae.fr/>).

7.3. Réaliser l'inventaire des données, du matériel et des ressources à disposition

Les différents outils sont dans l'ensemble complémentaires et non pas en concurrence ; il n'existe pas de solution spécifique à une question donnée. De plus, le choix final d'un outil ou d'une méthode est parfois également motivé par des aspects plus terre à terre, notamment techniques et budgétaires. De plus, le choix final d'un outil ou d'une méthode est parfois également motivé par des aspects plus terre à terre, notamment techniques et budgétaires. La fibre optique est difficile à mettre en place et compliquée à post-traiter ; l'IRT-a nécessite du matériel assez onéreux et quelques compétences spécifiques pour une approche quantifiée et reproductible, bien que la

simple observation des clichés permette d'identifier rapidement certains processus en jeu sur le secteur d'intérêt ; le déploiement de thermographes bien répartis avec quelques outils de traitement statistiques peut être plus abordable ; la modélisation nécessite des compétences aussi spécifiques, etc.

8. REMERCIEMENTS

Ce guide a été rédigé dans le cadre de l'Action 72, soutenue financièrement par l'Accord Cadre Agence de l'Eau RMC – ZABR. Plus généralement, le développement de l'outil IRT-a a fortement été soutenu par ces deux partenaires majeurs, comme l'illustre la majorité des exemples ayant servi à l'illustration de ce guide. Les auteurs ont également bénéficié des travaux menés par les collègues précédents (notamment Vincent Wawrzyniak) et des échanges avec les nombreuses personnes qui ont gravité autour des différents projets liés plus ou moins directement à l'IRT-a, que ce soit pour des phases de terrain, d'échange ou de soutien, et qui sont chaleureusement remerciés : Aurélien Beaufort, Barbara Belletti, Véronique Benacchio, Flavie Cernesson, André Chandesris, Julien Godfroy, Hugo Le Lay, Kristell Michel, Jérémy Piffady, Jordan Ré-Bahuaud, Jérémy Riquier, Benoît Terrier, Zahra Thomas, Hanieh Seyedhashemi, Stéphane Stroffek, Lise Vaudor, et probablement d'autres encore. BM a également été soutenu financièrement lors de certaines phases de rédaction du guide par une Convention de Recherche signée entre le CNRS, le Parc Naturel Régional des Bauges et SCIMABIO Interface. Enfin, les nombreux relecteurs et contributeurs à la partie introductive sont également chaleureusement remerciés pour leur participation. Ce travail était en outre conduit dans le cadre de l'EUR H2O'Lyon (ANR-17-EURE-0018) de l'Université de Lyon, programme "Investissements d'Avenir" opéré par l'ANR.

9. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abolt C, Caldwell T, Wolaver B, Pai H. 2018. Unmanned aerial vehicle-based thermal infrared camera monitoring of groundwater inputs to surface waters using an economical thermal infrared cameras. *Optical Engineering* 57 : 064301. DOI : 10.1117/1.OE
- Akbari E, Alavipanah SK, Jekhouni M, Hajeb M, Haase D, Alavipanah S. 2017. A review of ocean/sea subsurface water temperature studies from remote sensing and non-remote sensing methods. *Water (Switzerland)* 9 DOI : 10.3390/w9120936
- Anderson JM, Duck RW, McManus J. 1995. Thermal radiometry: a rapid means of determining surface water temperature variations in lakes and reservoirs. *Journal of Hydrology* 173 : 131–144. DOI : 10.1016/0022-1694(95)02714-Z
- Anding D, Kauth R. 1970. Estimation of sea surface temperature from space. *Remote Sensing of Environment* 1 : 217–220. DOI : 10.1016/S0034-4257(70)80002-5
- Arscott DB, Tockner K, Ward JV. 2001. Thermal heterogeneity along a braided floodplain river (Tagliamento River, northeastern Italy). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 58 : 2359–2373. DOI : 10.1139/f01-183
- Atwell BH, MacDonald RB, Bartolucci LA. 1971. Thermal Mapping of Streams From Airborne Radiometric Scanning. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 7 : 228–243. DOI : 10.1111/j.1752-1688.1971.tb05904.x
- Baker EA, Lautz LK, McKenzie JM, Aubry-Wake C. 2019. Improving the accuracy of time-lapse thermal infrared imaging for hydrologic applications. *Journal of Hydrology* 571 : 60–70. DOI : 10.1016/j.jhydrol.2019.01.053
- Barbedo JGA. 2019. A review on the use of unmanned aerial vehicles and imaging sensors for monitoring and assessing plant stresses. *Drones* 3 : 1–27. DOI : 10.3390/drones3020040
- Baxter C, Hauer FR, Woessner WW. 2003. Measuring Groundwater – Stream Water Exchange : New Techniques for Installing Minipiezometers and Estimating Hydraulic Conductivity. *Transactions of the American Fisheries Society* 132 : 493–502.
- Beaufort A, Curie F, Moatar F, Ducharme A, Melin E, Thiery D. 2016. T-NET, a dynamic model for simulating daily stream temperature at the regional scale based on a network topology. *Hydrological Processes* 30 : 2196–2210. DOI : 10.1002/hyp.10787
- Beaufort A, Moatar F, Sauquet E. 2020a. Thermie en rivière - Analyse géostatistique et description de régime : Application à l'échelle de la France. INRAE UR RiverLy, Université de Tours GÉHCO : 63p.
- Beaufort A, Moatar F, Sauquet E, Loicq P, Hannah DM. 2020b. Influence of landscape and hydrological factors on stream-air temperature relationships at regional scale. *Hydrological Processes* 34 : 583–597. DOI : 10.1002/hyp.13608
- Beaufort A, Diamond JS, Sauquet E, Moatar F. 2022. Spatial extrapolation of stream thermal peaks using heterogeneous time series at a national scale. *Hydrology and Earth System Sciences* 26(13) : 3477–3495. DOI : 10.5194/hess-26-3477-2022
- Belletti B, Dufour S, Piégay H. 2013. Regional variability of aquatic pattern in braided reaches (example of the French Rhône basin). *Hydrobiologia* 712 : 25–41. DOI : 10.1007/s10750-012-1279-6
- Bilby RE. 1984. Characteristics and frequency of cool-water areas in a Western Washington stream. *Journal of Freshwater Ecology* 2 : 593–602. DOI : 10.1080/02705060.1984.9664642
- Bolgrien DW, Brooks AS. 1992. Analysis of Thermal Features of Lake Michigan from AVHRR Satellite Images. *Journal of Great Lakes Research* 18 : 259–266. DOI : 10.1016/S0380-1330(92)71293-3
- Branger F, Gouttevin I, Tilmant F, Cipriani T, Barachet C, Montginoul M, Gros CL, Sauquet E, Braud I, Leblos E. 2016. Modélisation hydrologique distribuée du Rhône, [Rapport de Recherche]. IRSTEA, 116p. DOI : hal-02605058
- Caissie D. 2006. The thermal regime of rivers: A review. *Freshwater Biology* 51 : 1389–1406. DOI : 10.1111/j.1365-2427.2006.01597.x
- Calado R, Mota VC, Madeira D, Leal MC. 2021. Summer is coming! Tackling ocean warming in Atlantic salmon cage farming. *Animals* 11 : 1–18. DOI : 10.3390/ani11061800
- Caldwell SH, Kelleher C, Baker EA, Lautz LK. 2019. Relative information from thermal infrared imagery via unoccupied aerial vehicle informs simulations and spatially-distributed assessments of stream temperature. *Science of the Total Environment* 661 : 364–374. DOI : 10.1016/j.scitotenv.2018.12.457
- Casas-Mulet R, Pander J, Ryu D, Stewardson MJ, Geist J. 2020. Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-Based Thermal Infra-Red (TIR) and Optical Imagery Reveals Multi-Spatial Scale Controls of Cold-Water Areas Over a Groundwater-Dominated Riverscape. *Hydrological Processes* 8 : 1–16. DOI : 10.3389/fenvs.2020.00064
- Chandesris A, Van Looy K, Diamond JS, Souchon Y. 2019. Small dams alter thermal regimes of downstream water. *Hydrology and Earth System Sciences* 23 : 4509–4525. DOI : 10.5194/hess-23-4509-2019
- Chen S-K, Chen R-S, Yang T-Y. 2014. Application of a tank model to assess the flood-control function of a terraced paddy field. *Hydrological Sciences Journal* 59 : 1020–1031. DOI : 10.1080/02626667.2013.822642

- Cherkauer KA, Burges SJ, Handcock RN, Kay JE, Kampf SK, Gillespie AR. 2005. Assessing satellite-based and aircraft-based thermal infrared remote sensing for monitoring pacific northwest river temperature. *Journal of the American Water Resources Association* 41 : 1149–1159. DOI : 10.1111/j.1752-1688.2005.tb03790.x
- Daigle A, Caudron A, Vigier L, Pella H. 2017. Optimization methodology for a river temperature monitoring network for the characterization of fish thermal habitat. *Hydrological Sciences Journal* 62 : 483–497. DOI : 10.1080/02626667.2016.1242869
- Danielescu S, MacQuarrie KTB, Faux RN. 2009. The integration of thermal infrared imaging, discharge measurements and numerical simulation to quantify the relative contributions of freshwater inflows to small estuaries in Atlantic Canada. *Hydrological Processes* 23 : 2847–2859. DOI : 10.1002/hyp
- Delacourt C, Allemand P, Jaud M, Grandjean P, Deschamps A, Ammann J, Cuq V, Suanes S. 2009. DRELIO: An unmanned helicopter for imaging coastal areas. *Journal of Coastal Research* 56 : 1489–1493.
- Díaz-Delgado R, Ameztoty I, Cristóbal J, Bustamante J. 2010. Long time series of Landsat images to reconstruct river surface temperature and turbidity regimes of Guadalquivir Estuary. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)* : 233–236. DOI : 10.1109/IGARSS.2010.5651290
- Dole-Olivier MJ, Wawrzyniak V, Creuzé des Châtelliers M, Marmonier P. 2019. Do thermal infrared (TIR) remote sensing and direct hyporheic measurements (DHM) similarly detect river-groundwater exchanges? Study along a 40 km-section of the Ain River (France). *Science of the Total Environment* 646 : 1097–1110. DOI : 10.1016/j.scitotenv.2018.07.294
- Dugdale SJ. 2016. A practitioner's guide to thermal infrared remote sensing of rivers and streams: recent advances, precautions and considerations. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* 3 : 251–268. DOI : 10.1002/wat2.1135
- 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
- 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 : 1152–1163. DOI : 10.1002/hyp.13395
- 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. *Rapport SHL293.2010/FDP74.10/03* : 28p.
- Dunham JB, Chandler GL, Rieman B, Martin D. 2005. Measuring Stream Temperature with Digital Data Loggers: A User's Guide. *USFS Technical Report* : 1–18.
- Ebersole JL, Liss WJ, Frissell CA. 2001. Relationship between stream temperature, thermal refugia and rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* abundance in arid-land streams in the northwestern United States. *Ecology of Freshwater Fish* 10 : 1–10. DOI : 10.1034/j.1600-0633.2001.100101.x
- Ebersole JL, Liss WJ, Frissell CA. 2003. Cold water patches in warm streams: Physicochemical characteristics and the influence of shading. *Journal of the American Water Resources Association* 39 : 355–368. DOI : 10.1111/j.1752-1688.2003.tb04390.x
- Emery WJ, Yu Y. 1997. Satellite sea surface temperature patterns. *International Journal of Remote Sensing* 18 : 323–334. DOI : 10.1080/014311697219097
- Eschbach D, Piasny G, Schmitt L, Pfister L, Grussenmeyer P, Koehl M, Skupinski G, Serradj A. 2017. Thermal-infrared remote sensing of surface water-groundwater exchanges in a restored anastomosing channel (Upper Rhine River, France). *Hydrological Processes* 31 : 1113–1124. DOI : 10.1002/hyp.11100
- 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, USDA & Remote Sensing Application Center* : 29p.
- Faux RN, McIntosh B. 2000. Stream temperature assessment. *Conservation in Practice* 1 : 38–41.
- Ferchichi H, St-Hilaire A. 2023. Are temperature time series measured at hydrometric stations representative of the river's thermal regime? *Canadian Water Resources Journal* 48(2) : 149–166. DOI : 10.1080/07011784.2023.2216454
- Fullerton AH, Torgersen CE, Lawler JJ, Steel EA, Ebersole JL, Lee SY. 2018. Longitudinal thermal heterogeneity in rivers and refugia for coldwater species: effects of scale and climate change. *Aquatic Sciences* 80 : 1–15. DOI : 10.1007/s00027-017-0557-9
- Gade R, Moeslund TB. 2014. Thermal cameras and applications: A survey. *Machine Vision and Applications* 25 : 245–262. DOI : 10.1007/s00138-013-0570-5
- George SD, Baldigo BP, Smith MJ, McKeown DM, Faulring JW. 2016. Variations in water temperature and implications for trout populations in the Upper Schoharie Creek and West Kill, New York, USA. *Journal of Freshwater Ecology* 31 : 93–108. DOI : 10.1080/02705060.2015.1033769
- Georges B, Brostaux Y, Claessens H, Degré A, Huylenbroeck L, Lejeune P, Piégay H, Michez A. 2020. Can water level stations be used for thermal assessment in aquatic ecosystem? *River Research and Applications* 36 : 960–973. DOI : 10.1002/rra.3520

- Handcock RN, Gillespie AR, Cherkauer KA, Kay JE, Burges SJ, Kampf SK. 2006. Accuracy and uncertainty of thermal-infrared remote sensing of stream temperatures at multiple spatial scales. *Remote Sensing of Environment* 100 : 427–440. DOI : 10.1016/j.rse.2005.07.007
- Handcock RN, Torgersen CE, Cherkauer KA, Gillespie AR, Tockner K, Faux RN, Tan J. 2012. Thermal Infrared Remote Sensing of Water Temperature in Riverine Landscapes. *In* *Fluvial Remote Sensing for Science and Management*, Carbonneau PE and Piégay H (eds). John Wiley & Sons, Ltd : London, UK; 85–113.
- Hausner MB, Suárez F, Glander KE, van de Giesen N, Selker JS, Tyler SW. 2011. Calibrating single-ended fiber-optic raman spectra distributed temperature sensing data. *Sensors* 11 : 10859–10879. DOI : 10.3390/s111110859
- Hillyard RW, Keeley ER. 2012. Temperature-related changes in habitat quality and use by bonnevillie cutthroat trout in regulated and unregulated river segments. *Transactions of the American Fisheries Society* 141 : 1649–1663. DOI : 10.1080/00028487.2012.717517
- Jackson FL, Fryer RJ, Hannah DM, Millar CP, Malcolm IA. 2018. A spatio-temporal statistical model of maximum daily river temperatures to inform the management of Scotland's Atlantic salmon rivers under climate change. *Science of the Total Environment* 612 : 1543–1558. DOI : 10.1016/j.scitotenv.2017.09.010
- Jessup AT, Zappa CJ, Loewen MR, Hesany V. 1997. Infrared remote sensing of breaking waves. *Nature* 385 : 52–55.
- Kay J, Handcock RN, Gillespie A, Konrad C, Burges S, Naveh N, Booth D. 2001. Stream-temperature estimation from thermal infrared images. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)* 1 : 112–114. DOI : 10.1109/igarss.2001.976073
- Kay JE, Kampf SK, Handcock RN, Cherkauer KA, Gillespie AR, Burges SJ. 2005. Accuracy of lake and stream temperatures estimated from thermal infrared images. *Journal of the American Water Resources Association* 41 : 1161–1175. DOI : 10.1111/j.1752-1688.2005.tb03791.x
- Kelly J, Kljun N, Olsson PO, Mihai L, Liljeblad B, Weslien P, Klemedtsson L, Eklundh L. 2019. Challenges and best practices for deriving temperature data from an uncalibrated UAV thermal infrared camera. *Remote Sensing* 11 : 1–21. DOI : 10.3390/rs11050567
- Kimata M. 2018. Uncooled infrared focal plane arrays. *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering* 13 : 4–12. DOI : 10.1002/tee.22563
- Kuhn J, Casas-mulet R, Pander J. 2021. Assessing Stream Thermal Heterogeneity and Cold-Water Patches from UAV-Based Imagery : A Matter of Classification Methods and Metrics. *Remote Sensing* 13 : 1379.
- Lalot E, Curie F, Wawrzyniak V, Baratelli F, Schomburgk S, Flipo N, Piegay H, Moatar F. 2015. Quantification of the contribution of the Beauce groundwater aquifer to the discharge of the Loire River using thermal infrared satellite imaging. *Hydrology and Earth System Sciences* 19 : 4479–4492. DOI : 10.5194/hess-19-4479-2015
- Latte N, Gaucher P, Bolyn C, Lejeune P, Michez A. 2020. Upscaling UAS paradigm to ultralight aircrafts: A low-cost multi-sensors system for large scale aerial photogrammetry. *Remote Sensing* 12 DOI : 10.3390/RS12081265
- Le Lay H. 2019. Caractérisation des échanges nappe-rivière par mesure distribuée de température par fibre optique : limites et applications aux faibles exfiltrations de nappe. Thèse de doctorat, Université de Tours : 223p.
- Le Lay H, Thomas Z, Rouault F, Pichelin P, Moatar F. 2019a. Characterization of diffuse groundwater inflows into streamwater (Part I: Spatial and temporal mapping framework based on fiber optic distributed temperature sensing). *Water (Switzerland)* 11 : 2389. DOI : 10.3390/w11112389
- Le Lay H, Thomas Z, Rouault F, Pichelin P, Moatar F. 2019b. Characterization of diffuse groundwater inflows into streamwater (Part II: Quantifying groundwater inflows by coupling FO-DTS and vertical flow velocities). *Water (Switzerland)* 11 : 1–22. DOI : 10.3390/W11122430
- Le Lay H, Thomas Z, Bour O, Rouault F, Pichelin P, Moatar F. 2020. Experimental and Model-Based Investigation of the Effect of the Free-Surface Flow Regime on the Detection Threshold of Warm Water Inflows. *Water Resources Research* 56 : 1–17. DOI : 10.1029/2018WR023722
- Lévêque PC, Gros JC, Maurin C, Sévêrac J, Siméon C, Viguier C. 1972. Utilisation de la télédétection infrarouge et des mesures isotopiques -tritium et oxygène 18- pour l'étude des résurgences d'eau douce le long du littoral aquitain. *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences* 274 : 2841–2844.
- Ling F, Foody GM, Du H, Ban X, Li X, Zhang Y, Du Y. 2017. Monitoring thermal pollution in rivers downstream of dams with landsat ETM+ thermal infrared images. *Remote Sensing* 9 : 1–16. DOI : 10.3390/rs9111175
- Loicq P, Moatar F, Jullian Y, Dugdale SJ, Hannah DM. 2018. Improving representation of riparian vegetation shading in a regional stream temperature model using LiDAR data. *Science of the Total Environment* 624 : 480–490. DOI : 10.1016/j.scitotenv.2017.12.129
- Maire A, Thierry E, Viechtbauer W, Daufresne M. 2019. Poleward shift in large-river fish communities detected with a novel meta-analysis framework. *Freshwater Biology* 64 : 1143–1156. DOI : 10.1111/fwb.13291
- Marshall C, Parker T, White T. 1995. Infrared sensor technology. *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology - Proceedings* 17 : 1715–1716. DOI : 10.1080/713821076
- Marteau B, Piégay H, Chandresis A, Cernesson F, Michel K, Piffady J, Vaudor L. 2020a. Effets de la ripisylve sur l'échauffement thermique des cours d'eau : de l'évaluation par télédétection à l'extrapolation à l'échelle régionale (plaine de la Bresse). *Rapport final de l'Action 64, Accord Cadre ZABR-AERMC*, Lyon (France) : 73p.

- Marteau B, Ré-Bahuaud J, Wawrzyniak V. 2020b. Identification des apports du karst par thermographie infra-rouge aéroportée : campagnes de mesures de 2013 sur la Cèze. *Karstologia* 75 : 25–32.
- 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 : e14480. DOI : 10.1002/hyp.14480
- Marteau B, Piégay H, Chandesris 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 : 2209–2229.
- Marteau B, Georges B, Michez A, Dunesme S, Piégay H, Lejeune P. (en préparation). A comparative study of thermal sensors used for riverscape surveys through airborne TIR. *Remote Sensing. Remote Sensing*.
- Martí-Cardona B, Arbat-Bofill M, Prats-Rodríguez J, Pipia L. 2016. Thermal remote sensing for reservoir modelling and management. Living Planet Symposium, *European Space Agency*, Prague (SP-740) : 1-5
- Martí-Cardona B, Prats J, Niclòs R. 2019. Enhancing the retrieval of stream surface temperature from Landsat data. *Remote Sensing of Environment* 224 : 182–191. DOI : 10.1016/j.rse.2019.02.007
- Martin J-C. 2013. Carte de France des profils de température 0-200 m selon les zones climatiques *Rapport final. BRGM/RP-62281-FR* : 17p.
- Mejia FH, Torgersen CE, Berntsen EK, Maroney JR, Connor JM, Fullerton AH, Ebersole JL, Lorang MS. 2020. Longitudinal, lateral, vertical, and temporal thermal heterogeneity in a large impounded river: Implications for cold-water refuges. *Remote Sensing* 12 DOI : 10.3390/RS12091386
- Moatar F, Gailhard J. 2006. Water temperature behaviour in the River Loire since 1976 and 1881. *Comptes Rendus - Geoscience* 338(5) : 319-328. DOI : 10.1016/j.crte.2006.02.011
- 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. DOI : 10.1016/j.jenvman.2012.12.024
- Nielsen JL, Lisle TE, Ozaki V. 1994. Thermally stratified pools and their use by steelhead in Northern California streams. *Transactions of the American Fisheries Society* 123 : 613–626. DOI : 10.1080/1548-8659(1994)123[1t]0613[co]TSPATU[gt]2.3.CO;2
- O'Donnell Meininger T, Selker JS. 2015. Bed conduction impact on fiber optic distributed temperature sensing water temperature measurements. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems* 4 : 19–22. DOI : 10.5194/gi-4-19-2015
- O'Sullivan A, Linnansaari T, Leavitt J, Samways KM, Kurylyk BL, Curry RA. 2021. The salmon-peloton: hydraulic habitat shifts of adult Atlantic salmon (*Salmo salar*) due to behaviour thermoregulation. *River Research and Applications* 38 : 107–118.
- Olivier J-M, Lamouroux N, Forcellini M, Riquier J, Piégay H, Godfroy J, Tissot N, Marteau B, Castella E, Mayor H, Marle P. 2019. Suivi scientifique de restauration hydraulique et écologique du Rhône - Un observatoire dynamique de l'état écologique du fleuve. *Rapport d'état d'avancement RhônEco*, Lyon (France) : 157p.
- Ozaki VL. 1988. Geomorphic and hydrologic conditions for cold pool formation on Redwood Creek, California. *Redwood National Park Research and Development Technical Report* 24 : 77p.
- Pascoletti Y, Paran F, Graillot D, Cadilhac L. 2020. Interactions Karst/Rivière - Guide méthodologique. *Eau & Connaissance, Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse* : 128p.
- Piégay H, Arnaud F, Belletti B, Bertrand M, Bizzi S, Carbonneau P, Dufour S, Liébault F, Ruiz-Villanueva V, Slater L. 2020. Remotely sensed rivers in the Anthropocene: state of the art and prospects. *Earth Surface Processes and Landforms* 45 : 157–188. DOI : 10.1002/esp.4787
- Piégay H, Arnaud F, Cassel M, Marteau B, Riquier J, Rousson C, Valette L, Vázquez-Tarrio D. 2023. Why considering geomorphology in river rehabilitation? *Land* (accepté)
- Poole GC, Berman CH. 2001. An ecological perspective on in-stream temperature: Natural heat dynamics and mechanisms of human-caused thermal degradation. *Environmental Management* 27 : 787–802. DOI : 10.1007/s002670010188
- Ré-Bahuaud J, Graillot D, Paran F, Chapuis H. 2014. Identification des échanges entre karst et rivière – Analyse comparée d'images Infra Rouge Thermiques (IRT) et de profil de conductivité sous SIG. *Conférence Francophone ESRI 2014, Octobre 2014* : 1–9.
- Ribeiro-Gomes K, Hernández-López D, Ortega JF, Ballesteros R, Poblete T, Moreno MA. 2017. Uncooled thermal camera calibration and optimization of the photogrammetry process for UAV applications in agriculture. *Sensors (Switzerland)* 17 : 9–11. DOI : 10.3390/s17102173
- Schluessel P, Emery W, Grassl H, Mammen T. 1990. On the bulk-skin temperature difference and its impact on satellite remote sensing of sea surface temperature. *Journal of Geophysical Research* 95 : 13341–13356.
- Schott JR, Barsi JA, Nordgren BL, Raqueño NG, de Alwis D. 2001. Calibration of Landsat thermal data and application to water resource studies. *Remote Sensing of Environment* 78 : 108–117. DOI : 10.1016/S0034-4257(01)00253-X
- Seyedhashemi H, Moatar F, Vidal JP, Diamond JS, Beaufort A, Chandesris A, Valette L. 2021. Thermal signatures identify the influence of dams and ponds on stream temperature at the regional scale. *Science of the Total Environment* 766 :

142667. DOI : 10.1016/j.scitotenv.2020.142667

- Seyedhashemi H, Vidal J-P, Diamond J, Thiéry D, Monteil C, Hendrickx F, Maire A, Moatar F. 2022. Regional, multi-decadal analysis reveals that stream temperature increases faster than air temperature. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* : 1–31. DOI : 10.5194/hess-2021-450
- Seyedhashemi H, Moatar F, Vidal J-P, Thiéry D. 2023. Past and future discharge and stream temperature at high spatial resolution in a large European basin (Loire basin, France). *Earth System Science Data* 15(7) : 2827–2839. DOI : 10.5194/essd-15-2827-2023
- Smikrud KM, Prakash A, Nichols J V. 2008. Decision-based fusion for improved fluvial landscape classification using digital aerial photographs and forward looking infrared images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 74 : 903–911. DOI : 10.14358/PERS.74.7.903
- Smith MW, Carrivick JL, Quincey DJ. 2015. Structure from motion photogrammetry in physical geography. *Progress in Physical Geography* 40 : 247–275. DOI : 10.1177/0309133315615805
- 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
- Tan J, Cherkauer KA. 2013. Assessing stream temperature variation in the Pacific Northwest using airborne thermal infrared remote sensing. *Journal of Environmental Management* 115 : 206–216. DOI : 10.1016/j.jenvman.2012.10.012
- Terrier B et al. 2019. Les rivières en tresses : Eléments de connaissances. *Eau & Connaissance, Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse*, Lyon (France) : 118p.
- Tissot JL. 2002. Advanced IR detector technology development at CEA/LETI. *Infrared Physics and Technology* 43 : 223–228. DOI : 10.1016/S1350-4495(02)00143-3
- Tonolla D, Wolter C, Ruhtz T, Tockner K. 2012. Linking fish assemblages and spatiotemporal thermal heterogeneity in a river-floodplain landscape using high-resolution airborne thermal infrared remote sensing and in-situ measurements. *Remote Sensing of Environment* 125 : 134–146. DOI : 10.1016/j.rse.2012.07.014
- 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* : 91. DOI : EPA 910-c-12-001
- 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 : 386–398. DOI : 10.1016/S0034-4257(01)00186-9
- 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 : 301–319. DOI : 10.1890/1051-0761(1999)009[0301:MTRASH]2.0.CO;2
- Tufillaro N, Dorighi J, Collier M, Selker JS. 2008. Measuring stream dynamics with fiber optics. *American Physical Society, 10th Annual Meeting of the Northwest Section of APS* : 8p.
- Vollmer M, Möllmann K-P. 2018. Infrared Thermal Imaging - Fundamentals, Research and Applications. 2nd Edition. *Wiley-VCH: Weinheim*, Germany : 769p.
- Ward J V. 1985. Thermal characteristics of running waters. *Hydrobiologia* 125 : 31–46. DOI : 10.1007/BF00045924
- Wasson J-G, Chandèsris A, Pella H, Blanc L. 2002. Les hydro-écorégions de France métropolitaine approche régionale de la typologie des eaux courantes et éléments pour la définition des peuplements de référence d'invertébrés. *CEMAGREF*, Lyon (France) : 190p.
- Wawrzyniak V, Piégay H, Poirel A. 2012. Longitudinal and temporal thermal patterns of the French Rhône River using Landsat ETM+ thermal infrared images. *Aquatic Sciences* 74 : 405–414. DOI : 10.1007/s00027-011-0235-2
- 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 : 4812–4831. DOI : 10.1080/01431161.2013.782113
- Wawrzyniak V, Piégay H, Allemand P, Vaudor L, Goma R, Grandjean P. 2016a. 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. DOI : 10.1016/j.rse.2015.12.050
- Wawrzyniak V, Piégay H, Gailliot D. 2016b. Imagerie infrarouge thermique aéroportée et modélisation hydrogéologique pour identifier et comprendre l'échauffement thermique estival et les zones d'échanges entre la nappe et la rivière. *Rapport Action 36, Accord-Cadre AERMC-ZABR*, Lyon (France) : 37p.
- Wawrzyniak V, Allemand P, Bailly S, Lejot J, Piégay H. 2017. Coupling LiDAR and thermal imagery to model the effects of riparian vegetation shade and groundwater inputs on summer river temperature. *Science of the Total Environment* 592 : 616–626. DOI : 10.1016/j.scitotenv.2017.03.019
- Webb BW, Hannah DM, Moore RD, Brown LE, Nobilis F. 2008. Recent advances in stream and river temperature research. *Hydrological Processes* 22 : 902–918. DOI : 10.1002/hyp
- Westhoff MC, Savenije HHG, Luxemburg WMJ, Stelling GS, van de Giesen NC, Selker JS, Pfister L, Uhlenbrook S. 2007. A distributed stream temperature model using high resolution temperature observations. *Hydrology and Earth System Sciences* 11 : 1469–1480.

- Wirth L, Rosenberger A, Prakash A, Gens R, Margraf JF, Hamazak T. 2012. A remote-sensing, GIS-based approach to identify, characterize, and model spawning habitat for fall-run chum salmon in a sub-arctic, glacially fed River. *Transactions of the American Fisheries Society* 141 : 1349–1363. DOI : 10.1080/00028487.2012.692348
- Zoran MA, Savastru RS, Savastru DM, Miclos SI, Tautan MN, Baschir L V. 2012. Thermal pollution assessment in nuclear power plant environment by satellite remote sensing data. *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology* XIV 8531 : 853120. DOI : 10.1117/12.974402

LISTE DES FIGURES

Figure 1. La relation entre la température de l'eau et la température de l'air (moyennes hebdomadaires) informe sur la sensibilité d'un cours d'eau aux forçages atmosphériques, et donc indirectement sur sa vulnérabilité potentielle au réchauffement climatique (Source : Beaufort et al. 2020).	6
Figure 2. Illustration de l'hétérogénéité thermique spatiale des cours d'eau à l'échelle du corridor fluvial, issue des interactions entre eaux de surface, eaux de sub-surface et eaux souterraines (Traduite et modifiée de Poole, 2010).	8
Figure 3. Description du régime thermique d'un cours d'eau par l'utilisation de métriques dont la définition est plutôt statistique, voire hydrologique (Source : traduit de Olden & Naiman 2010, modifié par Beaufort et al. 2020).	9
Figure 4. Le régime thermique d'un cours d'eau influence l'ensemble des compartiments biologiques via de nombreux mécanismes qui s'appliquent à différentes échelles de temps et d'espace, d'où la nécessité d'adapter les métriques de température étudiées aux espèces cibles (Source : traduit de Olden & Naiman, 2010).	10
Figure 5. Exemple de relation typique des organismes, notamment sténothermes, à la température.	13
Figure 6. Biologie thermique du saumon atlantique (<i>Salmo salar</i>). (a) Fenêtres thermiques des différentes étapes de vie, (b) fenêtres thermiques des événements du cycle de vie, (c) courbe théorique de performance du saumon adulte. T_{opt} = température optimale, TC_{min} = température critique minimum, TC_{max} = température critique maximum (traduit de Calado et al., 2021).	13
Figure 7. Echelles spatiales et temporelles des enjeux et questions liés à la température des cours d'eau recensés au sein de ce guide.	17
Figure 8. Champ spectral de l'infrarouge thermique et des régions adjacentes, avec un zoom sur ladite région « infrarouge thermique ». On y distingue les ondes courtes (OC), les ondes moyennes (OM) et les ondes longues (OL) (source : traduit de Vollmer & Möllmann, 2018).	19
Figure 9. Sources des radiations IRT émises et réfléchies qui entrent en jeu dans la télédétection de la température de surface en milieu fluvial.	20
Figure 10. Capture d'écran du web-SIG du <i>Department of Ecology</i> de l'état de Washington (E.-U.) permettant la visualisation des images IRT-a produites sur le territoire de l'état.	24
Figure 11. Carte des tronçons de rivière ayant fait l'objet de campagnes IRT-a au cours des dix dernières années au sein du laboratoire EVS. Certaines de ces données sont recensées dans la base de données « elvis » (http://elvis.ens-lyon.fr/geonetwork/srv/search). RMC* : Rhône-Méditerranée-Corse.	25
Figure 12. Illustration de la variabilité latérale de température observée sur une rivière de plaine (ici : la Bourbince (71)) lorsque celle-ci n'est pas soumise à l'influence d'ouvrages ou de rectifications majeures. Survol réalisé le 24/07/2019, avec une température de l'air supérieure à 39°C. En haut : orthophoto. En bas : image thermique, le bleu représentant les zones froides et le rouge les zones chaudes.	28
Figure 13. Une ripisylve trop dense sur un petit cours d'eau (ici : la Chalaronne (01)) n'offre que peu d'occasions d'observer le miroir depuis les airs. A gauche : orthophoto. A droite : image thermique, le bleu représentant les zones froides et le rouge les zones chaudes.	29
Figure 14. Exemples de capteurs (et vecteurs associés) recensés dans la littérature, différenciant les capteurs spécifiques (en haut) et les capteurs non-spécifiques mais qui ont été adaptés pour un usage en télédétection (en bas).	33
Figure 15. Evolution temporelle de la température des différentes structures géomorphologiques identifiées sur la Drôme (CA = chenaux alluviaux, ES = chenaux alimentés par des eaux souterraines, CP = chenal principal, M = mares, CS = chenaux secondaires). (Source : Wawrzyniak et al. (2013)).	36

Figure 16. Chaîne de traitement des images infrarouges pour la création d'une mosaïque thermique et l'extraction des deux produits principaux : le profil longitudinal de température et la détection des anomalies thermiques (ou taches froides).....	38
Figure 17. Schématisation de la chaîne de traitement des images IRT-a pour l'obtention des deux produits principaux : le profil longitudinal de température et la carte des anomalies thermiques. Pour la description des étapes, se référer au texte. Etapes : 1) digitalisation du centre du chenal ; 2) ajout de points régulièrement espacés le long de la ligne centrale ; 3) création d'une zone tampon le long de la ligne centrale et découpées selon les points ; 4) extraction des valeurs de température, et notamment la médiane et l'écart-type ; 5) production du profil longitudinal de température (incluant l'écart-type comme évaluation des incertitudes) et 6) utilisation des extractions (médiane et écart-type) pour identifier les anomalies thermiques.....	39
Figure 18. (a) Les rivières proglaciaires et non-proglaciaires répondent différemment à la température de l'air (noir : rivières proglaciaires ; gris = rivières non- proglaciaires). (b) La diversité des habitats thermiques est fortement corrélée à la présence de structures géomorphologiques particulières. Types de chenaux : P = mares (<i>ponds</i>), AL = chenaux alluviaux, GW = chenaux phréatiques (<i>groundwater-fed</i>) (source : Wawrzyniak et al. (2013)).	43
Figure 19. Température des trains de casiers Girardon le long du RCC de Péage-de-Roussillon.....	43
Figure 20. Probabilité d'observer des exfiltrations de bancs sur la rivière d'Ain. (a) Probabilité modélisée en fonction de la taille des bancs. (b) Probabilité observée en 2009, et prédite pour 1945 sur la base des bancs alluviaux observés sur les images aériennes de l'époque (source : Wawrzyniak et al. (2016)).	45
Figure 21. Sur l'Arroux (affluent RD de la Loire), de nombreux refuges thermiques ont été observés à l'exutoire de paléo-chenaux, chemins préférentiels d'écoulements de sub-surface sur ces environnements sablonneux.	45
Figure 22. Les refuges thermiques sur le bassin versant de la rivière Restigouche (Ouest Canadien) sont fortement concentrés à proximité des affluents (a) et présents en plus grande densité pour un niveau de confinement moyen de la vallée (b) (Source : Dugdale et al. (2015)).	46
Figure 23. Nomenclature illustrée des types de refuges thermiques observés en rivière (Source : Dugdale et al. (2015) et références qui y sont citées).	48
Figure 24. Sur la rivière Drac amont, l'analyse des données issues de l'IRT-a a permis d'associer la dynamique locale du gradient thermique avec les caractéristiques des taches froides observées (densité, diversité, taille et différentiel thermique), et de comparer également les secteurs au fonctionnement théorique similaire (ex. systèmes en tresse) les uns aux autres. (Source : Marteau et al. (2022a)).	49
Figure 25. Au moment le plus chaud de la journée, un phénomène de "dé-stratification" thermique est observable sur la majorité des seuils de la Bresse, illustrant l'échauffement en surface de la masse d'eau et l'altération thermo-hydraulique sur système généré par la présence des seuils.	50
Figure 26. L'étude sur la plaine de la Bresse a mis en évidence le lien entre l'altération thermo-hydraulique des rivières de plaine et leur réponse à la présence/absence de ripisylve. Plus une rivière est fragmentée par des seuils affectant son régime hydraulique, plus elle sera sensible à l'ombrage, le tout modulé par le régime thermique de la rivière (notamment les échanges avec la nappe) (Marteau et al. (2022b)).	51
Figure 27. La rupture du profil de température sur le tronçon court-circuité du Rhône à Péage-de-Roussillon n'est pas observée tous les ans au passage du barrage de Saint-Pierre-de-Boëuf (ligne rouge, km 4,5). De la même manière, le gradient thermique au sein du RCC varie d'une année à l'autre, et ne semble pas dépendre uniquement du débit.....	53
Figure 28. Relations entre le niveau de la nappe et le nombre d'anomalies thermiques (a) et la surface totale de ces anomalies (b) (Source : Wawrzyniak et al. (2016)).	54
Figure 29. Indicateurs fonctionnels issus des observations actuelles sur des secteurs en tresses restaurés. a) Lien entre indices géomorphologiques de connectivité potentielle (densité de chenaux déconnectés ou uniquement connectés par l'aval) et leur densité. b) Différence observée de taille et de différentiel thermique sur les tronçons restaurés par rapport à un référentiel de contrôle.	55

Figure 30. Évolution de différents indicateurs morphologiques sur les secteurs étudiés du Drac et du Buëch de 1950 à aujourd'hui. (Pttw : index de tressage ; NFI : indice de densité de chenaux relatifs aux écoulements de sub-surface ; Active width : largeur de la bande active). (Source : Marteau et al. (2021a), modifié).	56
Figure 31. Illustration de la complémentarité des approches : l'IRT-a a permis de localiser des résurgences (et d'en déceler une nouvelle), tandis que le profil de conductivité a permis de déterminer les effets ponctuels ou diffus des résurgences karstiques (Sources : Ré-Bahuaud et al. (2014), Marteau et al. (2020b)).	58
Figure 32. Comparaison des profils en long de température mesurés sur le Drac amont en juillet 2020, par IRT-a (T° radiante, le 6 septembre) et par thermographe « classique » et descente en canoë (T° cinétique, le 7 septembre). La température cinétique a été ajustée pour prendre en compte l'évolution au cours de la descente (~3h30) de la température de l'eau, la différence cinétique entre l'amont et l'aval ainsi que l'écart moyen de température entre les deux jours (Température de l'air en moyenne 3°C inférieure sur l'après-midi entre le 6 et le 7 septembre).	60
Figure 33. Cartographie du risque d'échau-ffement de la plaine de la Bresse résultant de la modélisation régionale à partir des données IRT-a collectées sur un échantillon de rivières de la région (HER Plain de la Bresse) (Source : Marteau et al. 2020a).	65
Figure 34. En combinant des données LiDAR (modélisation de l'ombrage) et des données IRT-a (quantification des apports de nappe) au sein d'une modélisation à base "physique", il est possible de simuler les dynamiques thermiques journalières de manière très précise (Source : Wawrzyniak et al. (2017)).	66
Figure 35. Illustration des enregistreurs de température les plus fréquemment utilisés. Les numéros associés se réfèrent au Tableau 6 et aux sources des photos ci-dessous :	68
Figure 36. Schéma d'installation d'une canne thermométrique dans le lit de la rivière pour quantifier les échanges hyporhéiques. Dans cette étude, les cannes thermométriques ont été combinées à la fibre optique (voir § ci-dessous) pour une « cartographie » en 3D des échanges au sein de la zone hyporhéique (Source : Le Lay, 2019).	69
Figure 37. Illustration des scénarios d'installation possibles de la fibre optique pour mesurer la conduction thermique du lit (Source : O'Donnell Meininger et al. (2015)).	71
Figure 38. Reconstitution statistique de la moyenne des 30 jours consécutifs les plus chauds (2009-2018). Beaufort et al., (2020) (https://thermie-rivieres.inrae.fr).	73
Figure 39. Tendance générale observée pour la température des grandes rivières (haut), et modélisation de l'évolution des espèces classées comme nordiques, intermédiaires et méridionales au cours du temps (Source : Maire et al. (2019)).	74
Figure 40. Carte des stations de mesure de la température issues du réseau de jaugeage, et résultats de l'analyse de ces données en lien avec la biologie de la truite commune européenne (<i>Salmo trutta</i> , L. 1758) en Wallonie, Belgique (Source : traduit de Georges et al., 2020, Figure 9).	75
Figure 41. Positionnement théorique des principaux outils présentés dans ce guide sur cette matrice dimensionnelle « espace-temps », qui reflète la complémentarité des outils et méthodes pour couvrir l'ensemble du spectre des enjeux liés à la thermie des cours d'eau.	76
Figure 42. Le choix d'un ou de plusieurs outils pour étudier la thermie d'un cours d'eau se fait généralement le long d'un gradient virtuel entre les approches spatiales et les approches temporelles. Le choix de l'un ou l'autre des outils, voire leur combinaison, passe par la définition d'objectifs précis en amont et l'optimisation des ressources disponibles pour mener à bien cette étude.	78
Figure 43. Illustration de la différence entre les 4 régimes thermiques déterminés par Beaufort et al. (2020), ici représentée par la différence entre la température moyenne mensuelle de l'eau et la température moyenne interannuelle de l'air. (Source : Beaufort et al. (2020)).	81

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Liste des avantages et inconvénients de l'IRT. Traduit et modifié d'après Handcock et al. (2012).	22
Tableau 2. Liste et caractéristiques des satellites possédant un capteur infrarouge thermique.....	23
Tableau 3. Liste (non-exhaustive) des publications scientifiques et des vecteurs utilisés pour des études IRT-a.	32
Tableau 4. Liste et caractéristiques des capteurs utilisés dans les études IRT-a (littérature non-exhaustive)...	34
Tableau 5. Anomalies thermiques détectées en 2019 et revisitées en 2020. *Une exfiltration latérale s'est avérée être un rejet domestique diffus. **Autres : rejets, et ombrage.	61
Tableau 6. Quelques caractéristiques des enregistreurs de température les plus fréquemment utilisés.	69

LISTE DES ENCARTS

Encart 1. Détection des anomalies thermiques en été et en hiver	37
Encart 2. Les images thermiques comme support visuel	40
Encart 3. Exfiltration en aval d'un banc de galets sur la rivière d'Ain	44
Encart 4. Classification des anomalies thermiques : aller au-delà des refuges thermiques.....	47
Encart 5. La Brenne : un cours d'eau typique de la Bresse	51
Encart 6. L'effet visible du rejet des centrales nucléaires	52
Encart 7. Evolution journalière des contrastes thermiques.	54
Encart 8. Une tresse restaurée mais non reconnectée	57
Encart 9. Obtenir un profil de conductivité <i>in situ</i>	59
Encart 10. Détection des petites résurgences sur l'Ouvèze.	62
Encart 11. De l'approche confirmatoire à l'approche combinatoire.....	63
Encart 12. Cannes thermométriques : du modèle simple au modèle export.....	70
Encart 13. Déploiement de la fibre optique DTS sur le terrain.	71
Encart 14. Des réseaux de suivi hétérogènes à l'échelle nationale (https://thermie-rivieres.inrae.fr)	72

