

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

**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 final – Mai 2016

Action n° 36 du Programme 2013 au titre de l'accord
cadre Agence de l'Eau ZABR



Vincent Wawrzyniak vincent.wawrzyniak@gmail.com
Hervé Piégay herve.piegay@ens-lyon.fr
Didier Graillet didier.graillet@emse.fr



Table des matières

1. Introduction et objectifs	3
2. Zone d'étude.....	6
3. Méthodologie.....	7
3.1. Importance de la température de l'eau sur les écosystèmes.....	7
3.2. L'imagerie infrarouge thermique des cours d'eau.....	9
3.3. Acquisition des images aéroportées sur les deux RCC.....	16
3.4. Calages et validations	18
3.5. Traitements réalisés.....	19
4. Résultats.....	20
4.1. Patron thermique longitudinal	20
4.2. Hétérogénéité thermique spatiale	22
4.3. Température des casiers Girardon	25
4.4. Effets de l'ombrage sur la température	29
5. Conclusion et recommandations	30
6. Références bibliographiques	32

1. Introduction et objectifs

Depuis 1977, la température du Rhône est mesurée au niveau de douze stations appartenant à Électricité de France (EDF). Ces données *in situ* permettent de connaître les principaux facteurs affectant la température du fleuve. Ils sont, par ordre décroissant, la température de l'eau sortant du lac Léman, les conditions météorologiques, les principaux affluents, les CNPE (Centre Nucléaire de Production d'Electricité) et les aménagements hydroélectriques (Poirel, 2004 ; Khalanski et al., 2008 ; Poirel et al., 2008 ; Olivier et al., 2009). Ces derniers ont un effet très limité sur le patron longitudinal de température. Le temps de séjour de l'eau dans le réservoir des aménagements hydroélectriques à dérivation est court, ce qui explique que l'on n'observe pas de différences de la température entre l'amont et l'aval des ouvrages. Toutefois, il existe des différences thermiques entre le canal et le Rhône court-circuité (RCC). Par rapport au canal, le RCC contigu est généralement plus chaud l'été et plus froid l'hiver (Poirel, 2004 ; Wawrzyniak et al., 2012). Les différences s'expliquent par le fait que les RCC sont moins profonds que les canaux et ont des vitesses plus faibles. Ils sont ainsi plus sensibles aux conditions extérieures. Ceci a notamment été observé grâce à des images satellites infrarouge thermique (IRT). En effet, la télédétection IRT permet de cartographier la température de surface et ainsi d'étudier les variations longitudinales et temporelles des structures thermiques du Rhône français (Wawrzyniak et al., 2012). Dans le cadre de cette étude, un total de 83 images acquises par le satellite Landsat ETM+ entre 1999 et 2009 a été analysé. Ces images ont permis d'étudier les aménagements les plus larges. Des réponses différentes ont été observées selon les aménagements, les aménagements de Montélimar et Caderousse montrant les différences les plus marquées. Ces différences thermiques s'expliquent notamment par la longueur et la valeur du débit réservé du RCC. Le RCC est en effet d'autant plus long qu'il est plus sensible à l'échauffement et donc à la température de l'air. De plus, lorsque le débit du RCC est faible comparativement à celui des cours d'eau s'y déversant, leur température influence alors directement la température du RCC. C'est par exemple le cas avec la Cèze sur l'aménagement de Caderousse. Dans ce

contexte, des différences de température existent sans doute dans plusieurs autres aménagements - qui n'ont pas pu être étudiés avec les images Landsat du fait de leur faible largeur -, notamment les plus longs et ceux rejoints par un affluent apportant un débit significatif par rapport à l'écoulement du RCC.

Les RCC sont ainsi des tronçons pouvant présenter des températures estivales particulièrement élevées. **Le premier objectif de ce travail est de caractériser et comprendre le patron thermique longitudinal estival au niveau des RCC de Péage de Roussillon et de Donzère Mondragon en utilisant la télédétection IRT aéroportée.** Bien que les RCC puissent être particulièrement chauds, des zones froides – associées aux apports de nappe - peuvent exister localement. En effet, les eaux de nappe sont soumises à moins de variations en température que les eaux superficielles. Elles sont sténothermes. En été, les eaux souterraines sont ainsi plus froides que les eaux de la rivière et inversement l'hiver. **Le second objectif de ce travail est d'identifier par télédétection IRT de possibles apports phréatiques au niveau des deux RCC.** De nombreux casiers Girardon existent dans les deux RCC étudiés. Cependant, leur température est peu connue. Sont-ils plutôt froids car alimentés par des eaux souterraines ? Inversement sont-ils chauds car stagnants et particulièrement sensibles au réchauffement ? **Le troisième objectif de ce travail est ainsi de caractériser la température des casiers Girardon.** Enfin, une analyse plus exploratoire sera réalisée sur **l'effet de l'ombrage sur la température des rives du fleuve.**

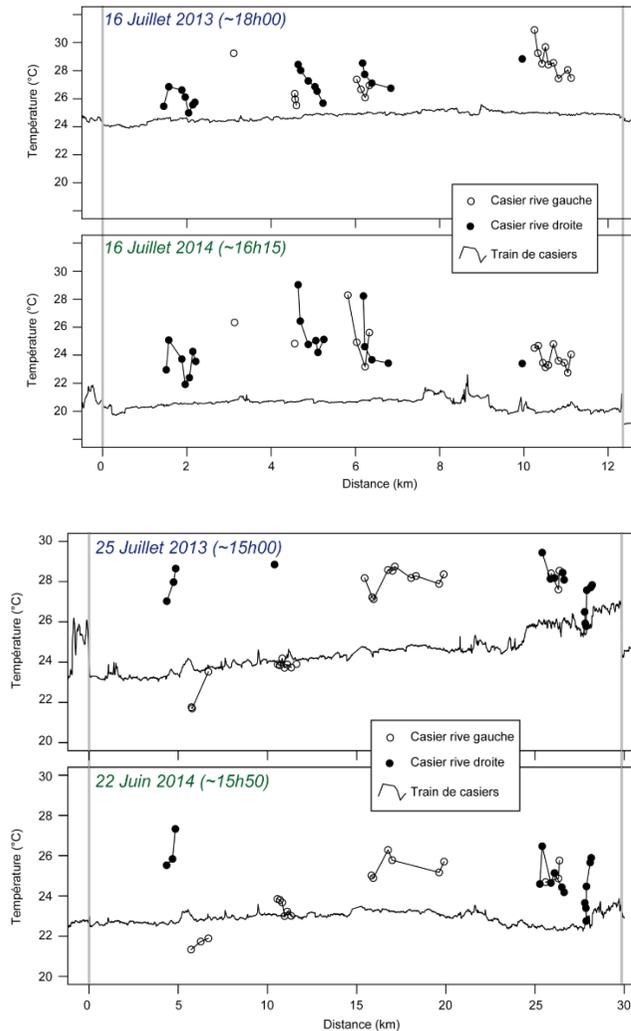
Principaux résultats

Le RCC s'échauffe plus rapidement que le canal. Ainsi, au niveau de leur confluence, une différence de température pouvant atteindre 2°C est observée. L'échauffement du RCC est plus important lorsque le débit est faible. L'échauffement le plus marqué a été observé pour le RCC de Donzère-Mondragon. Un relèvement du débit réservé entraînerait probablement une augmentation de température moins forte. Cette dernière pourrait être quantifiée par modélisation hydro-thermique.

Les RCC montrent une variabilité thermique faible. Cependant, localement des températures élevées peuvent être observées dans des zones peu profondes et/ou stagnantes (rives, zones entre épis, bras peu courants, casiers Girardon). Aucune tache d'eau froide n'a été identifiée dans les RCC. Toutefois, certains contre-canaux, bras ou casiers peuvent être froids lorsqu'ils sont alimentés par des eaux souterraines.

Les casiers Girardon sont très majoritairement plus chauds que le RCC probablement du fait de leur déconnexion avec les eaux courantes. C'est dans ces marges construites que les températures les plus élevées ont été observées. Seulement très peu de casiers sont froids (ils sont situés en rive gauche dans la partie amont du RCC de Donzère-Mondragon). Ces milieux plutôt rares pourraient être potentiellement intéressants pour certaines espèces pour lesquelles ils pourraient servir de refuges thermiques.

Une réflexion pourrait être envisagée par rapport à la connexion entre les zones froides (certains contre-canaux, bras ou casiers) et le reste de la masse d'eau. Par exemple, des casiers chauds et stagnants pourraient être connectés au contre canal pour devenir de potentiels refuges thermiques. La question de l'accès aux zones froides pour la faune se pose également. En effet, les contre-canaux, qui représentent la majorité des zones froides, sont-ils accessibles ? Enfin, il faut cependant garder à l'esprit que les zones froides ne représentent qu'une faible proportion de la masse d'eau totale. Des connexions trop importantes pourraient entraîner la disparition par dilution de certaines zones froides.



Profils longitudinaux de la température de l'eau au milieu du chenal et température des casiers Girardon pour l'aménagement de Péage-de-Roussillon (haut) et Donzère Mondragon (bas).

2. Zone d'étude

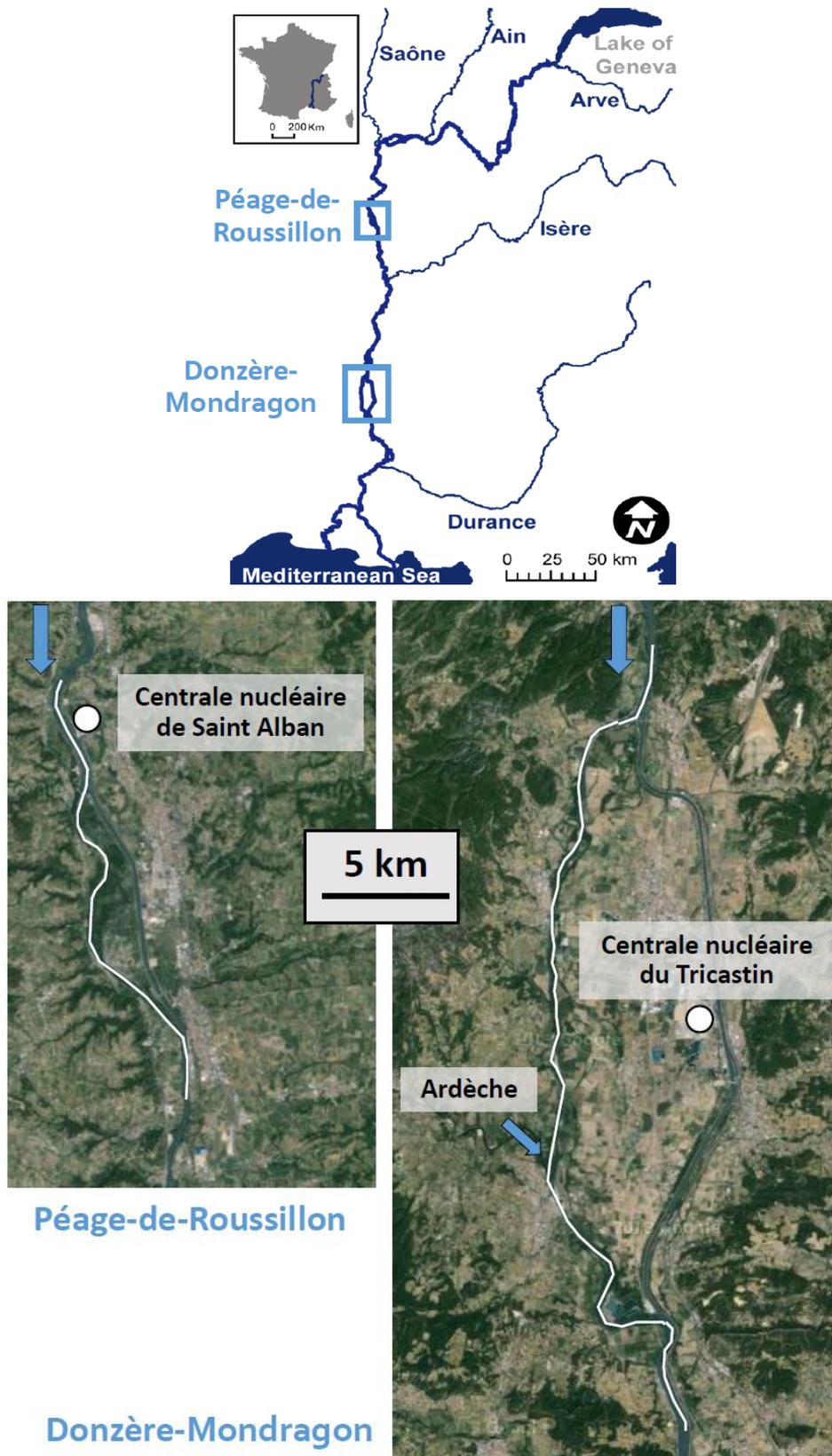


Figure 2.1. Les deux aménagements étudiés. Les traits blancs représentent les zones sur lesquelles les acquisitions thermiques ont été réalisées.

3. Méthodologie

3.1. Importance de la température de l'eau sur les écosystèmes

La température joue un rôle important sur l'écologie des rivières (Poole et Berman, 2001 ; Caissie, 2006 ; Acuña et Tockner, 2009). De nombreux concepts soulignent son rôle : le River Continuum Concept (RCC, Vannote et al., 1980), le Flood Pulse Concept (FPC, Junk et al., 1989 ; Tockner et al., 2000 ; Junk et Wantzen, 2004) et le Serial Discontinuity Concept (SDC, Ward et Stanford, 1983 ; Ward et Stanford, 1995 ; Ward et Stanford, 2001) font référence à ce paramètre.

La température de l'eau est importante pour les poissons. Bien que d'autres facteurs entrent en jeu, elle peut avoir des impacts sur la physiologie et la répartition des espèces piscicoles en milieu fluvial (Coutant, 1977 ; Coutant, 1999). La tolérance thermique des poissons varie en fonction des espèces, mais aussi des stades du cycle de vie : reproduction, stades embryonnaire, larvaire, juvénile et adulte (Tissot et Souchon, 2010). Les poissons d'eau froide, tels les salmonidés (par exemple la truite fario, *Salmo trutta*), ont des tolérances thermiques assez faibles : entre 19,8°C et 24,3°C (Mohseni et al., 2003). En été, lorsque la température de l'eau atteint des valeurs élevées, ces espèces peuvent chercher des zones refuges plus froides (Kaya et al., 1977 ; Torgersen et al., 1999 ; Ebersole et al., 2001 ; Ebersole et al., 2003b). Ces zones froides sont bien souvent associées aux échanges entre la nappe et la rivière. Elles peuvent notamment correspondre à des exfiltrations latérales ou des bras morts (Ebersole et al., 2003a)

Les espèces d'eau froide sont particulièrement sensibles au changement climatique (Rahel et al., 1996 ; Mohseni et al., 2003 ; Pont et al., 2003). Au contraire, les augmentations de température peuvent permettre à des poissons d'eau chaude de remplacer ceux d'eau froide (Daufresne et al., 2003). Les espèces d'eau froide peuvent donc voir leur habitat diminuer, comme l'observent Hari et al. (2006) dans certains cours d'eau alpins. En France, du fait de l'augmentation des températures de

l'eau, Daufresne et Boët (2007) montrent une augmentation des abondances, proportions et richesses spécifiques des espèces piscicoles d'eau chaude dans les principaux cours d'eau du pays. Dans les rivières ne présentant pas de refuges thermiques altitudinaux, les espèces d'eau froide seront affectées (Pont et al., 2003), tout comme dans les rivières ne présentant pas de structures thermiques locales plus froides. Par conséquent, le changement climatique pouvant également affecter la géomorphologie (Goudie, 2006), il est essentiel de tenir compte des évolutions morphologiques qui permettront ou non le maintien de refuges thermiques (Poirel et al., 2010).

Comme pour les poissons, la température de l'eau est aussi un des paramètres clés pour les invertébrés. Du fait de leur température plus élevée, les cours d'eau tropicaux présentent une richesse spécifique plus importante que les cours d'eau des milieux tempérés (Jacobsen et al., 1997). Milner et al. (2001) montrent que, dans des rivières proglaciaires, la présence de certaines espèces de macro-invertébrés est directement liée à la température et que celle-ci influence également les communautés. Dans les rivières en tresses, les hétérogénéités de température de l'eau entraînent une grande diversité thermique des habitats. Elles pourraient ainsi augmenter la diversité écologique, plus particulièrement celle des communautés d'invertébrés (Malard et al., 2001; Uehlinger et al., 2003 ; Karaus et al., 2005). Les différences thermiques créent une mosaïque thermique complexe de la plaine d'inondation (Tonolla et al., 2010). Tockner et al. (2006) soulignent que la compréhension de la dynamique de cette mosaïque est un enjeu écologique important.

Enfin, la température de l'eau n'influence pas seulement les communautés animales. Elle fait partie des facteurs abiotiques affectant les plantes aquatiques, avec la lumière, les nutriments, le substrat ou les conditions hydrauliques (Bornette et Puijalon, 2011). La température influence la répartition des plantes et leur croissance en affectant les réactions chimiques lors de la photosynthèse (Barko et al., 1986 ; Carr et al., 1997). Les optima de photosynthèse varient selon les espèces de plante, mais sont généralement situés entre 20°C et 35°C (Barko et al., 1986). Inversement,

les plantes aquatiques peuvent modifier la température de l'eau en interceptant de la chaleur avec leurs feuilles, en faisant de l'ombre et en réduisant la vitesse du courant (Dale et Gillespie, 1977).

3.2. L'imagerie infrarouge thermique des cours d'eau

Une image infrarouge thermique est un enregistrement de la température de surface. Contrairement aux photographies pour lesquelles la mesure s'effectue dans le spectre électromagnétique du visible (0,4-0,8 μm), l'acquisition des images thermiques est réalisée dans l'infrarouge thermique (0,8-14 μm), souvent dans l'infrarouge moyen (3-5 μm) ou lointain (8-14 μm) (figure 3.1). Le rayonnement IRT est mesuré par un capteur thermique pouvant directement être utilisé à partir du sol ou embarqué par des vecteurs aéroportés ou satellitaires. La télédétection IRT a ainsi l'avantage de pouvoir spatialiser l'information thermique contrairement aux mesures *in situ*. Elle permet d'obtenir une cartographie détaillée de la température de surface.

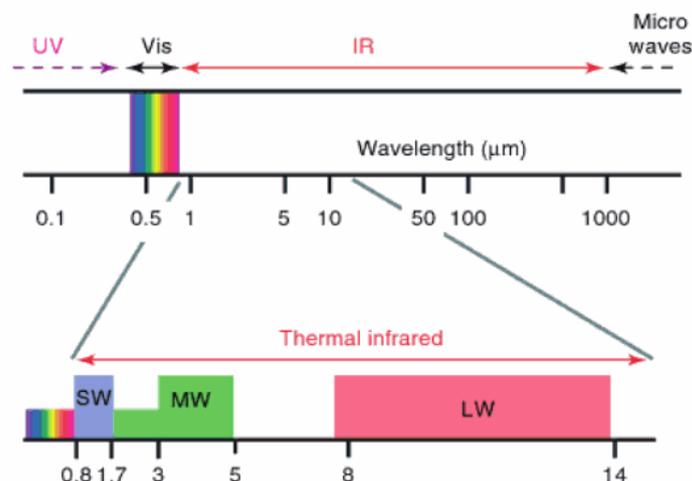


Figure 3.1. Infrarouge (IR) et régions spectrales adjacentes. L'infrarouge thermique (IRT) est situé entre 0,8-14 μm . (Vollmer et Möllmann, 2010).

3.2.1.Acquisition et mesure de la température de surface de l'eau

Les premières applications aquatiques de l'imagerie IRT ont été marines (Anding et Kauth, 1970 ; Jessup et al., 1997) du fait de la résolution spatiale grossière des images satellites (Kay et al., 2005). Puis l'intérêt se porta également sur les lacs (Anderson et al., 1995 ; LeDrew et Franklin, 1985). L'application de l'imagerie IRT aux cours d'eau est plus récente, émergeant notamment à la suite de recherches portant sur l'habitat piscicole et utilisant des vecteurs aéroportés (Atwell et al., 1971 ; Torgersen et al., 1999). L'utilisation de l'imagerie IRT aux cours d'eau est décrite en détails par Torgersen et al. (2001). Handcock et al. (2006) discutent plus précisément la précision et l'incertitude de ces méthodes à différentes échelles spatiales. Une synthèse a également été réalisée récemment par Handcock et al. (2012).

Torgersen et al. (2001) identifient et exposent différentes sources d'erreurs de l'imagerie IRT des cours d'eau : émissivité de la surface de l'eau, réflexions de radiations environnantes, stratifications thermiques à la fois aux niveaux microscopiques et macroscopiques.

L'émissivité de l'eau est fonction de l'angle de vue (Ishiyama et al., 1995), de la rugosité de surface (Masuda et al., 1998) et de la turbidité (Liu et al., 1987). Pour des angles jusqu'à 30° par rapport au nadir, l'émissivité varie très peu, mais diminue de façon importante pour des angles élevés (>70°) (Ishiyama et al., 1995). Lors des campagnes aéroportées, ce phénomène n'a pas d'incidence car l'angle d'observation est proche du nadir. Ce n'est par contre pas le cas lors d'acquisitions obliques à partir du sol. En milieu fluvial, l'influence de la turbidité sur l'émissivité de l'eau n'a jamais été étudiée. Cardenas et al. (2008) effectuent des acquisitions thermiques pour différentes conditions de turbidité mais n'évaluent pas leurs effets. Enfin, comme l'émissivité de l'eau varie avec la rugosité de la surface, de légères différences de température entre les mouilles et les seuils peuvent exister sur les images IRT (Torgersen et al., 2001).

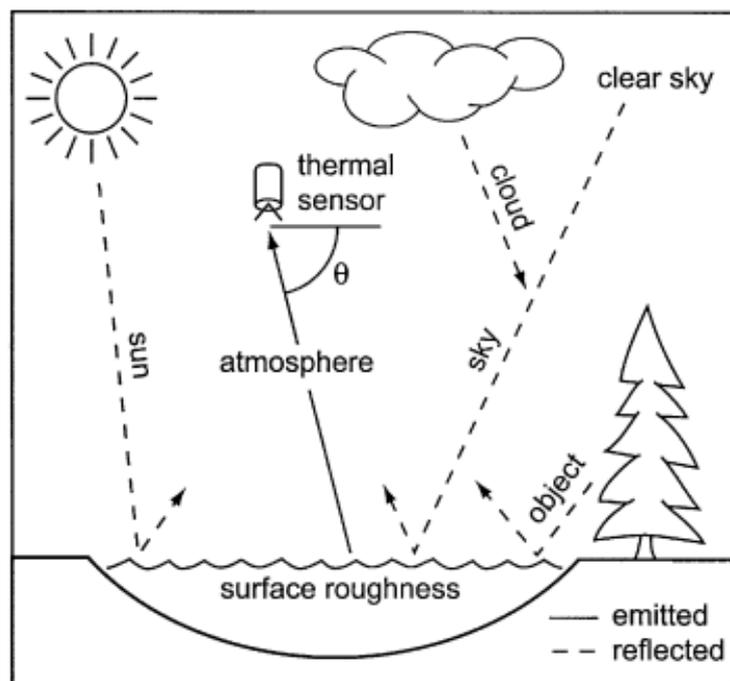


Figure 3.2. Sources des radiations IRT émises et réfléchies en télédétection fluviale (Torgersen et al., 2001).

Une image thermique est une combinaison de radiations émises par l'eau et de radiations issues d'autres objets se réfléchissant sur le miroir (Torgersen et al., 2001). La figure 3.2 illustre ces différents types de radiations. Entre 8 et 12 μm , les réflexions thermiques provenant du soleil sont minimales, mais pas celles des nuages et d'objets terrestres riverains, notamment la végétation et la berge si celle-ci est haute au contact de la masse d'eau. Ces réflexions sont spéculaires sur les surfaces lisses et diffuses sur les surfaces rugueuses (Cox et Munk, 1954). Cela explique pourquoi les mouilles présentent souvent, à cause de la réflexion spéculaire du ciel plus froid, une température plus faible que les zones de seuils, d'environ quelques dixièmes de degrés (Torgersen et al., 2001). Pour minimiser les réflexions provenant de l'environnement rivulaire, les acquisitions doivent être effectuées avec un angle d'observation le plus proche possible du nadir (Torgersen et al., 2001 ; Hancock et al., 2006). Cela implique une observation la plus verticale possible, verticalité aisément atteinte avec des vecteurs satellitaires ou aériens.

Lorsque l'écoulement est laminaire, un cours d'eau peut présenter une stratification thermique horizontale à deux échelles : microscopique (mm) et macroscopique (m)

(Schluessel et al., 1990 ; Torgersen et al., 2001). Dans les premiers millimètres de la masse d'eau, l'évaporation de l'eau entraîne une perte de chaleur et donc une diminution de température. Cette couche d'échange est plus profonde que les 100 premiers microns de la surface de l'eau émettant une radiation IRT ; ce qui engendre des erreurs de 0,1–0,2°C dans la mesure de la température de l'eau (Schluessel et al., 1990). Bien que ce phénomène soit très peu connu en télédétection fluviale, cette couche est probablement limitée grâce au courant, bien que certaines mouilles puissent parfois enregistrer la formation d'une telle couche (Torgersen et al., 2001). À l'échelle macroscopique, une stratification thermique peut aussi exister. En période d'étiage, les mesures TIR au niveau de zones calmes telles que les mouilles ou bras morts peuvent être biaisées par la présence d'une couche d'eau plus chaude en surface (Handcock et al., 2006 ; Torgersen et al., 2001). De la même manière, des arrivées phréatiques dans la partie inférieure du lit peuvent ne pas être correctement détectées si l'on ne s'en tient qu'à des observations de surface.

En parallèle de l'acquisition thermique, il est judicieux d'obtenir une couverture d'images visibles, si possible de même résolution spatiale et couvrant la même surface. Ces images sont utiles pour le mosaïquage et le géoréférencement des images thermiques. De plus, elles sont essentielles à la validation des mesures car elles permettent d'identifier les entités exondées telles les bancs de galets ou des taches de végétation. Cette identification est importante car des objets différents peuvent avoir la même signature thermique. Par exemple, une ombre sur un banc de galets peut présenter la même température qu'une arrivée phréatique d'eau froide.

3.2.2. Imageries satellite et aéroportée

Différents satellites d'observation (table 3.1) disposent d'instruments capables de mesurer le rayonnement IRT. L'usage des images satellites IRT est encore limité à l'étude des cours d'eau les plus larges. Handcock et al. (2006) montrent que la télédétection IRT ne permet d'étudier que les cours d'eau dont la largeur comprend au moins trois pixels. Cela représente par exemple 180 mètres pour les images Landsat ETM+. Ce satellite est le vecteur ayant la meilleure résolution spatiale. De

nouveaux algorithmes visant à améliorer les résolutions spatiales (Teggi, 2011) pourraient à l'avenir permettre une utilisation plus large de ce type d'images thermiques.

Instruments	Satellites	Résolutions spatiales thermiques (m)
ETM+	Landsat 7	60
TM	Landsat 5	120
MODIS	Terra	1000
MODIS	Aqua	1000
ASTER	Terra	90
AVHRR/3	NOAA	1090

Table 3.1. Liste des satellites disposant de capteurs thermiques et leurs résolutions spatiales associées.

Le programme Landsat est un programme d'observation satellite de la terre qui a débuté dans les années 70. Les images Landsat sont utilisées pour un très grand nombre d'applications dans divers domaines. Les recherches sur les systèmes fluviaux se basant sur ces images sont nombreuses (citons par exemple, Baban, 1993 ; Mertes et al., 1993 ; Frazier et Page, 2000), mais peu concernent la température des cours d'eau (Cherkauer et al., 2005 ; Kay et al., 2005 ; Handcock et al., 2006). Le satellite le plus récent du programme, Landsat 7, a été mis en orbite en avril 1999. Il est équipé d'un instrument de mesure, Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+), permettant des observations dans huit fenêtres spectrales. La résolution spatiale de la bande thermique (TM6) est de 60 mètres ce qui constitue une amélioration significative par rapport à la résolution de 120 mètres du précédent vecteur, Landsat 5. La figure 3.3 donne un aperçu d'une image thermique Landsat au niveau de l'aménagement hydroélectrique de Montélimar. L'accès aux données est gratuit depuis 2003, ce qui coïncide avec un incident sur le satellite. En effet, le 31 Mai 2003, le Scan Line Corrector (SLC), appareil permettant un bon alignement des

bandes horizontales de l'image, est tombé en panne. Il en résulte que depuis cette date, certaines zones ne sont pas imagées.

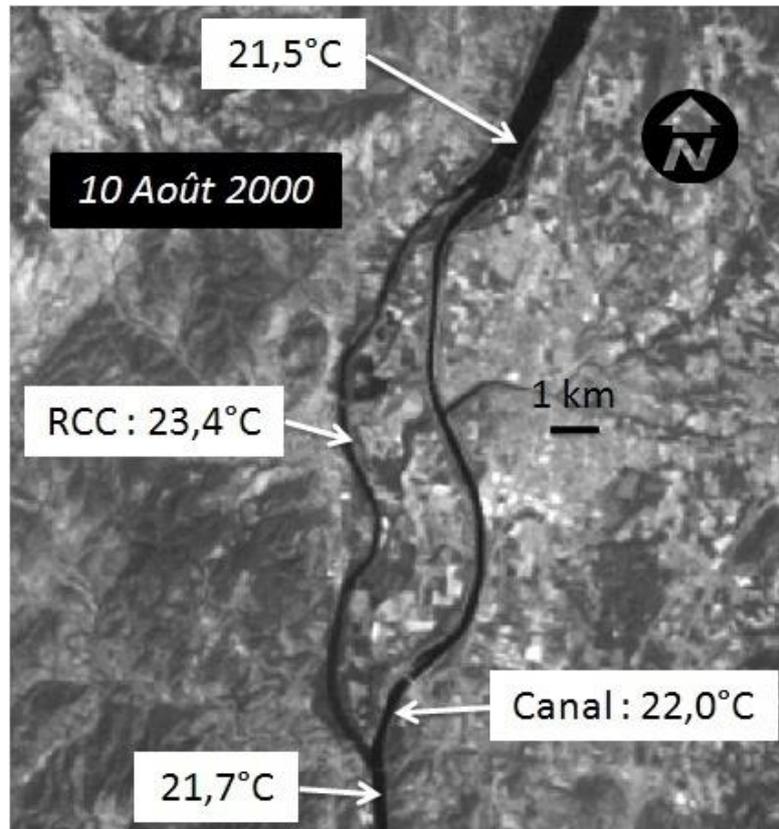


Figure 3.3. Image thermique Landsat 7 ETM+ du Rhône au niveau de l'aménagement de Montélimar. Pour deux objets ayant la même émissivité, le noir représente les zones froides et le blanc les zones chaudes. Les flèches indiquent les températures de l'eau à différents endroits.

Outre les satellites, des vecteurs aéroportés, généralement des avions ou hélicoptères, peuvent être utilisés. La résolution spatiale est alors dépendante de l'altitude de vol. Par rapport aux satellites, ces vecteurs ont l'avantage de pouvoir acquérir des images avec de bien meilleures résolutions spatiales : 5 mètres (Banks et al., 1996), 1 mètre (Cristea et Burges, 2009), 0,2-0,6 mètre (Torgersen et al., 1999), 0,2-0,4 mètre (Torgersen et al., 2001), 0,15-0,50 mètre (Raynes et Henderson, 2004), 0,16-0,21 mètre (Loheide et Gorelick, 2006). Torgersen et al. (2001) font plusieurs recommandations quant à ce type d'acquisition. L'altitude du vol doit être choisie en fonction de la résolution spatiale souhaitée, elle-même souvent liée à la largeur du cours d'eau. L'utilisation d'un hélicoptère doit être

préférée à celle d'un avion car il présente les avantages de pouvoir suivre un parcours sinueux, s'ajuster rapidement au contexte topographique et voler à une plus faible vitesse ainsi qu'à une altitude plus basse. Enfin, il est indispensable d'avoir de bonnes conditions météorologiques lors de l'acquisition car l'observation est impossible à travers les nuages ou le brouillard (Handcock et al., 2012).

3.2.3. Précision absolue versus précision relative, et échelles

En télédétection IRT, les précisions relatives sont généralement meilleures que les précisions absolues. La précision absolue (accuracy en anglais) représente la différence entre la mesure obtenue par télédétection IRT et la température réelle de l'eau. La précision relative (uncertainty ou precision en anglais) correspond à la limite de sensibilité au sein même d'une image. Par exemple, une précision relative de $0,1^{\circ}\text{C}$ indique que le capteur peut détecter des différences thermiques supérieures ou égales à cette valeur. Les différences inférieures correspondent alors à du bruit. Les précisions relatives de la caméra thermique utilisée dans ce travail est de $\pm 0,05^{\circ}\text{C}$. Celle du canal thermique de Landsat ETM+ est moins bonne : $\pm 0,22^{\circ}\text{C}$ à 7°C (Chander et al., 2009). La précision relative peut aussi être estimée en calculant l'écart type de la température dans une zone thermiquement homogène (Handcock et al., 2006).

L'atmosphère altère le signal infrarouge allant de la surface de l'eau au capteur. Pour corriger ces effets, des corrections atmosphériques peuvent être appliquées (Schott et al., 2001). Elles s'appuient sur des modèles de transfert radiatif calculant la transmittance de l'atmosphère. Nous pouvons citer LOWTRAN (Kneizys et al., 1988 ; Schott, 1994) et MODTRAN (Berk et al., 1999). Ces modèles nécessitent des profils verticaux de température et de vapeur d'eau pouvant être obtenus par utilisation combinée de ballon-sondes et de modèles météorologiques à haute résolution spatiale (Kay et al., 2005). Toutefois, de tels profils étant difficiles à obtenir, les données de stations météorologiques au sol sont souvent utilisées (Torgersen et al., 2001). Les mesures *in situ* réalisées avec des thermomètres peuvent être utilisées pour calibrer les données de télédétection (Faux et al., 2001). Les thermomètres

doivent être positionnés dans des zones présentant peu de variabilité thermique. Les données de validation acquises sur le terrain peuvent inclure des profils thermiques verticaux permettant d'évaluer la présence d'une telle stratification thermique (Torgersen et al., 2001 ; Kay et al., 2005 ; Handcock et al., 2006).

En s'appuyant sur des acquisitions satellitaires et aéroportées (pixels de 5 à 1000 m) pour différentes tailles de cours d'eau, Handcock et al. (2006) montrent que plus la résolution spatiale est fine, plus les précisions absolues et relatives sont bonnes. Pour les cours d'eau avec plus de trois pixels de large, ces auteurs calculent des précisions moyennes absolue et relative de $1,2^{\circ}\text{C}$ et $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$. Lorsque la largeur de la rivière n'est plus représentée que par un pixel au maximum, les valeurs passent à $7,6^{\circ}\text{C}$ et $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ (Handcock et al., 2006). Atwell et al. (1971) observent également des erreurs importantes, plus de 3°C , lorsque la largeur du cours d'eau est inférieure à un pixel. Quand la largeur du cours d'eau est représentée par de nombreux pixels, la précision absolue peut être bonne comme le soulignent plusieurs études : $0,55^{\circ}\text{C}$ (Loheide et Gorelick, 2006), $0,5^{\circ}\text{C}$ (Madej et al., 2006 ; Torgersen et al., 2001) et $0,4^{\circ}\text{C}$ (Torgersen et al., 1999).

3.3. Acquisition des images aéroportées sur les deux RCC



Figure 3.4. Caméras IRT VarioCAM® hr research (Infratec).

Pour cette étude, une caméra VarioCAM® hr research (Infratec) a été utilisée (figure 3.4). Elle possède une grande matrice (640 × 480 pixels) et dispose de 2 objectifs : un standard de 30 mm et un grand angle de 12.5 mm. La table 3.2 récapitule les emprises au sol et les tailles de pixels pour cet appareil en fonction de l'altitude de vol et de l'objectif utilisé. Ces paramètres peuvent être calculés grâce à des outils simples accessibles en ligne que proposent certains fabricant de caméras thermiques (par exemple le site <http://www.infratec.de> pour les caméras de cette marque). En parallèle de l'acquisition thermique, des photos dans le visible ont été collectées.

Altitude (m)	Emprise au sol de l'image (m)		Taille pixels (cm)	
	objectif 30 mm	grand angle 12,5 mm	objectif 30 mm	grand angle 12,5 mm
50	27 x 20	64 x 48	4,2	10
100	53 x 40	128 x 96	8,3	20
150	80 x 60	192 x 144	12,5	30
200	107 x 80	256 x 192	16,7	40
500	267 x 200	640 x 480	41,7	100
1000	533 x 400	1280 x 960	83,3	200

Table 3.2. Emprise au sol et taille des pixels de la caméra thermique en fonction de l'altitude et de l'objectif utilisé.

Quelques kilomètres du RCC de Péage-de-Roussillon se situent dans la zone interdite temporaire (ZIT) de la centrale nucléaire de Saint Alban. Par conséquent, il est impossible de voler à une altitude inférieure à environ 1200 m. L'objectif standard a ainsi été utilisé, le grand angle n'offrant pas une assez bonne résolution spatiale pour observer les petits objets tels les casiers. Par soucis de comparaison, tous les vols ont été réalisés à des altitudes comparables : entre 1200 m et 1500 m, ce qui permet d'obtenir des résolutions spatiales entre 110 et 163 cm (table 3.3).

Site	Date	Heure	Débit (m ³ /s)	Résolution (cm)
Péage-de-Roussillon	16 Juillet 2013	17h47 à 18h18	90	132
	16 Juillet 2014	16h06 à 16h31	117	113
Donzère-Mondragon	25 Juillet 2013	14h42 à 15h11	49	110
	22 Juin 2014	15h43 à 15h58	73	163

Table 3.3. Récapitulatif des acquisitions. Pour Péage-de-Roussillon, le débit indiqué est celui de la station de Serrières. Pour Donzère-Mondragon, la station de Bourg-Saint-Andéol a été utilisée.

Pour chaque aménagement, deux vols ont été réalisés (table 3.3). Ceux de 2013 ont été effectués avec un hélicoptère (Robinson R22 de la société Azur Hélicoptère) alors qu'en 2014 un ULM a été utilisé (société Franck Toussaint ULM) (figure 3.5).



Figure 3.5. Hélicoptère et ULM utilisés pour les acquisitions thermiques.

3.4. Calages et validations

Simultanément aux acquisitions aéroportées, la température de l'eau a été mesurée sur le terrain. Des thermomètres enregistreurs dont la précision se situe autour de 0,1°C ont été utilisés (figure 3.6).



Figure 3.6. Vemco Minilog-II-T *Submersible Temperature Data Logger* (photo Vemco).

De bonnes corrélations ont été observées entre les données des thermomètres et les valeurs de températures des images (les coefficients de corrélation varient de 0,77 à 0,94). Les images ont été calibrées avec les données *in situ*. Pour chaque acquisition, la différence moyenne entre les mesures des thermomètres et les valeurs des pixels a été calculée. Cette différence a servi de coefficient pour calibrer les images.

3.5. Traitements réalisés

Les images thermiques ont été géoréférencées en utilisant la BD ORTHO® de l'IGN. Une cinquantaine d'images a été nécessaire pour Péage-de-Roussillon. Le RCC de Donzère-Mondragon étant plus long, il a fallu une centaine d'images pour couvrir le tracé du chenal au niveau de cet aménagement.

Les surfaces en eau ont été digitalisées par photo-interprétation. Pour cette étape, les photos dans le visible, collectées en même temps que les images thermiques, ont été utilisées. La digitalisation du RCC et du canal a été effectuée à l'échelle 1/3000. Pour les objets plus petits tels les casiers et les bras, une échelle de 1/1000 a été retenue.

Pour supprimer les pixels contaminés par des objets terrestres (c.à.d. les pixels composés à la fois d'eau et de surfaces exondées), une zone tampon négative (buffer interne) a été calculée. L'épaisseur de cette zone est de 1,5 fois la résolution spatiale des images, soit entre 1.5 et 2.5 m suivant les campagnes. Les données dans cette zone n'ont pas été prises en compte dans l'analyse.

4. Résultats

4.1. Patron thermique longitudinal

Au niveau des deux aménagements, le patron thermique longitudinal du Rhône au plus chaud de l'été présente de nombreuses variations (figure 2.1). La centrale nucléaire de Saint-Alban échauffe localement le Rhône (jusqu'à 5°C en surface) en amont du RCC de Péage-de-Roussillon. Toutefois, la masse d'eau entrant dans le RCC ne dépasse pas 0,5°C de plus que l'eau en amont de la centrale. Les barrages peuvent également entraîner localement une augmentation de la température. Ceci est visible en amont du barrage de Donzère-Mondragon pour la campagne de 2013. Cette augmentation d'environ 2.5°C est probablement liée à un échauffement de surface lié à de faibles vitesses en amont du barrage. Ce phénomène n'a cependant pas été observé pour la campagne de 2014.

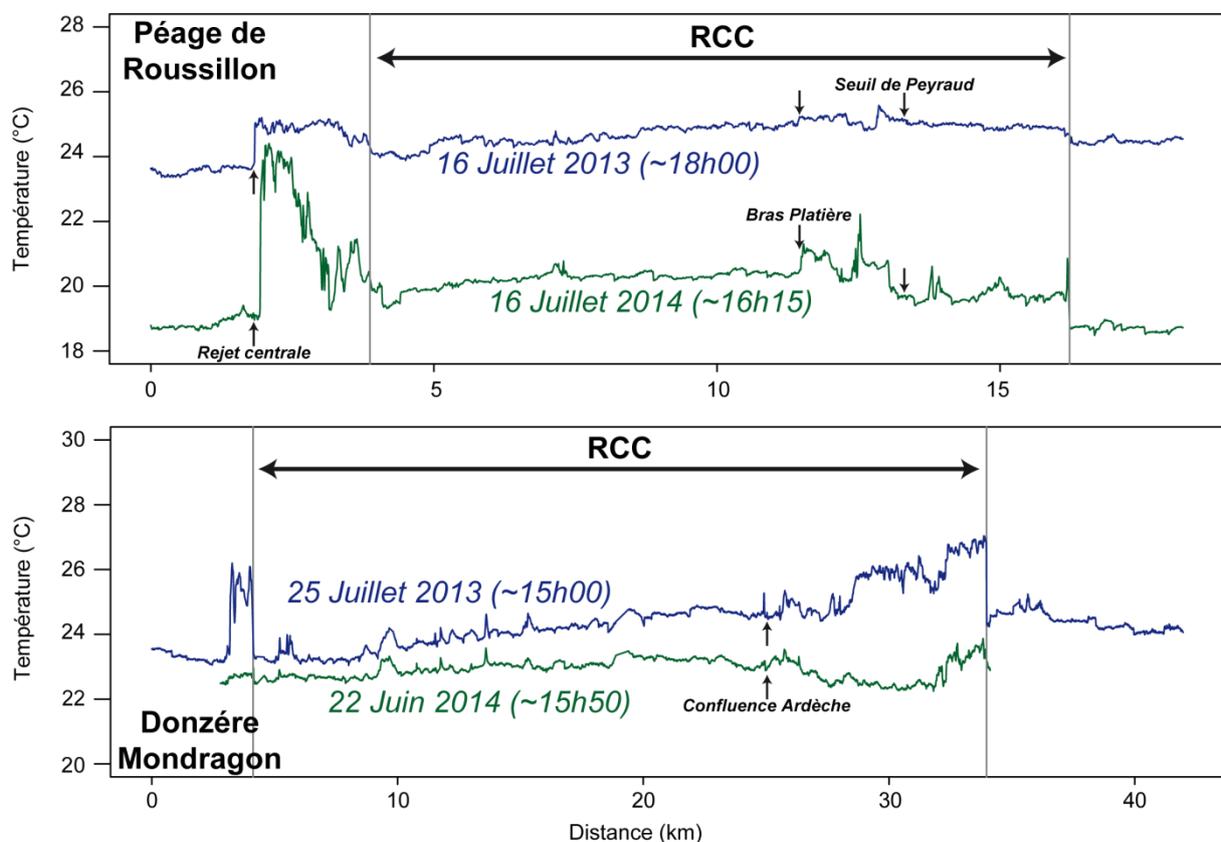


Figure 2.1. Profils longitudinaux de la température de l'eau au milieu du chenal pour les aménagements de Donzère-Mondragon et Péage-de-Roussillon.

Dans la majorité des cas, l'eau s'échauffe plus rapidement le long du RCC que le long du canal (table 2.1). Ceci s'explique par le fait que le RCC, moins profond et moins courant que le canal, est plus sensible aux conditions externes. Au niveau de la confluence entre le RCC et le canal, une différence de température pouvant atteindre 2°C est observée. A noter qu'à Donzère-Mondragon, le RCC est plus chaud que le canal alors que ce dernier a été influencé par le rejet chaud de la centrale nucléaire de Tricastin.

Les profils présentent également des variations de températures liées à des apports d'eau provenant de bras ou d'affluents. En 2014, une augmentation de température du RCC de Péage-de-Roussillon est observée en aval du bras de la Platière. L'Ardèche, confluent dans le RCC de Donzère-Mondragon, a un effet thermique. Sur les images, son panache chaud est clairement visible à partir du km 25. A une échelle plus fine, des variations de températures sont également observées. Elles sont par exemple particulièrement visibles entre les km 5 et 20 du RCC de Donzère-Mondragon. Ces différences sont observées durant les 2 acquisitions. Elles semblent être liées aux conditions hydrauliques locales avec notamment des zones moins profondes qui sont plus chaudes.

L'échauffement du RCC est plus marqué lorsque le débit est plus faible (table 2.1). Si l'on s'intéresse uniquement aux parties du RCC en amont du bras de la Platière (pour Péage-de-Roussillon) et en amont de l'Ardèche (pour Donzère-Mondragon), l'échauffement du RCC semble également être lié au débit (0,13°C/km (à 90 m³/s) et -0.1°C/km (à 117 m³/s) pour Péage-de-Roussillon / 0,07°C/km (à 49 m³/s) et 0.02°C/km (à 73 m³/s) pour Donzère-Mondragon). Pour Péage-de-Roussillon, un débit relativement important est observé dans le RCC durant les acquisitions. Nous pouvons supposer qu'un échauffement plus marqué se produirait en condition de débit réservé (20 m³/s avant 2014, 55-125 m³/s depuis).

	Date et débit	Échauffement RCC	Échauffement Canal
Péage-de- Roussillon	16/07/2013 - 90 m ³ /s	0,9°C (0,07°C/km)	0,4°C (0,04°C/km)
	16/07/2014 - 117 m ³ /s	-0,1°C (-0,01°C/km)	-1,1°C (-0,10°C/km)
Donzère- Mondragon	25/07/2013 - 49 m ³ /s	3,6°C (0,12°C/km)	1,3°C (0,05°C/km)
	22/06/2014 - 73 m ³ /s	1,0°C (0,03°C/km)	0,6°C (0,02°C/km)

Table 2.1. Echauffements le long du RCC et du Canal.

4.2. Hétérogénéité thermique spatiale

Les profils longitudinaux précédents montrent l'évolution de la température de l'eau au milieu du chenal du Rhône. Toutefois, des différences de température existent plus localement. Les casiers Girardon sont ainsi les zones observées les plus chaudes. En effet, ils peuvent atteindre plus de 30°C.

Un des objectifs de ce travail était d'identifier par télédétection IRT de possibles apports phréatiques. Nous pensions observer des taches d'eau froide comme cela a pu être le cas dans d'autres études (Torgersen et al., 2001 ; Dugdale et al., 2013). En France, de telles anomalies thermiques ont par exemple été observées sur la rivière d'Ain (Wawrzyniak, 2012). Ces anomalies thermiques sont bien souvent engendrées par des apports d'eau souterraine plus froide. Dans certains bras morts, elles peuvent également être liées à l'ombrage de la ripisylve. Ici, aucune tache d'eau froide n'a été identifiée dans les chenaux courant des RCC ou dans le canal. Cependant, certains contre-canaux, bras ou casiers peuvent être froids car alimentés par des eaux souterraines.

Pour analyser l'hétérogénéité thermique spatiale, les surfaces en eau ont été divisées en plusieurs masses d'eau : le RCC, le Canal, les Contre-canaux, les Bras, les Casiers et les Epis (figure 2.2).

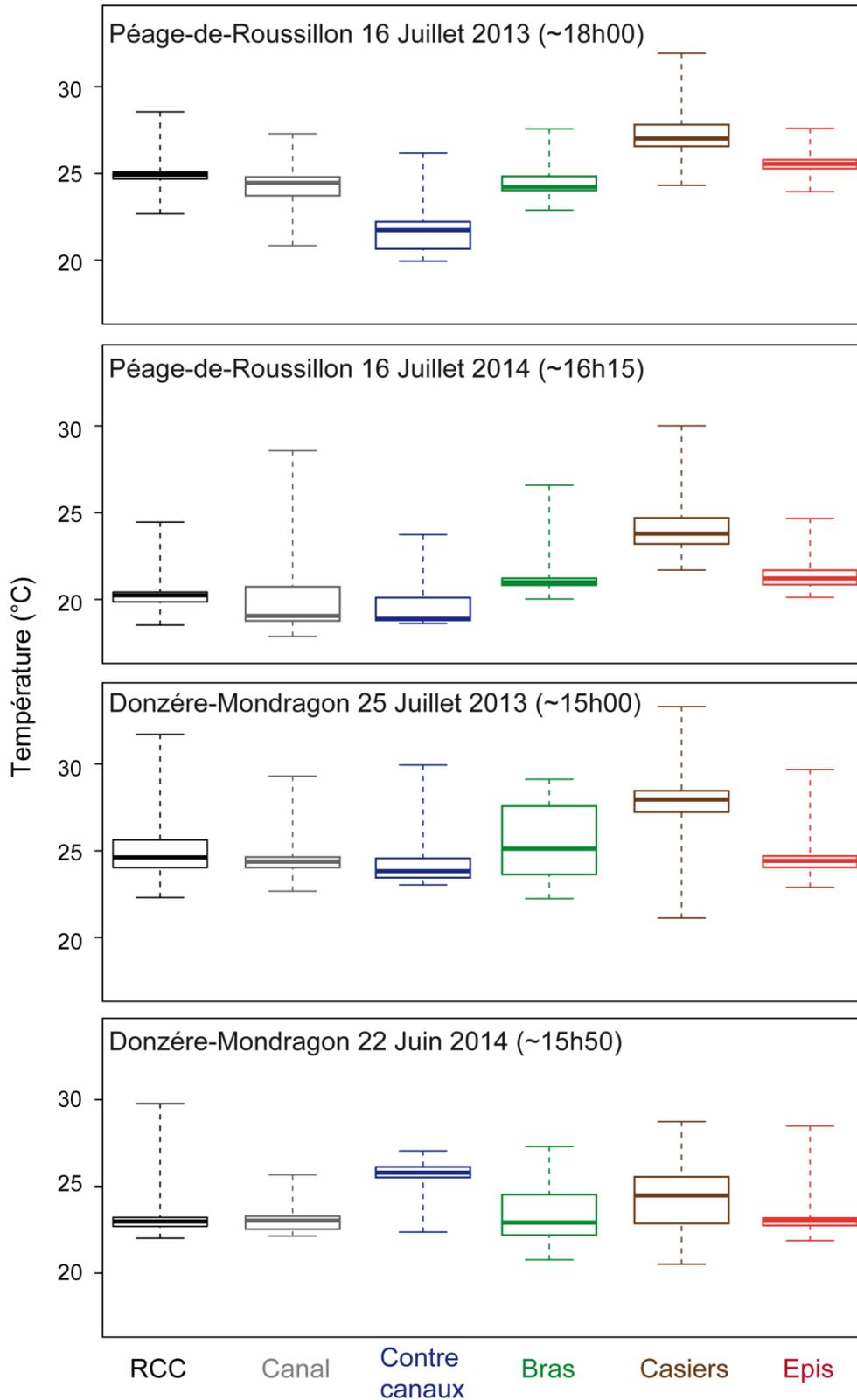


Figure 2.2. Variabilité thermique des différentes masses d'eau. La barre horizontale indique la médiane. La boîte représente les 1^{er} et 3^e quartiles. Les moustaches indiquent les valeurs minimales et maximales.

Les RCC présentent une faible variabilité thermique. Cependant, localement des températures élevées peuvent être observées dans des zones peu profondes et/ou stagnantes. Ces zones sont bien souvent situées à proximité des rives du RCC. Les canaux sont légèrement plus froids que les RCC comme expliqué précédemment. Ils présentent également une faible variabilité thermique car ils sont courants, ce qui homogénéise la température. Les contre canaux sont généralement plus froids que les RCC. Nous expliquons cela par le fait qu'ils drainent de l'eau souterraine. Pour l'acquisition de 2014 sur Donzère-Mondragon, ce phénomène n'a pas été observé. Durant cette acquisition, uniquement une très petite partie des contre canaux a été imagée. Cette partie n'est pas forcément représentative de l'ensemble des contre canaux.

Les bras ont un comportement plus contrasté. Pour Péage-de-Roussillon, le bras de la Platière représente quasiment la totalité de la surface des bras. En 2013, il est légèrement plus froid que le RCC. En effet, ce bras est alimenté par de l'eau froide provenant du contre canal. En 2014, la situation est différente. La partie amont du bras de la Platière est froide, mais ce dernier se réchauffe très rapidement. Le bras est ainsi en moyenne plus chaud que le RCC. A noter également que certaines parties des bras peuvent être chaudes car peu profondes et/ou stagnantes. Pour Donzère-Mondragon, deux types de bras sont observés. Le premier type est composé de bras stagnants chauds. Le second type correspond à des bras alimentés par la nappe de versant passant sous le canal mais aussi par l'eau du canal (Paran et al., 2012). Ils sont localisés en rive gauche, dans la moitié amont du RCC. Ces bras sont plus froids que le RCC.

Les marges construites ont également un effet sur la température de l'eau s'y trouvant. Les casiers Girardon présentent ainsi la plus grande variabilité thermique. Ils seront traités plus en détail dans le paragraphe suivant. Les zones entre épis montrent une température légèrement différente du RCC. Pour Péage-de-Roussillon, ces zones sont un peu plus chaudes que le RCC alors que pour Donzère-Mondragon nous observons l'inverse. Ces différences pourraient s'expliquer par des conditions hydrauliques différentes. La longueur des épis ainsi que leur état ont des effets sur

les conditions hydrauliques inter-épis. La comparaison de ces deux paramètres pour les aménagements de Péage-de-Roussillon et Donzère-Mondragon amènerait probablement des éléments explicatifs quant à ces différences de température.

4.3. Température des casiers Girardon

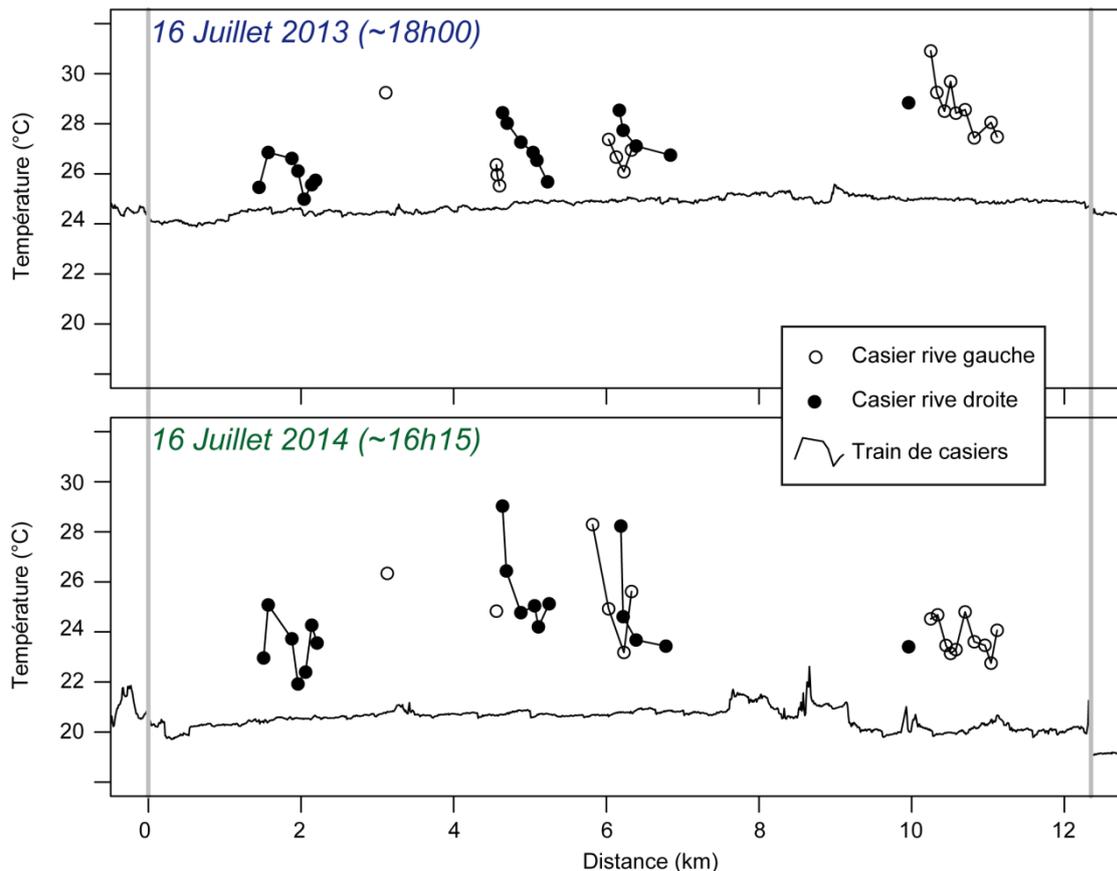


Figure 2.3. Température des casiers Girardon pour l'aménagement de Péage-de-Roussillon.

Tous les casiers localisés à Péage-de-Roussillon présentent une température plus élevée que le RCC (figure 2.3). Cela a été observé pour tous les casiers durant les 2 campagnes (2013 et 2014). Des gradients thermiques sont identifiés pour certains trains de casiers : les casiers amont sont chauds, puis la température décroît vers l'aval. Ce phénomène n'est pas généralisé mais il est observé plusieurs fois et certains trains présentent ce gradient durant les deux acquisitions (figure 2.4). Ce gradient pourrait s'expliquer par des différences de connectivité entre les casiers et le

chenal. Bien souvent, pour un train de casier, la digue est de plus en plus étroite vers l'aval. Ainsi, la connectivité avec le RCC augmente. Les casiers situés les plus en amont seraient déconnectés du RCC, ce qui expliquerait leurs températures particulièrement élevées. En aval, des échanges avec l'eau plus froide du RCC refroidiraient les casiers. Ces échanges augmenteraient vers l'aval du train. Cette hypothèse reste toutefois à valider.

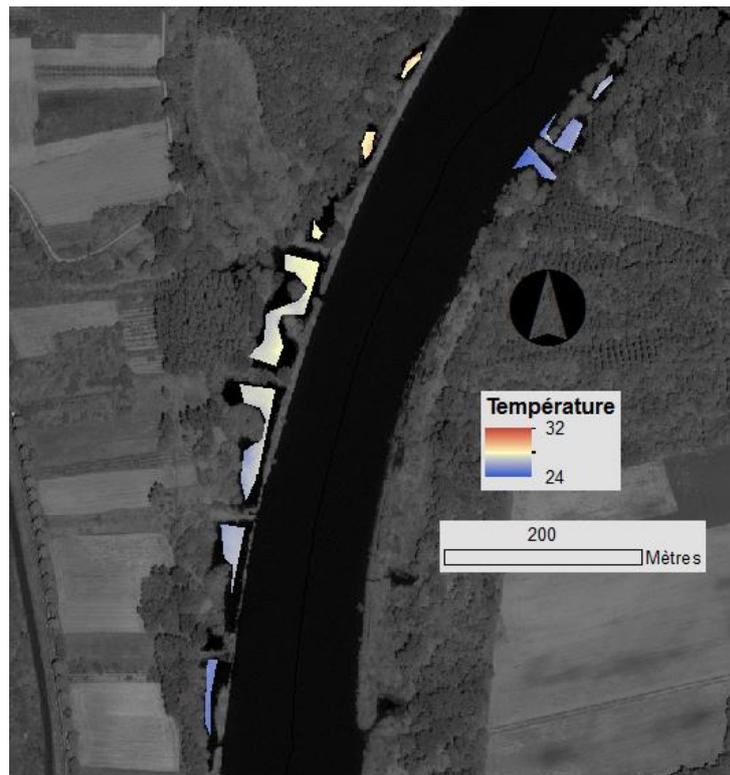


Figure 2.4. Gradient thermique observé pour certains trains de casiers. Ce train est situé en rive droite vers les km 4-5 de Péage-de-Roussillon (voir figure 2.3 pour localisation).

Pour Donzère-Mondragon, un peu de la même manière que pour les bras, deux types de casiers sont observés (figures 2.5 et 2.6). Le premier type est composé de casiers plus chauds que le RCC. Ce type comprend tous les casiers de rive droite ainsi que les casiers de rive gauche de la moitié aval du RCC. La température de ces casiers est d'environ 27-29°C en 2013 et de 24-27°C en 2014. Une variabilité thermique existe entre ces casiers : ils peuvent être plus ou moins chauds en fonction notamment de la connectivité avec le RCC ou de facteurs locaux (profondeur, ombrage). A noter que les casiers amont du dernier train sont plus froids car ils sont fortement connectés au RCC, la digue étant sous l'eau.

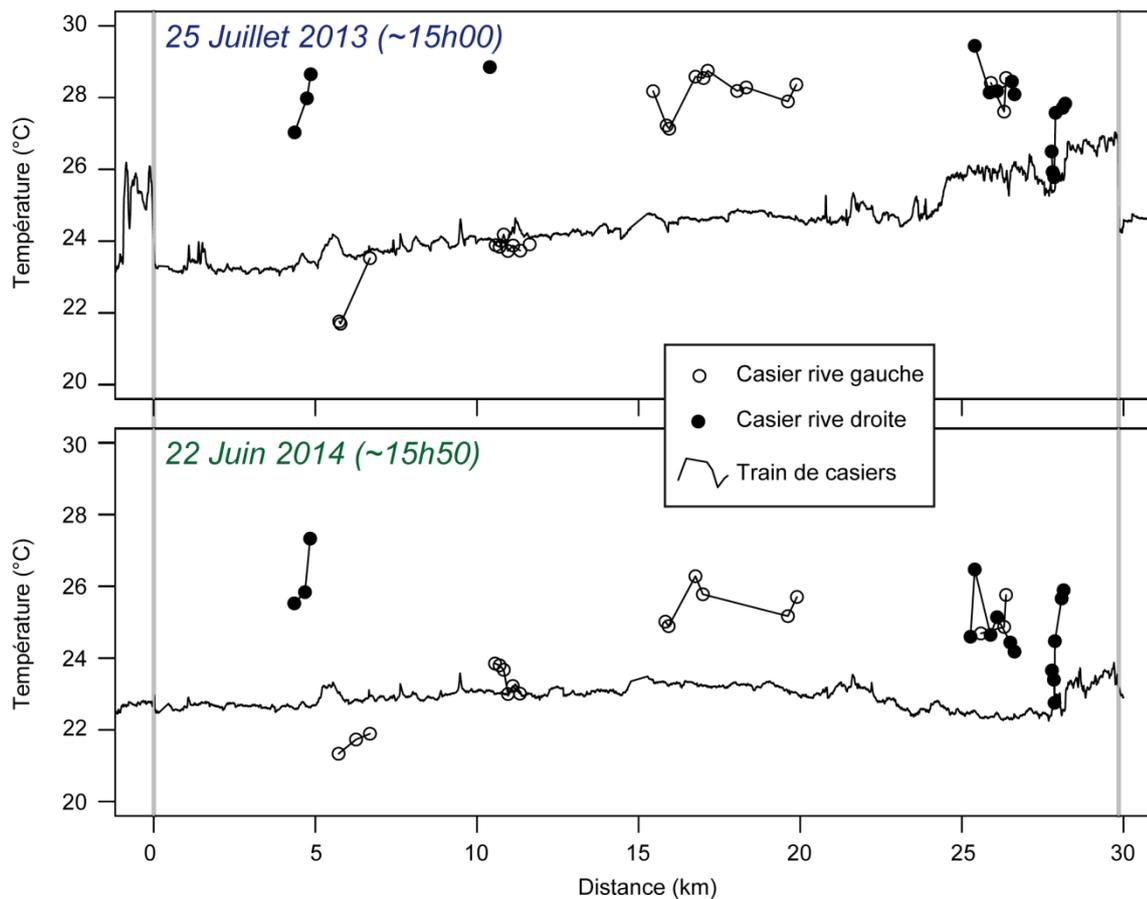


Figure 2.5. Température des casiers Girardon pour l'aménagement de Donzère-Mondragon.

Le second type correspond à des casiers alimentés par la nappe de versant passant sous le canal mais aussi par l'eau du canal (Paran et al., 2012). Ils ont la même alimentation que les bras situés dans cette zone. Dans la partie amont du RCC, en rive gauche, se situent de nombreux casiers et bras. Ces différentes masses d'eau semblent connectées les unes aux autres. L'eau s'écoule ainsi de l'amont vers l'aval à travers les bras et les casiers. Les masses d'eau situées le plus en amont sont les plus froides du fait de l'alimentation phréatique. Elles se réchauffent progressivement vers l'aval pour atteindre la même température que le RCC, puis une température similaire à celle du premier type de casiers. Ces casiers froids sont localisés sur la figure 2.6. Ces milieux plutôt rares pourraient être potentiellement intéressants pour certaines espèces.

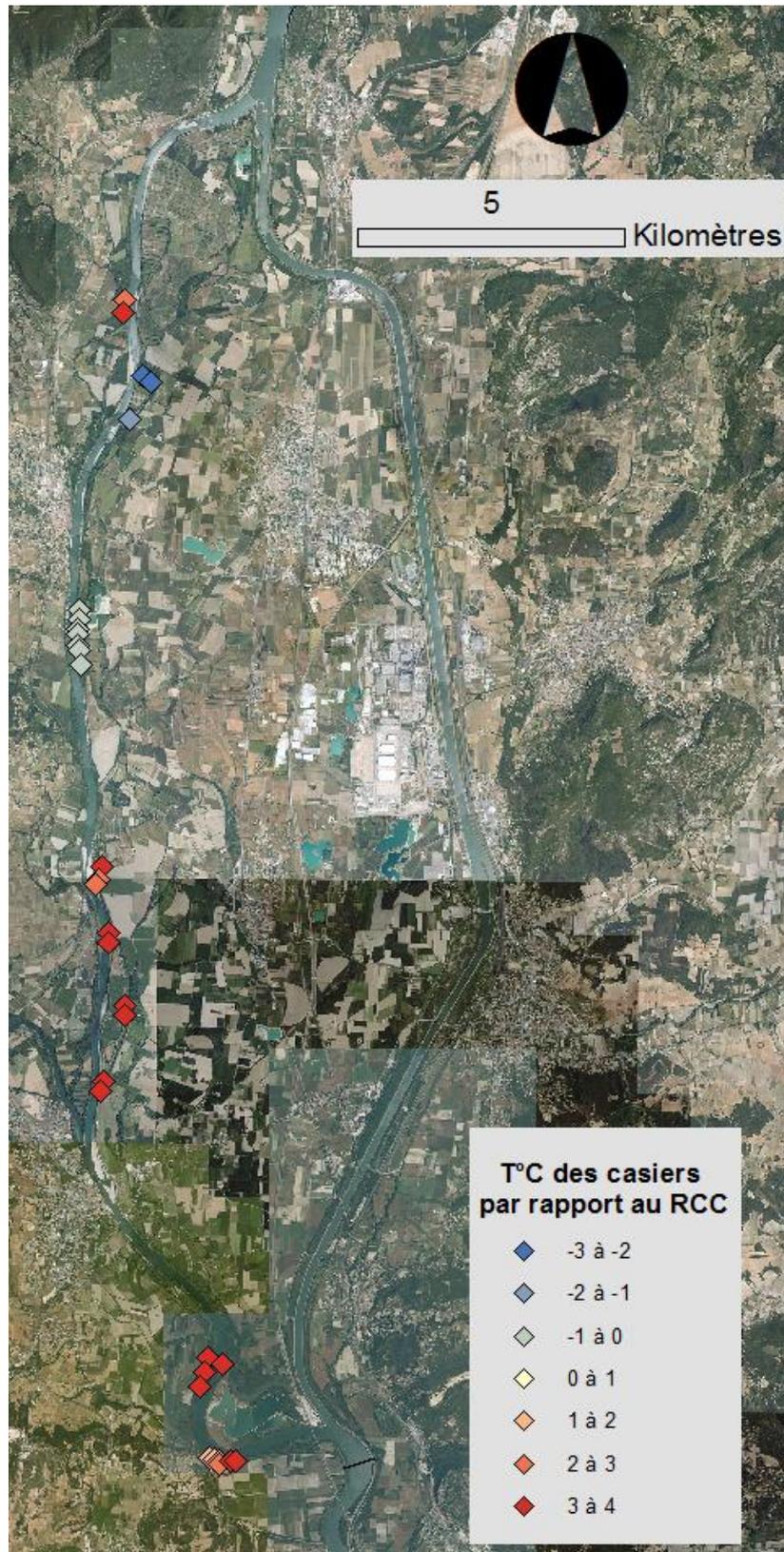


Figure 2.6. Température des casiers Girardon par rapport à la température médiane du RCC de Donzère-Mondragon (25 juillet 2013 vers 15h). Les casiers plus froids que le RCC apparaissent en bleu, ceux plus chauds en rouge.

4.4. Effets de l'ombrage sur la température

Les différentes acquisitions ont été effectuées durant l'après-midi (entre 15h00 et 18h00). A cette période de la journée, la ripisylve ombre une partie du cours d'eau. L'effet de l'ombrage sur la température des rives du fleuve a été testé de façon exploratoire. Ces zones d'ombres ont été identifiées sur les photographies dans le visible. Au vu des images thermiques, ces zones ne présentent pas de températures plus faibles. La figure 2.7 illustre cela : les deux rives ont des températures similaires (21,5-22°C) bien qu'une seule ne soit ombragée. Les parties externes du chenal sont ainsi suffisamment courantes pour que l'effet de la végétation ne se fasse pas sentir. Cependant, il pourrait être intéressant d'étudier l'impact de l'ombrage sur la température des casiers Girardon. En effet, ces derniers sont souvent stagnants et l'effet de l'ombrage devrait y être plus important.

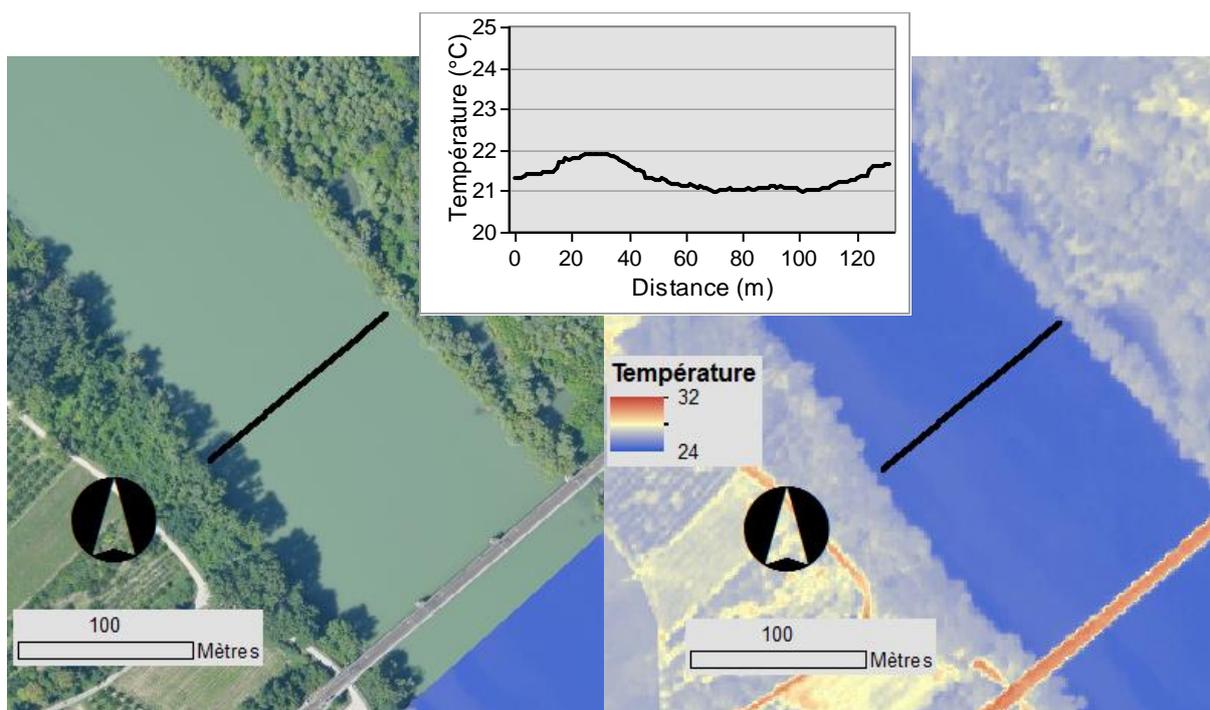


Figure 2.7. Profil transversal de la température du RCC de Péage-de-Roussillon (16 juillet 2014 vers 16h15).

5. Conclusion et recommandations

Les principaux éléments de conclusion ressortant de cette étude sont les suivants :

- Le RCC s'échauffe plus rapidement que le canal. Ainsi, au niveau de leur confluence, une différence de température pouvant atteindre 2°C est observée. L'échauffement du RCC est plus important lorsque le débit est faible. L'échauffement le plus marqué a été observé pour le RCC de Donzère-Mondragon. Un relèvement du débit réservé entraînerait probablement une augmentation de température moins forte. Cette dernière pourrait être quantifiée par modélisation hydro-thermique.
- Les RCC montrent une variabilité thermique faible. Cependant, localement des températures élevées peuvent être observées dans des zones peu profondes et/ou stagnantes (rives, zones entre épis, bras peu courants, casiers Girardon). Aucune tache d'eau froide n'a été identifiée dans les RCC. Toutefois, certains contre-canaux, bras ou casiers peuvent être froids lorsqu'ils sont alimentés par des eaux souterraines.
- Les casiers Girardon sont très majoritairement plus chauds que le RCC probablement du fait de leur déconnexion avec les eaux courantes. C'est dans ces marges construites que les températures les plus élevées ont été observées. Seulement très peu de casiers sont froids (ils sont situés en rive gauche dans la partie amont du RCC de Donzère-Mondragon). Ces milieux plutôt rares pourraient être potentiellement intéressants pour certaines espèces pour lesquelles ils pourraient servir de refuges thermiques.
- Une réflexion pourrait être envisagée par rapport à la connexion entre les zones froides (certains contre-canaux, bras ou casiers) et le reste de la masse d'eau. Par exemple, des casiers chauds et stagnants pourraient être connectés au contre canal pour devenir de potentiels refuges thermiques. La question de l'accès aux zones froides pour la faune se pose également. En effet, les

contre-canaux, qui représentent la majorité des zones froides, sont-ils accessibles ? Enfin, il faut cependant garder à l'esprit que les zones froides ne représentent qu'une faible proportion de la masse d'eau totale. Des connexions trop importantes pourraient entraîner la disparition par dilution de certaines zones froides.

6. Références bibliographiques

- Acuña V, Tockner K. (2009). Surface-subsurface water exchange rates along alluvial river reaches control the thermal patterns in an Alpine river network. *Freshwater Biology*, 54, 306-320.
- 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.
- Anding D, Kauth R. (1970). Estimation of sea surface temperature from space. *Remote Sensing of Environment*, 1, 217-220.
- Atwell BH, MacDonald RB, Bartolucci LA. (1971). Thermal mapping of streams from airborne radiometric scanning. *Water Resources Bulletin*, 7(2), 228-243.
- Baban SMJ. (1993). Detecting water quality parameters in the Norfolk Broads, U.K., using Landsat imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 14, 1247-1267.
- Banks WSL, Paylor RL, Hughes WB. (1996). Using Thermal-Infrared Imagery to Delineate Ground-Water Discharge. *Ground Water*, 34, 434-443.
- Barko JW, Smart RM. (1986). Sediment-related mechanisms of growth limitation in submersed macrophytes. *Ecology*, 67, 1328-1340.
- Berk A, Anderson GP, Acharya PK, Chetwynd JH, Bernstein LS, Shettle EP, Matthew MW, Adler-Golden SM. (1999). *MODTRAN4 User's Manual*. Air Force Research Laboratory, Hanscom Air Force Base, 94p.
- Bornette G, Puijalon S. (2011). Response of aquatic plants to abiotic factors: a review. *Aquatic sciences*, 73: 1-14.
- Caissie D. (2006). The thermal regime of rivers: a review. *Freshwater Biology*, 51, 1389-1406.
- Cardenas MB, Harvey JW, Packman AI, Scott DT. (2008). Ground-based thermography of fluvial systems at low and high discharge reveals potential complex thermal heterogeneity driven by flow variation and bioroughness. *Hydrological Processes*, 22, 980-986.
- Carr GM, Duthie HC, Taylor WD. (1997). Models of aquatic plant productivity: a review of the factors that influence growth. *Aquatic Botany*, 59(3-4), 195-215.
- Chander, G., Markham, B. L., Helder, D. L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote sensing of environment*, 113(5), 893-903.
- 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 rivers. *Journal of the American Water Resources Association*, 41, 1149-1159.
- Coutant CC. (1977). Compilation of temperature preference data. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 34, 739-745.
- Coutant CC. (1999). *Perspective on Temperature in the Pacific Northwest's Fresh Water*. Environmental Sciences Division, Publication No. 4849, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, 108p.
- Cristea NC, Burges SJ. (2009). Use of Thermal Infrared Imagery to Complement Monitoring and Modeling of Spatial Stream Temperature. *Journal of Hydrologic Engineering*, 14(10), 1080-1090.
- Dale HM, Gillespie TJ. (1977). The influence of submersed aquatic plants on temperature gradients in shallow water bodies. *Canadian Journal of Botany*, 55(16), 2216-2225.
- Daufresne M, Boët P. (2007). Climate change impacts on structure and diversity of fish communities in rivers. *Global Change Biology*, 13, 2467-2478.
- Daufresne M, Roger MC, Capra H, Lamouroux N. (2003). Long-term changes within the invertebrate and fish communities of the Upper Rhône River: effects of climatic factors. *Global Change Biology*, 10, 124-140.
- Dugdale, S. J., Bergeron, N. E., St-Hilaire, A. (2013). Temporal variability of thermal refuges and water temperature patterns in an Atlantic salmon river. *Remote Sensing of Environment*, 136, 358-373.
- Ebersole, J. L., Liss, W. J., Frissell, C. A. (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), 1-10.
- Ebersole JL, Liss WJ, Frissell CA. (2003a). Cold water patches in warm streams: physicochemical characteristics and the influence of shading. *Journal of the American Water Resources Association*, 39, 355-368.
- Ebersole JL, Liss WJ, Frissell CA. (2003b). Thermal heterogeneity, stream channel morphology, and salmonid abundance in northeastern Oregon streams. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 60, 1266-1280.
- Faux RN, Maus P, Lachowski H, Torgersen CE, Boyd MS. (2001). *New approaches for monitoring stream temperature: Airborne thermal infrared remote sensing*. Project Report Integration of Remote Sensing, 28p.
- Frazier PS, Page KJ. (2000). Water body detection and delineation with Landsat TM Data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66, 1461-1467.
- Goudie AS. (2006). Global warming and fluvial geomorphology. *Geomorphology*, 79, 384-394.

- 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.
- 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 : Carbonneau PE, Piégay H (Eds), *Fluvial Remote Sensing for Science and Management*, Wiley-Blackwell, 163-192.
- Hari RE, Livingstone DM, Siber R, Burckhard-Holm P, Güttinger H. (2006). Consequences of climatic change for water temperature and brown trout populations in Alpine rivers and streams. *Global Change Biology*, 12, 10-26.
- Ishiyama T, Tsuchiya K, Sugihara S. (1995). Influence of look-angle on the water-surface temperature observed with an IR radiometer. *Advances in Space Research*, 17(1), 43-46.
- Jacobsen D, Schultz R, Encalada A. (1997). Structure and diversity of stream invertebrate assemblages: the influence of temperature with altitude and latitude. *Freshwater Biology*, 38, 247-261.
- Jessup AT, Zappa CJ, Loewen MR, Hesany V. (1997). Infrared remote sensing of breaking waves. *Nature*, 385(6611), 52-55.
- Junk WJ, Bayley PB, Sparks RE. (1989). The flood pulse concept in river–floodplain systems. *Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences*, 106, 110-127.
- Junk WJ, Wantzen KM. (2004). The Flood Pulse Concept: New Aspects, Approaches, and Applications – an Update. In : Welcomme RL, Petr T (Eds), *Proceedings of the Second International Symposium on the Management of Large Rivers for Fisheries*, FAO, Bangkok, 2, 117–149.
- Karaus U, Alder L, Tockner K. (2005). "Concave Islands": Habitat Heterogeneity of Parafluvial Ponds in a Gravel-bed River. *Wetlands*, 25, 26-37.
- 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.
- Kaya CM, Kaeding LR, Burkhalter DE. (1977). Use of a cold-water refuge by rainbow and brown trout in a geothermally heated stream. *Progressive Fish-Culturist*, 39, 37-38.
- Khalanski M, Carrel G, Desaint B, Fruget J-F, Olivier J-M, Poirel A, Souchon Y. (2008). Étude thermique globale du Rhône – Impacts hydrobiologiques des échauffements cumulés. *Hydroécologie Appliquée*, 16, 53-108.

- Kneizys FX, Shettle EP, Abreu LW, Chetwynd JH, Anderson GP. (1988). User Guide to LOWTRAN 7. Air Force Geophysics Lab Hanscomb AFB MA, 146p.
- LeDrew EF, Franklin SE. (1985). The use of thermal infrared imagery in surface current analysis of a small lake. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 51, 565-573.
- Liu W-Y, Gantt RT, Klemas A. (1987). Measurement of the surface emissivity of turbid waters. *Remote Sensing of Environment*, 21, 97-109.
- Loheide SP, Gorelick SM. (2006). Quantifying stream – Aquifer Interactions through the Analysis of Remotely Sensed Thermographic Profiles and In Situ Temperature Histories. *Environmental Science and Technology*, 40(10), 3336-3341.
- Madej MA, Currens C, Ozaki V, Yee J, Anderson DG. (2006). Assessing possible thermal rearing restrictions for juvenile coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*) through thermal infrared imaging and in-stream monitoring, Redwood Creek, California. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 63, 1384-1396.
- Malard F, Mangin A, Uehlinger U, Ward JV. (2001). Thermal heterogeneity in the hyporheic zone of a glacial floodplain. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 58, 1319-1335.
- Masuda K, Takashima T, Takayama Y. (1988). Emissivity of pure and sea waters for the model sea surface in the infrared window regions. *Remote Sensing of Environment*, 24, 313-329.
- Mertes LAK, Smith MO, Adams J.B. (1993). Estimating suspended sediment concentrations in surface waters of the Amazon River wetlands from Landsat images. *Remote Sensing of Environment*, 43, 281-301.
- Milner AM, Brittain JE, Castella E, Petts GE. (2001). Trends of macroinvertebrate community structure in glacier-fed rivers in relation to environmental conditions: a synthesis. *Freshwater Biology*, 46, 1833-1847.
- Mohseni O, Stefan HG, Eaton JG. (2003). Global warming and potential changes in fish habitat in U.S. streams. *Climate Change*, 59, 389-409.
- Olivier J-M, Carrel G, Lamouroux N, Malard F, Bravard J-P, Amoros C. (2009). The Rhône River. In : Robinson C, Uehlinger U, Tockner K (Eds.), *Rivers of Europe*, Elsevier, San Diego, 247–295.
- Paran F, Graillot D, Arthaud F, Baillet H, Bornette G, Déchomets R, Ferreira D, Germain A, Gibert J, Jezequel C, Lafont M, Lalot E, Marmonier P, Novel M, Piscart C, Puijalon S, Rodriguez C, Simon L, Travi Y. (2012). *Evaluation des échanges nappes/rivière et de la part des apports souterrains dans l'alimentation des eaux de surface. Application au fleuve Rhône et à ses aquifères superficiels*. ZABR-AERMC, Rapport final phase 4.

- Poirel A. (2004). *Étude thermique du Rhône - Phase 1. Complément d'étude. Extension des résultats à la période 2000–2003*. Rapport EDF DTG, 60p.
- Poirel A, Gailhard J, Capra H. (2010). Influence des barrages-réservoirs sur la température de l'eau : exemple d'application au bassin versant de l'Ain. *La Houille Blanche*, 4, 72-79.
- Poirel A, Lauters F, Desaint B. (2008). 1977-2006 : Trente années de mesures des températures de l'eau dans le Bassin du Rhône. *Hydroécologie Appliquée*, 16, 191-213.
- Pont D et al. (2003). *Programme GICC – AQUABIO. Conséquences potentielles du changement climatique sur les biocénoses aquatiques et riveraines françaises. Rapport final*.
- Poole GC, Berman CH. (2001). An Ecological Perspective on In-Stream Temperature: Natural Heat Dynamics and Mechanisms of Human-caused Thermal Degradation. *Environmental Management*, 24(6), 787-802.
- Rahel FJ, Keleher CJ, Anderson JL. (1996). Potential habitat loss and population fragmentation for cold water fish in the North Platte River drainage of the Rocky Mountains: response to climate warming. *Limnology and Oceanography*, 41, 1116-1123.
- Rayne, S., Henderson, G. S. (2004). Airborne thermal infrared remote sensing of stream and riparian temperatures in the Nicola River watershed, British Columbia, Canada. *Journal of Environmental Hydrology*, 12, 14-1.
- 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(C8), 13,341-13,356, doi:10.1029/JC095iC08p13341.
- Schott JR. (1994). Thermal infrared calibration of aerial and satellite images over land. In : *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Pasadena, CA, USA: IEEE's Geoscience and Remote Sensing Society, 211-214.
- Schott JR, Barsi JA, Raqueno NG, Alwis DD. (2001). Calibration of Landsat Thermal Data and Application to Water Resource Studies. *Remote Sensing of Environment*, 78, 108-117.
- Teggi S. (2011). A technique for spatial sharpening of thermal imagery of coastal waters and of watercourses. *International Journal of Remote Sensing*, 33(10), 3063-3089.
- Tissot L, Souchon Y. (2010). Synthèse des tolérances thermiques des principales espèces de poissons des rivières et fleuves de plaine de l'ouest européen. *Hydroécologie Appliquée*, 17, 17-76.

- Tockner K, Malard F, Ward JV. (2000). An extension of the Flood Pulse Concept. *Hydrological Processes*, 14, 2861-2883.
- Tockner K, Paetzold A, Karaus U, Claret C, Zettel J. (2006). Ecology of braided rivers. In : Best JL, Bristow CS (Eds.), *Braided Rivers*, The Geological Society, London, 339-359.
- Tonolla D, Acuña V, Uehlinger U, Frank T, Tockner K. (2010). Thermal Heterogeneity in River Floodplains. *Ecosystems*, 13, 727-740.
- Torgersen CE, Faux RN, McIntosh BA, Poage NJ, Norton DJ. (2001). Airborne thermal remote sensing for water temperature assessment in rivers and streams. *Remote Sensing of Environment*, 76(3), 386-398.
- Torgersen CE, Price DM, Li HW, McIntosh BA. (1999). Multiscale thermal refugia and stream habitat associations of Chinook salmon in northeastern Oregon. *Ecological Applications*, 9(1), 301-319.
- Uehlinger U, Malard F, Ward JV. (2003). Thermal patterns in the surface waters of a glacial river corridor (Val Roseg, Switzerland). *Freshwater Biology*, 48, 284-300.
- Vannote RL, Minshall GW, Cummins KW, Sedell JR, Cushing CE. (1980). The river continuum concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 37, 130-137.
- Vollmer M, Möllmann K-P. (2010). *Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications*. Wiley-VCH, Weinheim, 593p.
- Ward JV, Stanford JA. (1983). The serial discontinuity concept of lotic ecosystems. In : Fontaine TD, Bartell SM (Eds), *Dynamics of Lotic Ecosystems*, Ann Arbor Scientific Publishers, Ann Arbor, MI, 29-42.
- Ward JV, Stanford JA. (1995). The serial discontinuity concept: extending the model to floodplain rivers. *Regulated Rivers: Research and Management*, 10, 159-168.
- Ward JV, Stanford JA. (2001). Revisiting the serial discontinuity concept. *Regulated Rivers: Research and Management*, 17, 303-310.
- Wawrzyniak, V. (2012). Etude multi-échelle de la température de surface des cours d'eau par imagerie infrarouge thermique: exemples dans le bassin du Rhône (Thèse de Doctorat, Université Lyon 3).
- 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(3), 405-414.