



## *Diagnostic et fonctionnalités des apports karstiques des gorges de l'Ardèche*

*(Etudier, suivre et préserver une population en danger d'extinction)*



N° dossier : 17 011486 01-3236

Imputation : 937 76 6574

Fédération de Pêche et de protection du milieu aquatique de l'Ardèche

Villa « La Favorite », 16 avenue Paul Ribeyre 07600 Vals les Bains – 04.75.37.09.68

[accueil.federation@peche-ardeche.com](mailto:accueil.federation@peche-ardeche.com)

## TABLE DES MATIERES

LISTE DES ABREVIATIONS :	3
INTRODUCTION	4
I. CONTEXTE	5
1) Situation géographique	5
2) Climatologie	6
3) Géologie et formation des gorges de l'Ardèche	6
4) Hydrologie	7
5) Hydrogéologie	8
II. PARTENAIRES DE L'ETUDE	10
1) Le Syndicat de Gestion des Gorges de l'Ardèche (SGGA) – Figure 6	10
2) Le Syndicat Mixte Ardèche Claire (SMAC) – Figure 7	10
3) Le Comité Départemental de Spéléologie de l'Ardèche (CDSA)	10
4) L'AAPPMA « la Gaule Vallonnaise »	10
III. MATERIELS ET METHODES	11
1) Suivi thermique des gorges de l'Ardèche	11
1.1 Méthode de mise en place des sondes thermiques	11
1.2 Traitement des données issues des sondes thermiques	12
1.3 Méthode pour réaliser le survol aérien	12
1.4 Traitement des données du survol aérien	15
2) Prospections subaquatiques des sources	17
2.1 Méthode	17
2.2 Traitement des données	20
IV. RESULTATS ET DISCUSSION	21
1) Suivi thermique des gorges de l'Ardèche	21
1.1 Résultat et discussion des 25 sondes thermiques mises en place	21
1.2 Résultat et discussion du survol	21
2) Résultat et discussion de l'inventaire piscicole	23
BIBLIOGRAPHIE	29
LISTE DES FIGURES	30
I- Traitements appliqués aux images thermiques	36
I.1-Géoréférencement des images thermiques et création d'une mosaïque	36
I.1.1- Géoréférencement des images thermiques	36
I.2- Création d'une mosaïque d'images thermiques	37
I.2- Correction des températures	37
I.2.1- Localisation des capteurs de températures in-situ	38
I.2.2- Comparaison des températures mesurées in-situ et estimées par imagerie infra- rouge thermique	39

II- Analyse qualitative des images .....	42
II.1 Profil en long de la température médiane du thalweg .....	42
I.2- Types et localisation des zones froides .....	43

## **LISTE DES ABREVIATIONS :**

**FNPF** : Fédération Nationale de la Pêche en France

**FDPPMA07** : Fédération Départementale de la Pêche et de la Protection des Milieux Aquatiques de l'Ardèche

**AAPPMA** : Associations Agréées pour la Pêche et la Protection des Milieux Aquatiques

**CNRS** : Conseil National de Recherche Scientifique

**RNGA** : Réserve Naturelle des Gorges de l'Ardèche

**SGGA** : Syndicat de Gestion des Gorges de l'Ardèche

**SMAC** : Syndicat Mixte Ardèche Claire

**TRF** : Truite fario

## INTRODUCTION

Les écosystèmes sont des ensembles complexes où les espèces animales et végétales vivent en étroite relation avec leur environnement. Aujourd'hui, le changement climatique est un fait avéré que seuls quelques irréductibles climato-septiques se permettent de nier. Ce réchauffement global du globe terrestre a, et aura de nombreuses incidences sur notre planète et nos cours d'eau. Les caractéristiques thermiques des cours d'eau sont contrôlées par différents facteurs, que sont les flux énergétiques et hydrologiques aux interfaces eau-atmosphère et eau-lit. Les différents impacts anthropiques liés à l'occupation des sols et à l'utilisation de l'eau, les barrages par exemple, modifient également la température des cours d'eau (A. BEAUFORT et al., 2015). Tout au long de son parcours, de sa source à son exutoire, le régime thermique de la rivière a une variabilité temporelle et spatiale. En 2006, CAISSIE et al. répartissent en quatre catégories les facteurs de contrôle de la température : les conditions atmosphériques, l'hydrologie, les échanges à l'interface eau/sédiments et la géomorphologie.

Dans le cadre de cette présente étude, nous nous intéresserons tout particulièrement au régime thermique de la rivière Ardèche, et des différentes sources présentes dans les gorges qui constituent des refuges pour l'ichtyofaune.

Le régime thermique de l'Ardèche connaît de fortes fluctuations entre la période hivernale et estivale ce qui représente une modification physique et biologique du cours d'eau au cours de l'année. De ce fait, le peuplement piscicole relativement varié de l'Ardèche a dû s'adapter à ces modifications thermiques, et tout particulièrement les espèces salmonicoles. En effet, cette rivière abrite des truites fario (*salmo trutta*) menacées par ce réchauffement global des températures puisqu'il s'agit d'une espèce supportant mal les fortes chaleurs. Mais malgré la hausse du régime thermique en été, cette espèce a su subsister dans cet écosystème atypique.

L'objectif de cette étude est d'identifier les différentes sources présentes sur l'Ardèche qui représentent un refuge thermique pour cette espèce piscicole. Pour ce faire, cette expertise sera divisée en deux grandes parties.

La première sera réalisée par le Centre Nationale de la Recherche Scientifique de Lyon et consistera à réaliser un survol aérien de la zone d'étude afin d'établir un profil thermique longitudinal du cours d'eau. Ce survol permettra de déterminer les différentes sources et leur zone d'influence, permettant un apport d'eau fraîche dans l'Ardèche, essentielle à la survie de ces poissons. En parallèle de ce survol, un total de 25 sondes sera disposé sur l'ensemble de la zone d'étude afin de pouvoir calibrer la caméra thermique embarquée sur l'ULM.

La seconde partie de cette étude consistera à réaliser deux semaines de plongées subaquatiques à deux mois d'intervalles dans des sources préalablement identifiées, l'une fin juin et la seconde fin août. Un plongeur professionnel, Mr CARRIERE Philippe prospectera les sources et vérifiera la présence, ou non, des truites fario dans ces refuges thermiques. Les dispositifs vidéo mis en place permettront de réaliser une estimation des effectifs présents.

A la suite de la période la plus critique d'un point de vue thermique, et où la pression touristique est la plus intense, une comparaison de ces effectifs sera réalisée à la suite de la seconde semaine de prospection.

# I. CONTEXTE

## 1) Situation géographique

La zone d'étude porte sur la partie aval du cours d'eau Ardèche de ce même département. La spécificité de ce site repose sur le fait qu'il se situe sur « le site classé du pont d'arc » sur la partie amont et sur « la réserve naturelle des gorges de l'Ardèche », depuis 1980, sur la partie aval comme vous pouvez le voir sur la figure 1 ci-dessous.

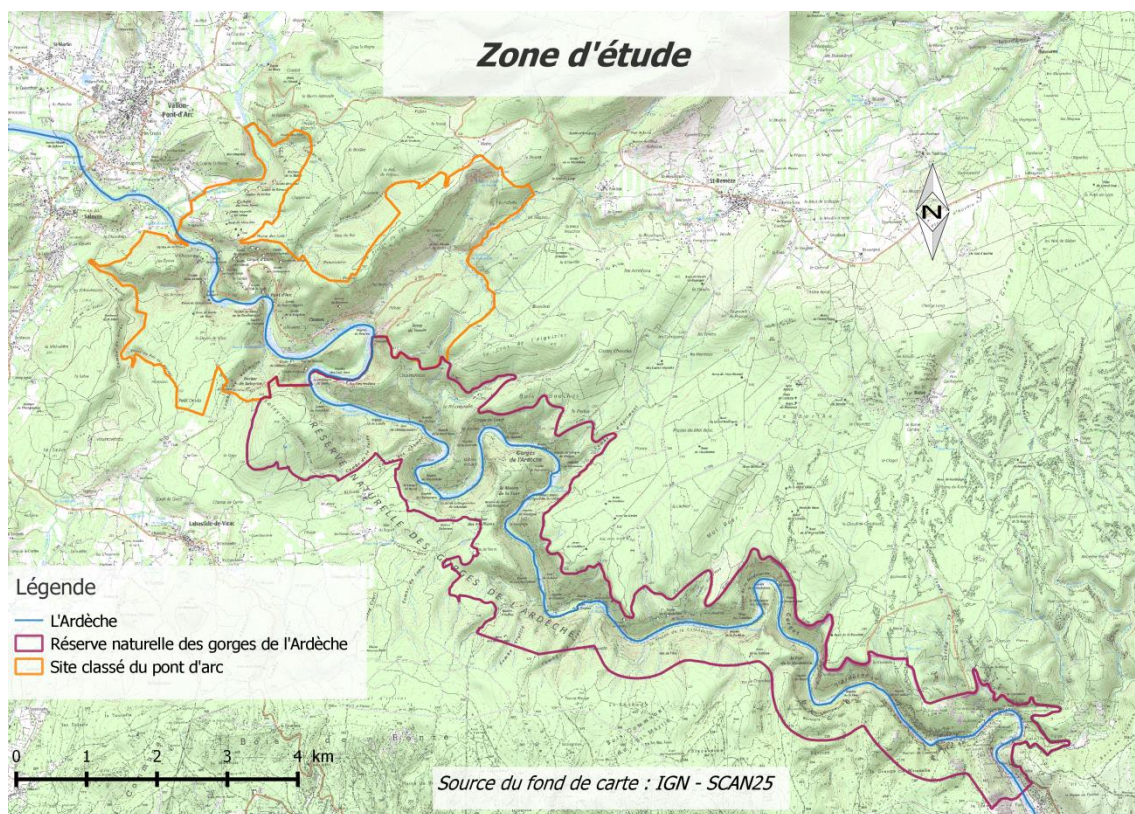


Figure 1 : Zone d'étude

On peut noter la présence d'un méandrage très important de l'Ardèche qui de l'entrée des gorges à leur sortie, parcourt 34 km distantes de seulement 16 km à vol d'oiseau. (GOMBERT, 1982) ce qui lui confère un indice de sinuosité de 2.125 selon la formule :

$$SI = \frac{\text{Longueur curviligne}}{\text{Distance entre extrémités}}$$

Cette zone d'étude subit une forte pression touristique, en particulier l'été, où près de 2 000 canoës descendent les gorges de l'Ardèche chaque jour. Ces deux outils réglementaires, que sont le site classé et la réserve naturelle, permettent la mise en place d'une réglementation importante visant à limiter l'impact anthropique sur les gorges et ainsi les préserver.

Sur ce secteur, l'Ibie et le Rieussec sont les deux principaux affluents de l'Ardèche, mais ils ne seront pas pris en compte dans le cadre de cette étude puisqu'il s'agit de deux cours d'eau temporaires qui tarissent l'été. En effet, la nature de la roche a favorisé l'infiltration au détriment des écoulements aériens lors de l'incision de la rivière. (BELLEVILLE, 1985)

## 2) Climatologie

Le climat ardéchois est de type méditerranéen et se caractérise par de fortes précipitations lors du printemps et de l'automne, relativement faible en hiver et quasiment inexistante en période estivale. La particularité de ces pluies est qu'elles sont souvent violentes, c'est-à-dire qu'un grand volume d'eau tombe en très peu de temps. Des orages provenant de l'Ouest, du Sud et Sud-ouest peuvent également éclater en fin d'été et à l'automne et sont appelés : « orages cévenoles ».

Les températures restent relativement douces tout au long de l'année même si quelques gelées sont observées chaque année. En revanche, la période estivale se caractérise par une forte sécheresse et de très fortes températures pouvant atteindre 35-37°C en fonction des saisons. Ces fortes températures entraînent inévitablement un réchauffement de l'eau, dont l'Ardèche, et il s'agit du principal facteur qui permet à cette rivière d'atteindre un régime thermique de plus de 25°C lors de la période la plus critique au regard des espèces salmonicoles.

La zone d'étude est comprise entre les formes sub-humides et humides du faciès moyen du climat méditerranéen.

## 3) Géologie et formation des gorges de l'Ardèche

Les gorges de l'Ardèche sont principalement constituées de dépôts sédimentaires mis en place il y a environ 110 millions d'années lors de l'ère secondaire. La présence de fossiles et de sédiments datés de cette époque, le crétacé inférieur, permettent d'affirmer qu'il existait une mer chaude et peu profonde propice aux dépôts marins, sous un climat tropical.

Le département de l'Ardèche est à l'intersection de deux grands ensembles géologiques : le massif hercynien et le massif alpin. De ce fait, on peut observer une grande hétérogénéité des roches. En revanche, cette zone d'étude se caractérise par l'unique présence de calcaire massif pur à faciès Urgonien du Barrémien-Bédoulien, représenté sur la figure 2 ci-contre, d'une superficie d'environ 400 km<sup>2</sup>.

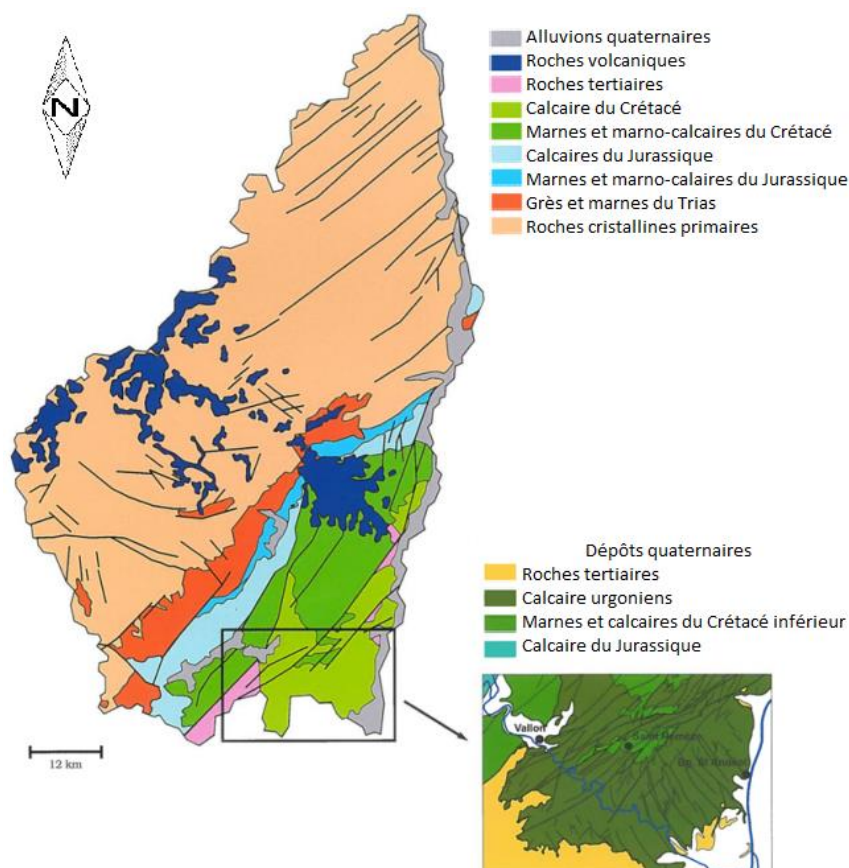


Figure 2 : Carte géologique de l'Ardèche - Sources : RNGA

Carte géologique simplifiée du secteur des gorges de l'Ardèche d'après la carte géologique au 1/50000 Bourg-Saint-Andréol, éditions BRGM

Il s'agit de calcarénites à rudistes, massives et parfois de rudites. Elles sont présentes de la surface du plateau jusque sous le lit actuel de l'Ardèche sans la moindre interruption (GUERIN, 1973).

L'épaisseur des formations Urgoniennes ardéchoises est mal connue mais est certainement, selon R. MAZELLIER (1971), de plus de 300m au niveau des gorges de l'Ardèche. En effet, malgré que l'Ardèche est creusée un canyon de plus de 300m de profondeur, ce creusement n'a pas pu permettre de mettre à nu son substratum (GOMBERT, 1988).

Cette unité géologique est limitée à l'Ouest et au Nord par des séries marno-calcaires du crétacé inférieur, à l'Est par la vallée du Rhône et au Sud par les formations oligocènes du synclinal de Barjac-Issirac (DEBARD, 1997)

Les fluctuations marines affectant la vallée du Rhône causées lors de la crise méssinienne (6 à 5 Millions d'années) dues aux mouvements tectoniques sont principalement responsables de l'encaissement de l'Ardèche. En effet, à cette époque la Méditerranée s'est quasiment asséchée et la rivière a creusé son propre substratum afin de rejoindre son niveau de base (GOMBERT, 1988). Cela se traduit par un phénomène qui a débuté au tertiaire avec une incision de la rivière Ardèche sur près de 300 m dans son substratum. Par un phénomène de surimposition avec certains réajustements locaux du cours initial ; soit par recoupement de méandres (Exemple : le site classé du Pont d'Arc représente sur la figure 3 ci-contre), soit sous l'influence des grandes failles du substratum calcaire. On peut également remarquer la présence de certains vestiges d'ancien méandre de l'Ardèche, aujourd'hui perché à près de 200 m au-dessus de son cours actuel.



#### 4) Hydrologie

##### Représentation du bassin versant de l'Ardèche

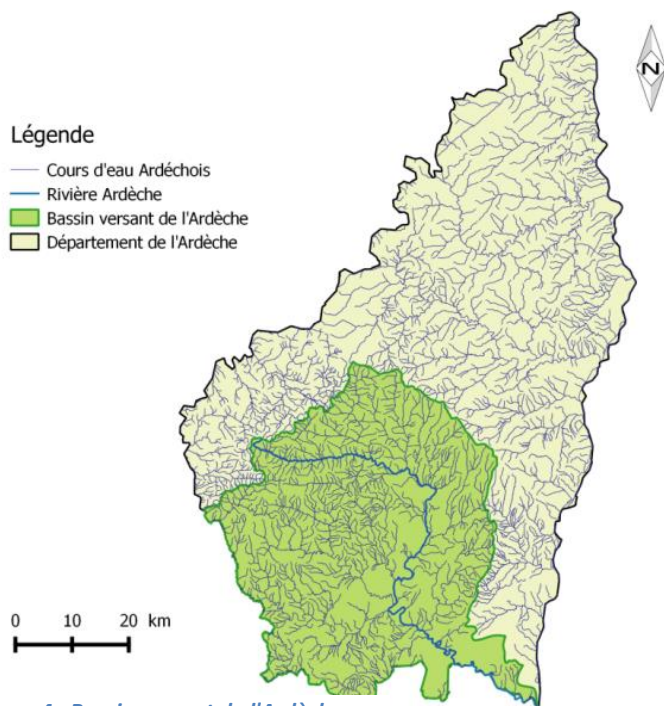


Figure 4 : Bassin versant de l'Ardèche

L'Ardèche est un cours d'eau qui a donné son nom au département qu'elle traverse. Le bassin versant de cette rivière concerne également les départements du Gard et de la Lozère. Elle prend sa source à 1467m d'altitude dans le Vivarais, à proximité du col de Chavade sur la commune d'Astet.

L'Ardèche s'écoule ensuite sur près de 125 km avant de rejoindre le Rhône en rive droite à une cote de 45m, ce qui constitue son niveau de base. La superficie de son bassin versant est d'environ 2370 km<sup>2</sup>. Selon l'indice de forme de Gravelius dont la formule est :  $0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$  où P est égal au périmètre du bassin versant et A son aire, le coefficient de compacité du bassin versant de l'Ardèche est de 1.79 ce qui lui confère la forme représentée sur la figure 4 ci-contre.

Lors de son parcours dans les gorges de l'Ardèche, soit 34 km, la cote de la rivière s'abaisse de 80 à 45 m, ce qui lui confère une pente moyenne de 0.10%. Les parois de ce canyon peuvent atteindre plus de 300m de hauteur totale au niveau du cirque de Gaud par exemple.

Le régime hydrologique de l'Ardèche est de type pluvial cévenol, elle peut subir de fort étiages en été et des crues extrêmement violentes lors « d'orages cévenols ». A titre d'exemple, le 6 octobre 1970, le débit d'étiage à la sortie des gorges à Sauze était de 2.25m<sup>3</sup>/sec. Après 48h de

précipitations torrentielles, un débit instantané de 3260m<sup>3</sup>/sec est mesuré sur cette même station le 8 octobre 1970. Cette variation correspond de 1 à 1400 (MAZELLIER, 1971). Les débits maximums observés sur l'Ardèche à Sauze en octobre 1957 et en septembre 1900 étaient respectivement de 7000 m<sup>3</sup>/sec et de 5700 m<sup>3</sup>/sec.

Lors de ses crues, l'Ardèche remet en suspension du sable et des sédiments fins et transporte également des galets. Cette charge solide, nettement plus importante lors de forts débits accentue fortement l'érosion mécanique des parois et renforce ainsi les courbes des méandres. Le lit de la rivière n'est pas épargné par cette érosion sur les zones les plus meubles. En revanche la présence de points durs dans la rivière va entraîner le dépôt de galets sur le fond du lit.

## 5) Hydrogéologie

Comme dit précédemment dans cette présente étude, le substrat de cette zone d'étude est essentiellement composé de formations carbonatées, fracturées lors des déplacements tectoniques. De ce fait, les processus d'altération chimique et d'érosion mécanique dissolvent ces formations créant ainsi des zones dites : « karstifiées ». La roche originelle est directement dissoute par les précipitations et est altérée par l'eau infiltrée au sein du sol. En effet, l'activité biologique présente au niveau des sols favorise l'augmentation de la pression partielle de CO<sub>2</sub>, l'eau va donc s'équilibrer avec ce milieu et ainsi s'enrichir en CO<sub>2</sub>. Cet accroissement de l'acidité de l'eau va permettre à cette dernière de favoriser son pouvoir de dissolution de la roche et ainsi favoriser son infiltration. Le modelé karstique, omniprésent, est représenté par de nombreux lapiés, par une centaine d'avens, par des grottes et par des champs de dolines comme l'illustre la figure 5 ci-dessous.

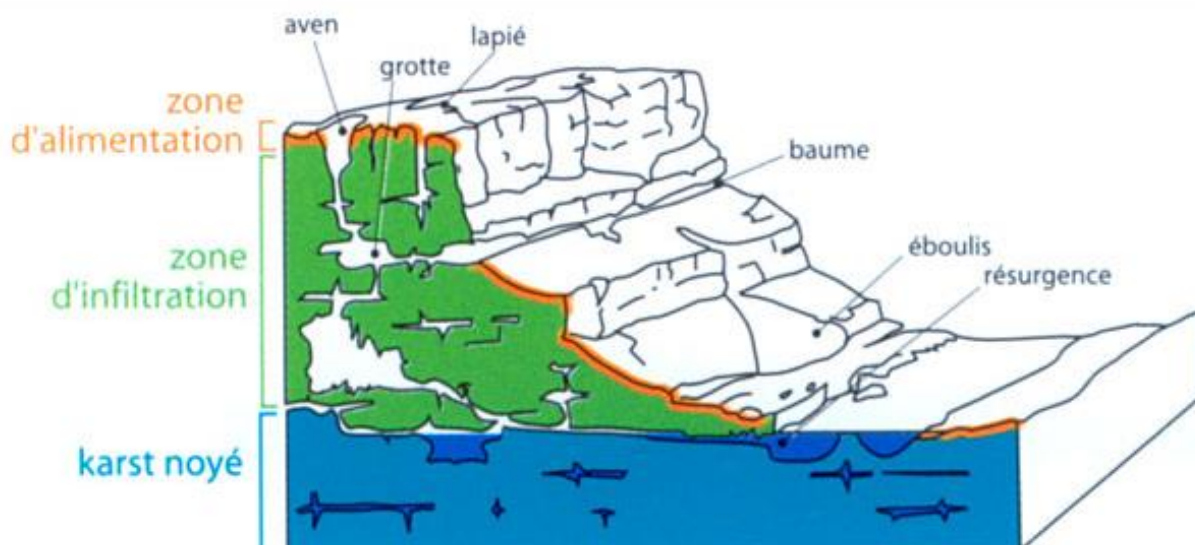


Figure 5 : Exemple de zone karstifiée - Source : RNGA

L'étude du réseau karstique et les relations avec les dépôts pliocènes marins indiquent que le début de la karstification a eu lieu sous l'ère du crétacé supérieur (MAZELLIER, 1971). Ce processus de karstification a été ralenti par l'installation du froid lors du Riss et du würm, mais se poursuit encore jusqu'à aujourd'hui, comme en témoignent les différentes pertes et résurgences présentes sur ce site. Les différentes étapes de la karstogénèse connues sont décrites sur le tableau 1 ci-

Source : E. DEBARD, 1997

**Tableau 1 : Synthèse des principales étapes karstogénétiques du Bas-Vivarais (d'après les données de Belleville, 1985 ; Gombert, 1988 ; Blanc, 1995).**

*Table 1: Synthesis of the main karstogenetic stages in Bas-Vivarais (data from Belleville, 1985 ; Gombert, 1988 ; Blanc, 1995).*

Chronologie	Evènements principaux	Etapes de la karstification	Karstogénèse
Crétacé supérieur 80 - 65 Ma	régression érosion intense sous climat tropical humide	1ère phase peu visible	
Paléocène à Eocène supérieur 65- 33 Ma	compression pyrénéo-provençale climat tropical	2e phase peu visible	dépôts sableux et argileux bariolés dans des poches karstiques (Orgnac, le Garn, Lagorce)
Oligocène 33 - 23 Ma	Distension (fossé d'Alès)	ablation karstique forte	Très haute surface d'aplanissement (entre 490 - 510 m) sur le revers W de la Dent du Rez
Aquitaniens 23 - 20 Ma	paroxysme distensif réhaussement des plateaux urgoniens	karstification intense	creusement des drains verticaux et des réseaux horizontaux supérieurs
Burdigalien - Miocène moyen 20- 12 Ma	transgression miocène	karstification ralentie	superficielle dans Urgonien début de la karstification du Jurassique supérieur
Tortonien 12 - 6,5 Ma	climat chaud humide à saisons contrastées	installation d'une paléo-Ardèche démantèlement karstique	surface inférieure (250 - 310 m) colmatage des réseaux
Miocène terminal 6,5 - 5 Ma	compression rhodanienne basculement des plateaux régression messinienne	karstification moyenne creusement majeur du canyon de l'Ardèche	creusement vertical des réseaux-élaboration des réseaux intermédiaires décolmatage des supérieurs
Pliocène 5 - 1,8 Ma	compression rhodanienne transgression	superficielle active	colmatage concrétionnement
Quaternaire 1,8 Ma - Actuel	Rejeux de failles et basculement des plateaux glaciations et interglaciaires	ralentie fin du creusement du canyon	dissolution active creusement des réseaux inférieurs

dessous :

Le fort développement du réseau souterrain est une des principales caractéristiques de ce karst. Pour exemple, un réseau souterrain au niveau du système de Saint- Marcel est de l'ordre de 35 km, et de nombreux réseaux plurikilométriques existent (DEBARD, 1997). Les principaux écoulements latéraux ont un caractère bidirectionnel. En effet en rive droite, du secteur Sud-ouest à Sud-est vers le Nord-ouest alors qu'en rive gauche il y a un écoulement du secteur Nord-ouest à Nord-est vers le Sud-ouest (FABRE, 1984).

Dans son étude de 1971, R. MAZELLIER estime que 10% du débit d'étiage mesuré à Sauze provient du réseau karstique lors de la traversée des gorges correspondant en moyenne à 250 à 500 l/sec. L.BELLEVILLE (1985) quant à lui a estimé les apports du karst à 700 l/sec, plus ou moins 140 l/sec, en aout 1983 lors de forts étiages. En revanche, il remarque également des pertes de l'Ardèche de l'ordre de 400 l/sec associées à des pertes dans l'endokarst au niveau du gué de Guitard par exemple. Il est néanmoins certain qu'en règle générale, le karst évacue une partie de ses eaux vers la rivière, mais le phénomène inverse existe, tout du moins en période de crue.

## II. PARTENAIRES DE L'ETUDE

### 1) Le Syndicat de Gestion des Gorges de l'Ardèche (SGGA) – Figure 6

Le SGGA est le gestionnaire de la réserve naturelle des gorges de l'Ardèche d'une superficie de 1575 ha qui a été instituée le 14 janvier 1980 par le décret ministériel n°80-27. Les missions de la réserve se divisent selon trois grands ensembles : protéger – gérer – sensibiliser. Dans le cadre de cette étude, le syndicat, de par sa réglementation associée à la réserve a eu une des conséquences sur la réalisation du survol aérien puisque dans leur convention, il est obligatoire de voler à plus de 300m de la ligne de crête afin de ne pas perturber les différentes espèces ornithologiques présentes à cette période. Le SGGA a également fourni un soutien logistique de par leur mise à disposition d'un logement lors des prospections subaquatiques.



### 2) Le Syndicat Mixte Ardèche Claire (SMAC) – Figure 7



Le SMAC a vu le jour au début des années 1980 en signant le premier contrat de rivière en France, le contrat de rivière Ardèche Claire. Dans le cadre de leurs missions, le SMAC a réalisé une étude « d'identification et préservation des ressources souterraines stratégiques pour l'alimentation en eau potable du bassin versant de l'Ardèche ». Cette étude répertorie les sources que le syndicat a identifiées ainsi que différentes caractéristiques associées à ces dernières. Les données issues de cette étude préalable auront permis de réaliser une première cartographie des différentes sources connues sur l'Ardèche.

### 3) Le Comité Départemental de Spéléologie de l'Ardèche (CDSA)

Le CDSA fonctionne sous le statut d'association loi 1901 et représente la Fédération Française de Spéléologie. Les principales missions de cet organisme sont : la recherche scientifique et la protection du monde souterrain et de son environnement. Ce comité a réalisé différentes études sur les sources des gorges de l'Ardèche. Ces dernières comprenaient les différentes sources connues à ce jour, des suivis thermiques annuels sur certaines stations comprises dans la zone de cette présente étude et enfin des informations sur certains réseaux karstiques. L'association de la position de leurs sources connus à celles du SMAC a permis d'obtenir la meilleure représentativité possible de la zone, disponible en ANNEXE 1.

### 4) L'AAPPMA « la Gaule Vallonnaise »

Du fait de sa proximité avec la zone d'étude et de la connaissance accrue des pêcheurs du milieu aquatique, cette association de pêche locale est l'initiatrice du projet. Afin de réaliser une hiérarchisation des sources en fonction de leur potentialité d'accueil de la truite fario en période estivale, une pré-descente a été réalisée avec Philippe ZAMMIT, un pêcheur local membre de cette association. Cette première expertise aura permis de définir les zones les plus intéressantes pour réaliser les plongées subaquatiques et de réaliser quelques relevés ponctuels de températures et de conductivité.

### III. MATERIELS ET METHODES

#### 1) Suivi thermique des gorges de l'Ardèche

##### 1.1 Méthode de mise en place des sondes thermiques

Afin de pouvoir calibrer les données récupérées à la suite du survol, l'implantation de sondes sur la zone d'étude était essentielle. Initialement prévu sur la zone d'étude, le survol a également eu lieu en amont, au niveau de la confluence entre la Ligne et l'Ardèche et en aval jusqu'à la confluence avec le Rhône. En effet, la présence de barrages sur ce secteur a accentué le désir de la Fédération d'acquérir des données sur le régime thermique de l'Ardèche en amont de la zone d'étude. C'est pourquoi, cinq sondes ont été disposées en amont de la zone d'étude et 20 sondes sur le site classé du pont d'arc et au sein de la réserve naturelle des gorges de l'Ardèche. Ce sont donc en tout 25 sondes qui ont été mises en place sur l'ensemble du linéaire

Or la forte pression touristique qui s'exerce sur ce site en été représentait une contrainte importante. De ce fait, il a été décidé de laisser les sondes thermiques seulement deux jours dans l'Ardèche. Elles ont donc été posées la veille du survol, et retirées le lendemain de ce dernier. Cinq sondes ont été posées à pied sur la partie amont, et les 20 autres sur la zone d'étude ont été déposées en canoë, représentées sur la figure 8 ci-dessous :

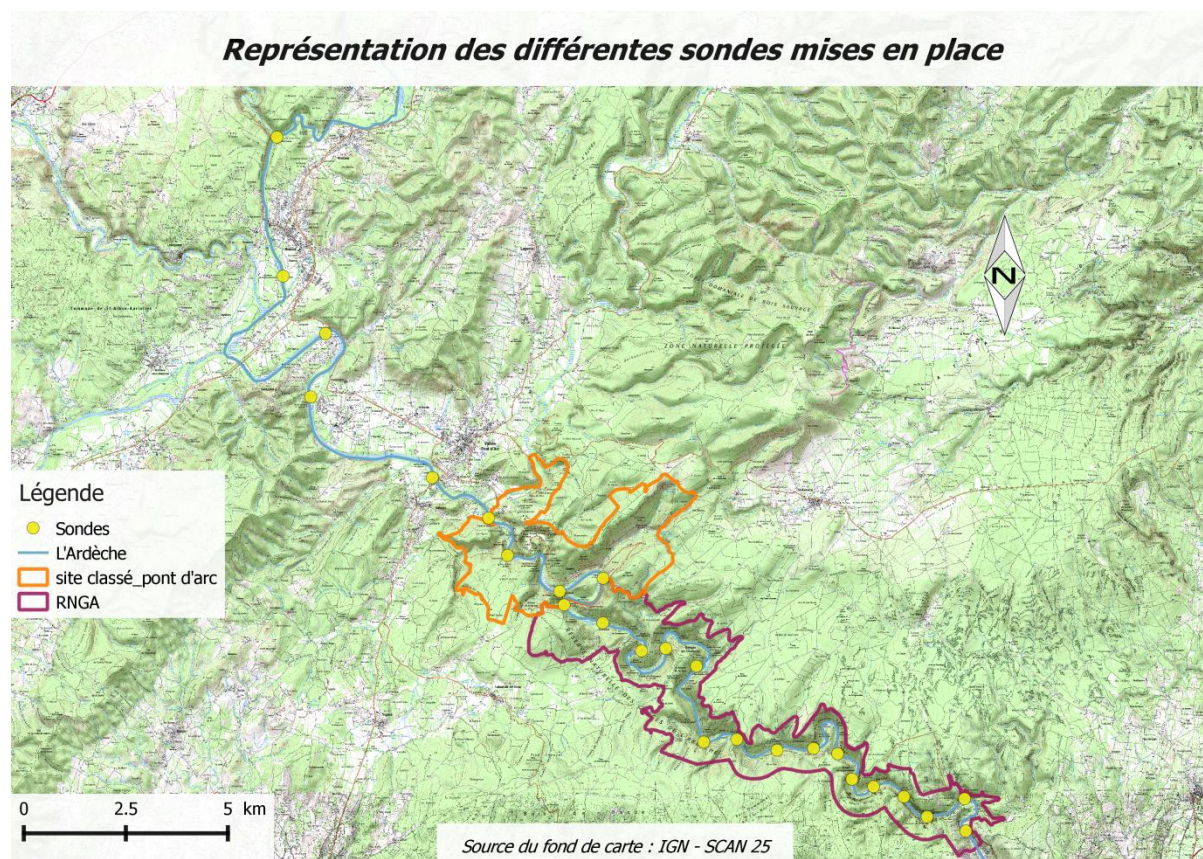


Figure 8 : Représentation des 25 sondes mises en place sur l'ensemble du linéaire

Les coordonnées GPS de chaque point ont été relevées à l'aide d'un GPS Anima TwoNav ce qui a permis de retrouver les sondes sans grandes difficultés, et également de pouvoir réaliser une carte de l'emplacement des différents enregistreurs thermiques représenté sur la figure 8 présentée ci-dessus. Les 20 sondes sont réparties à une distance homogène sur l'ensemble de la zone d'étude. En revanche les cinq sondes mises en place sur la partie amont sont davantage espacées.

Les sondes utilisées étaient des enregistreurs thermiques MiniLog-II-T de Vemco avec comme résolution 0.01°C. La gamme de températures est comprise entre -30°C et +80°C avec une précision de +/- 0.1°C entre -5°C et 35°C. Elles ont été programmées pour réaliser une mesure de températures toutes les minutes à partir du lundi 17 juillet 8h jusqu'au mercredi 19 juillet 16h.

Afin de pouvoir récupérer l'ensemble du matériel et de respecter la réglementation au sein de la réserve, le choix a été fait d'utiliser des sacs à « pommes de terre », lestés une fois sur place à l'aide de galets, avec la sonde à l'intérieur comme représenté sur la figure 9 ci-dessous :

Figure 9 : Méthode de mise en place des sondes



## 1.2 Traitement des données issues des sondes thermiques

Grâce à la méthode mise en place, l'ensemble des sondes positionnées sur l'Ardèche ont pu être récupérées et ce malgré la forte pression touristique qui s'exerce sur ce site l'été.

Pour chaque sonde il a fallu extraire les données à l'aide du logiciel LoggerVue de Vemco, représenté sur la figure 10 ci-contre. Après l'export des données sous un fichier « .csv » il a fallu traiter les données afin de garder exclusivement les données enregistrées une fois que la sonde était dans le lit de l'Ardèche et supprimer les autres valeurs. En effet, les sondes étaient programmées pour débuter les enregistrements à partir du lundi 17 juin 8h, jusqu'au mercredi 19 Juin 16h.

Or toutes les sondes n'étaient pas encore mises en place à cette heure-ci, ou bien elles ont été retirées avant la fin des enregistrements. Afin de comparer l'ensemble de ces valeurs sur une échelle de temps identique, les valeurs conservées débutent au moment où la dernière sonde a été posée, et se terminent lorsque la première sonde a été retirée.

Une fois que seules les températures mesurées dans l'Ardèche ont été sélectionnées, une moyenne de l'ensemble des valeurs a été calculée afin de pouvoir les comparer entre elles. La distance entre chacune des sondes a également été calculée à l'aide du logiciel de cartographie QGIS.

## 1.3 Méthode pour réaliser le survol aérien

Chaque objet dont la température est supérieure au zéro absolu ( $-273.15^{\circ}\text{C}$ ) émet des radiations électromagnétiques. L'émission énergétique totale émise par cet objet exprimé en Watt par mètre carré dépend de la température de l'objet et peut-être exprimé par la loi de Stephan-Boltzman :  $M = \sigma T^4$  où T est la température absolue en Kelvin et  $\sigma$  la constante de Stephan-Boltzman égale à  $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W M}^{-2} \text{ K}^{-4}$  (WAWRZYNIAK, 2012)

La longueur d'onde où l'objet émet le maximum de radiation (en  $\mu\text{m}$ ) est liée à sa température par la loi de déplacement de Wien selon la formule :  $\lambda m = \frac{A}{T}$  où A est la constante du déplacement de

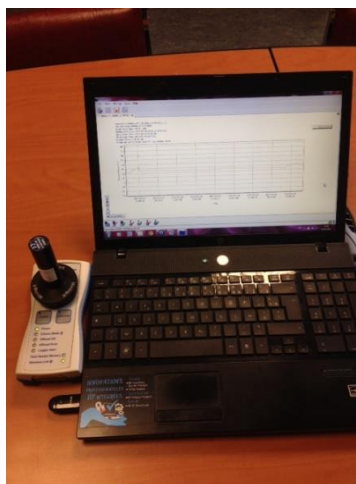


Figure 10 : Logiciel d'extraction des données thermiques

Wien égale à  $2.8977585 \cdot 10^3 \mu\text{m K}$  et T la température absolue en degrés Kelvin. La température du soleil avoisinant les 6000K, le pic d'émission du soleil est situé aux alentours de  $0.5 \mu\text{m}$  dans le spectre du visible. Si on prend l'exemple d'un objet terrestre d'une température de  $27^\circ\text{C}$  (300 k), le pic d'émission se situe environ à  $9.7 \mu\text{m}$ , c'est-à-dire dans l'infrarouge « thermique » (LILLESAND et al., 2008).

Les lois présentées concernent uniquement les corps noirs, c'est-à-dire les objets physiques qui absorbent toutes l'énergie qu'ils reçoivent. Dans la réalité, les matériaux se comportent différemment, ils n'émettent qu'une fraction de l'énergie qu'émettrait un corps noir (LILLESAND et al., 2008 ; VOLLMER et MOLLMANN, 2010). C'est ce que l'on appelle l'émissivité exprimée selon la formule suivante :

$$\varepsilon = \frac{\text{Emittance énergétique d'un objet à une température donnée}}{\text{Emittance énergétique d'un corps noir à cette même température}}$$

Dans de nombreuses applications en thermographie, il est considéré que l'émissivité est indépendante de la longueur d'onde et de la température et que de ce fait, elle est constante. Sur la gamme  $8 - 14 \mu\text{m}$ , l'émissivité de l'eau est de 0.98-0.99 (LILLESAND et al., 2008).

En imagerie infrarouge thermique, l'émittance énergétique notée M est mesurée sur une gamme de longueur d'onde ou l'émissivité est utilisée pour calculer la température de surface de l'objet étudié (LILLESAND et al., 2008). Dans cette étude, l'objet étudié est la rivière Ardèche.

Le principe est de mesurer le rayonnement dans le spectre électromagnétique de l'infrarouge thermique ce qui permet d'obtenir une cartographie de la température de surface des cours d'eau (TORGERSEN et al., 2001), contrairement aux mesures *in situ* ponctuelles. En fonction de l'échelle considérée, il est possible de distinguer les apports des nappes phréatiques associées aux résurgences latérales (DUGDALE et al., 2013) sous condition que le contraste entre les températures soit suffisant (environ  $5^\circ\text{C}$ ).

Afin d'acquérir ces données thermiques, la FDPPMA07 a fait appel au Centre National de Recherche Scientifique (CNRS) de Lyon. L'objectif était d'acquérir des imageries infrarouges thermiques (IRT) à l'aide d'une VarioCam hr Research dotée d'une matrice de  $640 \times 480$  pixels et d'un appareil photo Nikon D7000 avec un focal fixe de 35 mm et programmée d'une sensibilité iso de 400.

Ces deux appareils étaient fixés à un ULM, comme on peut le voir sur la figure 11 ci-contre. Un aller-retour a été réalisé lors du survol afin d'être certain d'avoir toute l'emprise, qui correspond au chenal du cours d'eau. L'intérêt d'utiliser un ULM est qu'il dispose d'une autonomie suffisante pour survoler l'ensemble de la zone d'étude et qu'il peut suivre les sinuosités importantes de la rivière Ardèche. Le pas de temps utilisé était d'environ 1 photo par seconde.

L'acquisition des images dans le visible permet de faciliter le géo-référencement et l'interprétation des images thermiques.

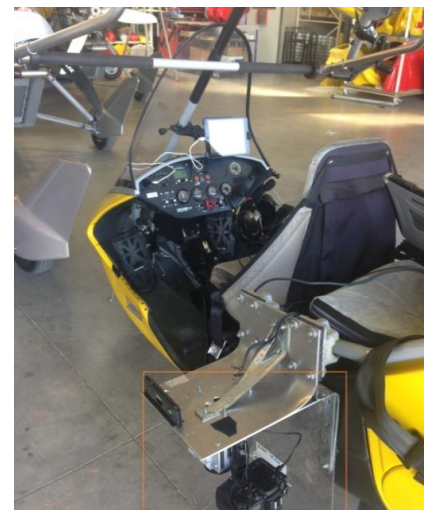


Figure 11 : ULM équipé de la caméra infrarouge et de l'appareil photo

Le survol a été réalisé le 18 juillet 2017 en fin d'après-midi puisqu'il s'agit du moment le plus propice pour différencier les apports du karst de la rivière Ardèche (WAWRZYNIAK, 2012). Il est nécessaire que cette mesure soit réalisée à l'étiage car un débit trop important masquerait les échanges.

Les conditions météorologiques sont également importantes, en effet, il est nécessaire de réaliser cette opération durant une période de beau temps. C'est-à-dire, sans nuages ni brouillard et avec un vent faible pour faciliter le survol (HANDCOCK et al., 2012). Ces conditions étaient réunies lors de la journée du 18 juillet, mis à part un vent assez fort, qui n'a néanmoins pas empêché les mesures.

La réglementation associée à la réserve naturelle des gorges de l'Ardèche a eu un impact sur la réalisation du survol. En effet, selon l'article 13 du décret de la réserve disponible en annexe 2, il est obligatoire de voler à 300m au-dessus de la ligne de crête des falaises ce qui correspond à environ une distance entre l'ULM et l'Ardèche de 700 m. La résolution spatiale a donc été affecté par l'altitude du survol, mais sera selon le CNRS, néanmoins suffisante pour identifier les apports du Karst.

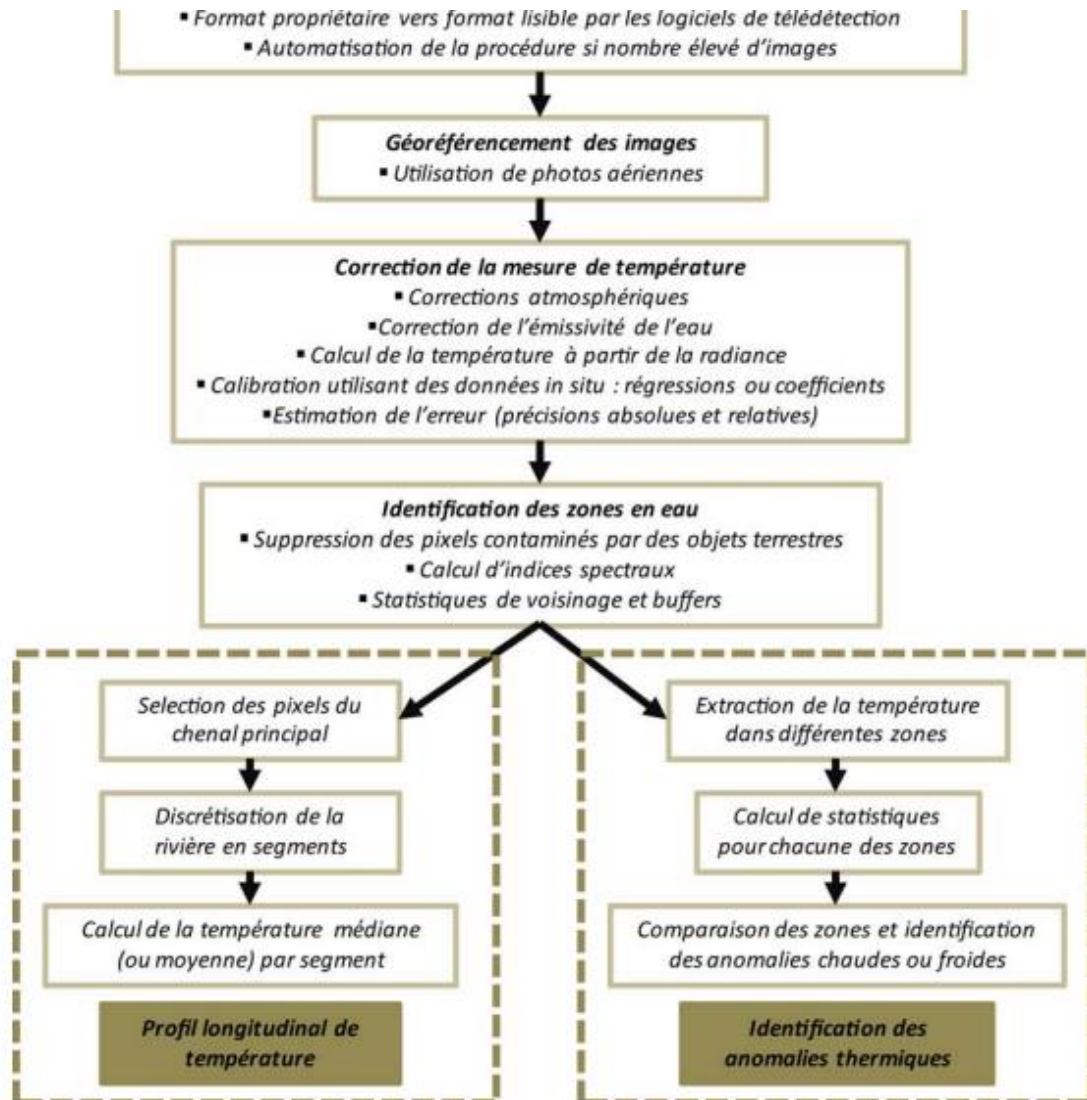
Les 100 premiers micromètres de la surface de la rivière émettent une radiation IRT, il s'agit de ce qui a été mesuré à l'aide de capteurs thermiques embarqués sur l'ULM : bande infrarouge moyen, 3-5 $\mu$ m, et lointain, 8-14 $\mu$ m (ATWELL et al., 1971 ; LILLESAND et al., 2008). L'utilisation de l'infrarouge lointain permet de limiter la sensibilité aux réflexions solaires. De plus, le pic d'émissivité de la surface de l'eau est proche de 9-10 $\mu$ m (LILLESAND et al., 2008).

Le capteur mesure ainsi l'énergie radiative émise par l'eau, et connaissant l'émissivité de l'eau, il est possible de calculer sa température de surface (ATWELL et al., 1971).

## 1.4 Traitement des données du survol aérien

Le traitement des données récupérées lors du survol réalisé par le CNRS de Lyon se décline en cinq grandes étapes illustrées sur la figure 12 ci-dessous :

Figure 12 : Etapes du traitement des données acquises lors du survol. Source : WAWRZYNIAK, 2012



Démarche de traitement des images thermiques pour créer des profils longitudinaux de température ou identifier les anomalies thermiques.

### a) Transformation des images

Les données issues de la caméra Variocam Hr sont récupérées en format .irb et sont consultables sous le logiciel IRBIS.view comme l'indique la figure 13 ci-contre.

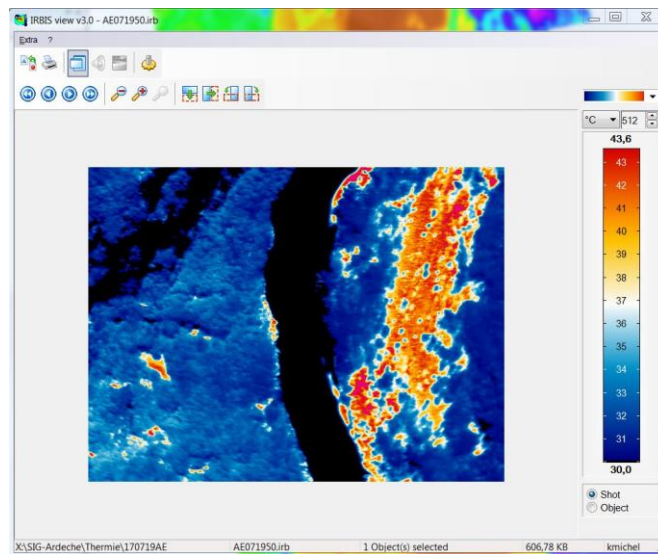


Figure 13 : Photo capturée par la caméra thermique. Source : CNRS de Lyon

Afin de les exploiter sous un logiciel de cartographie, ces données sont retranscrites sous un format .tif à l'aide d'un code développé par un ingénieur du CNRS. On indique en entrée la première et la dernière image du dossier, on demande ensuite au code de calculer la température et on indique un dossier de sortie sous format .tif.

L'image résultante de cette opération sous format .tif est exploitable sous un logiciel de cartographie tel qu'Arcgis. La température est ensuite exprimée en degrés kelvin car le code change la température afin de faciliter les calculs, comme l'indique la figure 14 ci-dessous.

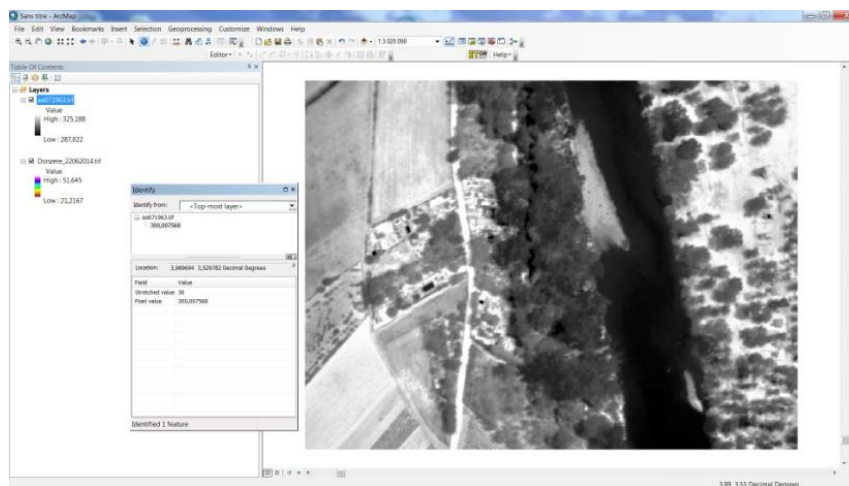


Figure 14 : Photo capturée par la caméra thermique traitée, et consultable sous Arcgis. Source : CNRS de Lyon

### b) Géoréférencement des images

Afin d'exploiter les photos capturées par l'appareil photo et de géoréférencer les images thermiques, le logiciel agisoft photoscan professionnel est utilisé pour trouver des points de similitudes entre chaque photo. Pour cela, on crée un nuage de point dense afin de retrouver des points similaires entre chaque image ce qui permet ainsi de les référencer. On réalise ensuite un maillage afin de créer un TIN entre chaque point. Enfin, on crée une orthomosaique pour le visible.

Il s'agit d'une image résultant de l'assemblage de plusieurs images. L'ensemble est ensuite orthoréctifié, afin que les déformations liées à l'angle de prise de vues et aux défauts de la caméra soient corrigées. En effet, les distorsions sont plus importantes à l'extérieur qu'au centre de l'image. Une rectification est donc réalisée mais la résolution d'origine est conservée.

c) Correction de la mesure de température

C'est lors de cette opération que la pose des sondes sur le linéaire de l'Ardèche a toute son importance. En effet, cette correction sera réalisée à l'aide des données *in situ* mesurées grâce aux 25 sondes positionnées sur la zone d'étude. De par les mesures relevées par les sondes lors du survol, et de leur localisation précise connue grâce aux points GPS, il est possible de comparer la température calculée par la caméra thermique et celle mesurée par les sondes permettant ainsi la calibration des données issues de la Variocam Hr.

d) Identification des zones en eaux

Cette étape consiste, pour le domaine du visible, d'extraire les données en eau. Pour cela, l'extension fluvial corridor toolbox disponible sous Arcgis est utilisée afin d'extraire l'axe médian du cours d'eau. On obtient ainsi un profil en long où chaque pixel correspond à une température. Cet outil permet une homogénéisation de la température du chenal en supprimant les éventuels pixels contaminés par des objets terrestres tels que la ripisylve.

e) Identification des anomalies thermiques

Enfin la dernière étape consiste à identifier les anomalies thermiques qui correspondront aux sources d'eau froide présente dans l'Ardèche. En effet, le CNRS de Lyon suppose qu'au vu de du contraste de température entre les sources d'eau froide et la rivière Ardèche, et qu'au vu de la résolution choisie, la distinction entre les deux sera mis en exergue.

Si cette opération s'était déroulée en hiver, les anomalies thermiques auraient alors correspondu à de l'eau plus chaude puisque les sources ont une température moyenne d'environ 15°C relativement constante au cours de l'année alors que le régime thermique de l'Ardèche est d'environ 5°C pour la période hivernale.

**Le rapport de l'Université de Lyon intitulé « Détection et caractérisation par thermographie aéroportée des refuges thermiques de l'Ardèche dans le tronçon en gorges » est présenté en annexe**

## 2) Prospections subaquatiques des sources

### 2.1 Méthode

Les campagnes de prospections subaquatiques ont été réalisées lors de la semaine du 26 au 28 juin et la seconde campagne sera réalisée du 22 au 24 août en présence d'un plongeur apnéiste professionnel engagé par la FDPPMA07. Il a été choisi de prospecter les différentes sources préalablement identifiées à ces dates puisqu'il s'agit des périodes où le régime thermique de l'Ardèche est le plus critique au regard des espèces salmonicoles, comme on peut le constater sur la figure 15 ci-dessous. Pour plus de lisibilité, la température d'une seule source, la Guigonne, est représentée puisqu'elle est similaire aux autres sources comme on peut le voir en annexe 3.

## Représentation des températures moyennes journalières de l'Ardèche et d'une source : La Guigonne

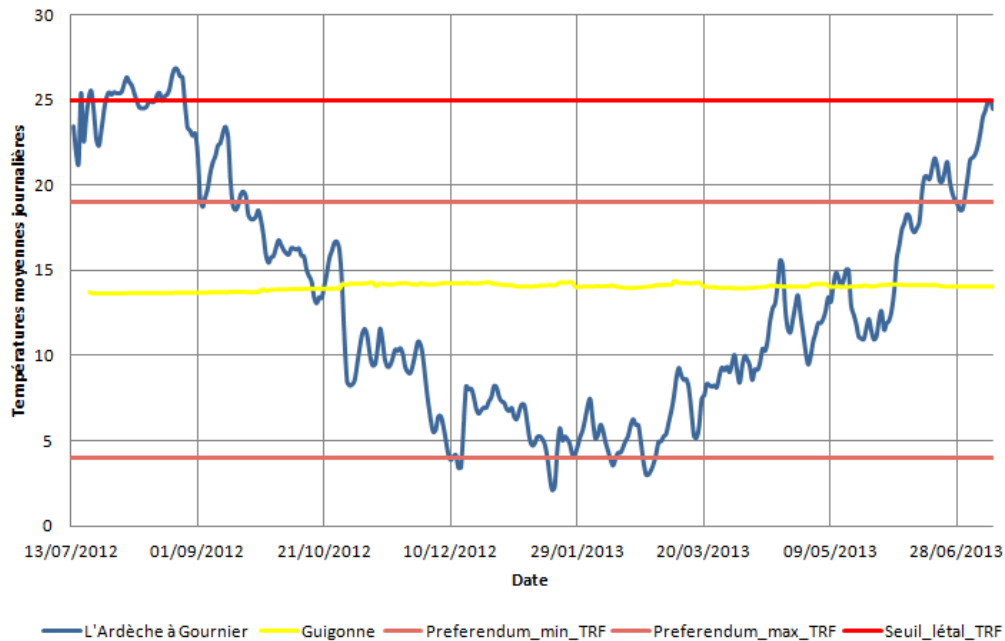


Figure 15 : Représentation de la moyenne journalière de l'Ardèche et d'une source au cours d'une année. Données issues du CDSA

En effet, l'espèce truite fario (*salmo trutta*) appartient au genre *salmo* de la sous-famille des salmonidés. Il s'agit typiquement d'un poisson présent dans les eaux oligotrophes, riches en oxygène dissous, et particulièrement fraîche. Selon ELLIOT, 1994, le préférendum thermique de la truite fario est de 4°C pour la température minimale et de 19°C pour la température maximale. Le seuil létal pour les juvéniles et les adultes est atteint à 25°C (CAUDRON et al., 2006).

Lors de notre première semaine de prospection, la température de la rivière Ardèche avoisinait les 25°C. De ce fait, les salmonidés, dont la truite fario, n'avaient d'autres choix que de se réfugier dans les sources où la température variait de 14 à 16°C ce qui a permis de réaliser un comptage le plus exhaustif possible.

L'intérêt de réaliser ces deux prospections à deux mois d'intervalle est de comparer sur une échelle temporelle les effectifs des individus salmonicoles sur chaque source. En sachant que lors des mois de juillet/août, le régime thermique de l'Ardèche est supérieur à 25°C et que la pression touristique sur le milieu aquatique est fortement accentuée de par la présence de milliers de canoës qui dévalent les gorges chaque jour de l'été.

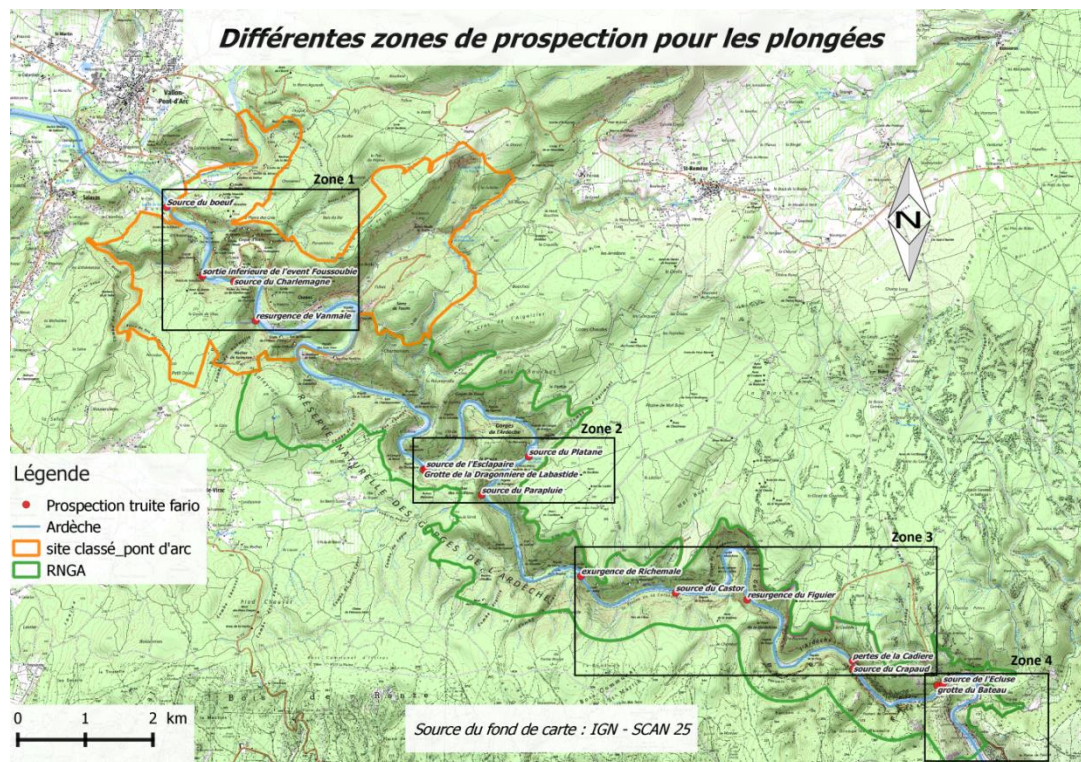


Figure 16 : Représentation des différentes prospections subaquatiques prévues sur la zone d'étude

Au total, ce sont 13 sources, représentées sur la figure 16 ci-dessus, qui ont initialement été choisies pour ces prospections en fonction de leur pérennité au long de l'année et le volume d'eau qu'elles libéraient. En effet, plus une source libère de l'eau fraîche, plus elle est susceptible d'accueillir des espèces salmonicoles. Ce recueil bibliographique et les entretiens avec les personnes ressources ont donc permis une première hiérarchisation des sources et de cibler celles où il y avait potentiellement le plus de chance de trouver des salmonidés

Les prospections sur les zones 1 et 4 se sont réalisées à pied puisqu'il y avait accès à proximité des sources. En revanche, le déplacement entre les zones 2 et 3 s'est réalisé à l'aide de canoës puisque les sources étaient au cœur des gorges de l'Ardèche, et aucun autre accès n'était envisageable.

Le même protocole a été sensiblement effectué pour chaque source. Dans un premier temps, le plongeur apnéiste mettait en place son dispositif vidéo à l'aide de caméras type GoPro, représentée sur la figure 17 ci-contre. Ces dernières étaient lestées et donc immergées et filmaient en moyenne 20 minutes sur chaque site.



Figure 17 : Matériel vidéo utilisé pour réaliser le comptage

Suite à cette première approche, le plongeur retirait ses caméras et photographiait à l'aide de son appareil photo SONY Alpha 65 équipé d'un objectif 15 mm et d'un caisson ikélite les truites observées.

Ensuite, une fois que les prospections subaquatiques étaient terminées, la seconde étape du protocole consistait à relever à l'aide d'un conductimètre représenté sur la figure 18 ci-contre :



Figure 18 : Conductimètre utilisé pour réaliser les mesures

- la température et la conductivité de la source
- la température et la conductivité de l'Ardèche en amont de la zone de prospection afin d'éviter que la source d'eau froide influence les valeurs.

La température, exprimée en degrés Celsius, a permis de mettre en évidence le significatif contraste de température entre l'Ardèche et les sources, et donc de nous confirmer que nous étions au bon emplacement pour réaliser la prospection.

La conductivité relevée, exprimée en  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , a également permis d'attester de la présence d'une source puisque cette dernière était plus importante dans la plupart des sources. En effet, après le parcours dans le karst, l'eau s'est enrichie en minéraux ce qui lui a conféré une meilleure capacité à conduire le courant électrique. L'eau provenant des sources peut être qualifiée d'eau dure. On peut également supposer qu'au vu de la composition des minéraux, riches en calcaire, il s'agit bien de l'ion calcium qui confère à ces sources une conductivité si importante.

## 2.2 Traitement des données

Afin d'exploiter les données récoltées par les vidéos du plongeur, il a fallu pour chaque source visionner l'ensemble des images pour comptabiliser les individus présents. D'une part, il a fallu identifier les différentes espèces présentes et d'une autre part, il a fallu estimer les effectifs pour chaque source en évitant les redondances. En effet, il s'est avéré que sur certaines sources, des individus appartenaient à la même cohorte ce qu'ils leur conféraient une taille similaire. Afin de limiter ce biais, certains signes distinctifs tels que des marques sur les nageoires ou encore des robes différentes pour certains poissons ont permis de distinguer les différents individus et donc de réaliser un comptage le plus représentatif de la réalité possible.

A la suite de la seconde semaine de plongée, la même opération de traitement des données sera effectuée. Une comparaison des effectifs entre ces deux périodes sera également pratiquée permettant, ou non, de mettre en exergue une évolution des effectifs durant cette période jugée la plus critique pour les espèces salmonicoles.

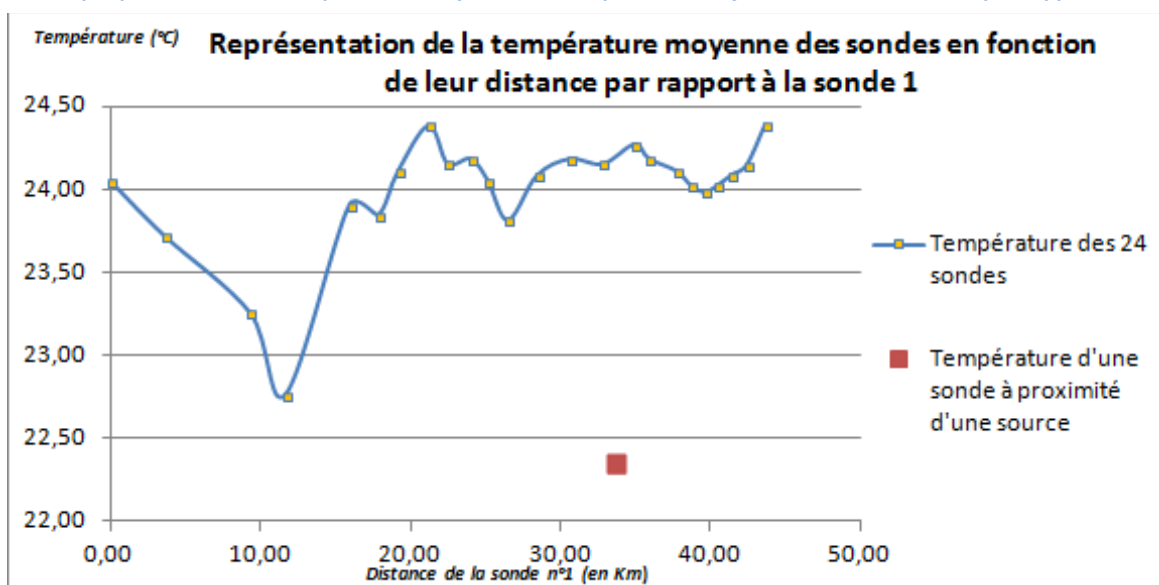
## IV. RESULTATS ET DISCUSSION

### 1) Suivi thermique des gorges de l'Ardèche

#### 1.1 Résultat et discussion des 25 sondes thermiques mises en place

Les sondes mises en place dans le lit de l'Ardèche ont permis d'établir la figure 19 ci-dessous :

Figure 19 : Graphique illustrant les températures moyennes de chaque sonde en fonction de leur distance par rapport à la sonde 1



On peut noter que la courbe du graphique ne comporte que 24 sondes sur les 25. En effet une sonde a été disposée en aval d'une source ce qui a indéniablement influencé la température de l'Ardèche et c'est pourquoi cette valeur n'a pas été intégrée à la courbe. On remarque également que la température de sonde numéro 5 est plus importante de plus d'un degré Celsius que la sonde numéro 4. On peut émettre l'hypothèse que cette augmentation est due à la présence d'un barrage juste en aval de la sonde 5 ce qui a accentué le réchauffement de l'eau sur ce secteur.

En revanche, les températures des sondes disposées sur la zone d'étude ne varient pas significativement. En effet, on observe une différence maximum de 0,6°C, ce qui peut soit être expliqué par une variation locale due à un faible écoulement d'eau plus froide issu du karst ou bien, cela peut être dû à la différence de profondeur à laquelle ont été disposées les sondes. Les sondes disposées à proximité de la surface sont plus sensibles au réchauffement des eaux issu du rayonnement solaire contrairement aux sondes placées dans des zones plus profondes. L'influence de l'ombrage associée à la ripisylve peut également être mise en avant pour tenter d'expliquer cette faible différence de température entre les différentes sondes.

La sonde positionnée à environ 1,5m-2m d'une source aérienne a relevé une température moyenne d'environ 1,5°C plus faible que les autres sondes. L'eau provenant du karst au niveau de cette source a une température moyenne d'environ 15°C, ce qui montre que l'influence de cette eau froide sur le régime thermique de l'Ardèche est très localisée.

Ces données thermiques ne sont pas exploitables en tant que telles, mais elles sont essentielles quant à la calibration des images thermiques.

#### 1.2 Résultat et discussion du survol

Le traitement des données des images thermiques étant relativement lourd, aucun résultat ne peut être présenté dans cette présente étude. En revanche, à titre d'exemple, le résultat attendu sera similaire à une ancienne étude réalisée par le CNRS sur la Cèze, illustré sur la figure 20 ci-dessous où l'eau plus fraîche est représentée par le bleu foncé :

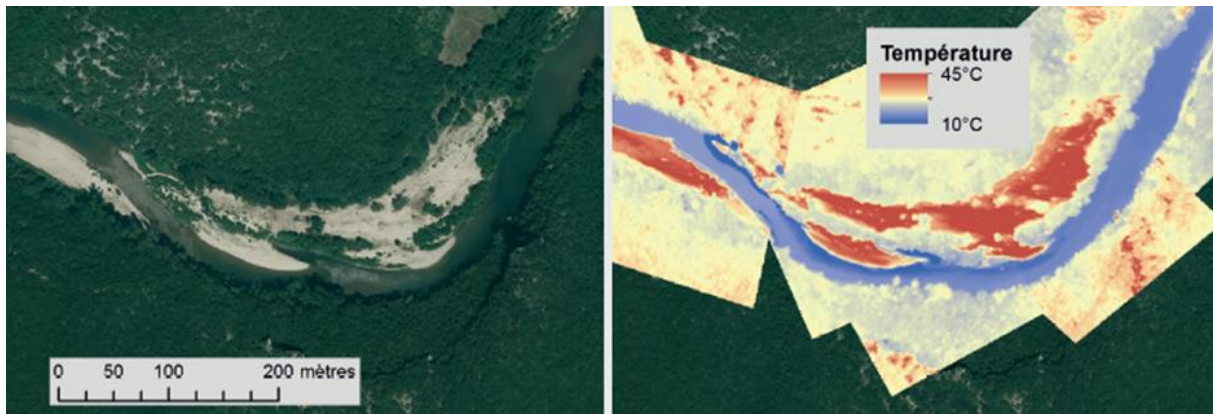


Figure 20 : Exemple du résultat attendu sur le cours d'eau la Cèze

Cette méthode présente des avantages certains. D'une part, elle permet d'obtenir une cartographie de la température de surface, avec une bonne représentativité de la résolution spatiale, ce qui n'est pas envisageable avec des mesures *in situ* telles que les 25 sondes thermiques disposées sur l'Ardèche. D'autre part, l'acquisition des données est relativement rapide pour l'emprise spatiale étudiée. En effet, l'aller-retour a été effectué en 2 heures environ.

En revanche certaines contraintes peuvent être observées quant à l'utilisation de cette méthode. En effet, différentes sources d'erreurs peuvent influencer le résultat tel que l'émissivité de la surface de l'eau, les réflexions de radiations environnantes et la rugosité de l'eau (WAWRZYNIAK, 2012).

De plus pour l'acquisition des données aéroportées, différents facteurs peuvent altérer la qualité du survol. Dans le cas de cette présente étude, il s'agit du vent relativement soutenu lors du survol. En effet, il faut privilégier une observation la plus verticale possible afin de limiter la réflexion des nuages et des objets terrestres (WAWRZYNIAK, 2012), ce qui a été complexe étant donné du vent présent.

De plus, la législation aérienne instituée par le décret de la réserve naturelle des gorges de l'Ardèche, entraînant une obligation de voler à plus de 300 de la ligne de crête des falaises a pu favoriser une légère imprécision des résultats.

Des dérives peuvent également être observées pendant les mesures de la caméra thermique ce qui entraîne des incertitudes liées à la calibration de la caméra thermique.

## 2) Résultat et discussion de l'inventaire piscicole

### a) Première semaine de prospection

L'ensemble des sources sélectionnées au préalable n'ont malheureusement pas pu toutes être prospectées. En effet, certains points présentaient une sortie relativement étroite ce qui représentait un risque conséquent pour le plongeur. Une autre source n'a pas été prospectée car l'eau provenant du karst s'écoulait sur un radier ce qui ne présente pas un habitat favorable pour les truites fario. Les sources prospectées et où l'acquisition de données a été réalisée sont représentées sur la figure 21 ci-dessous.

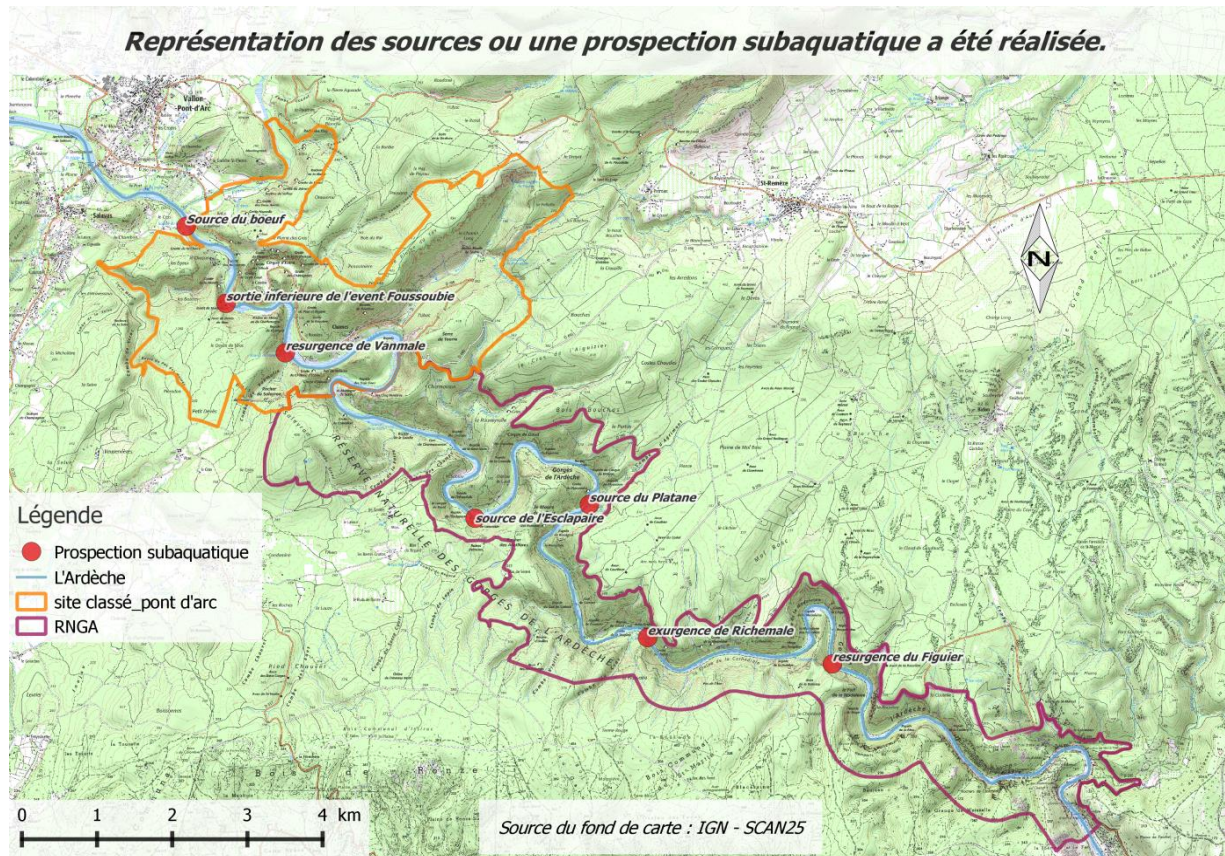
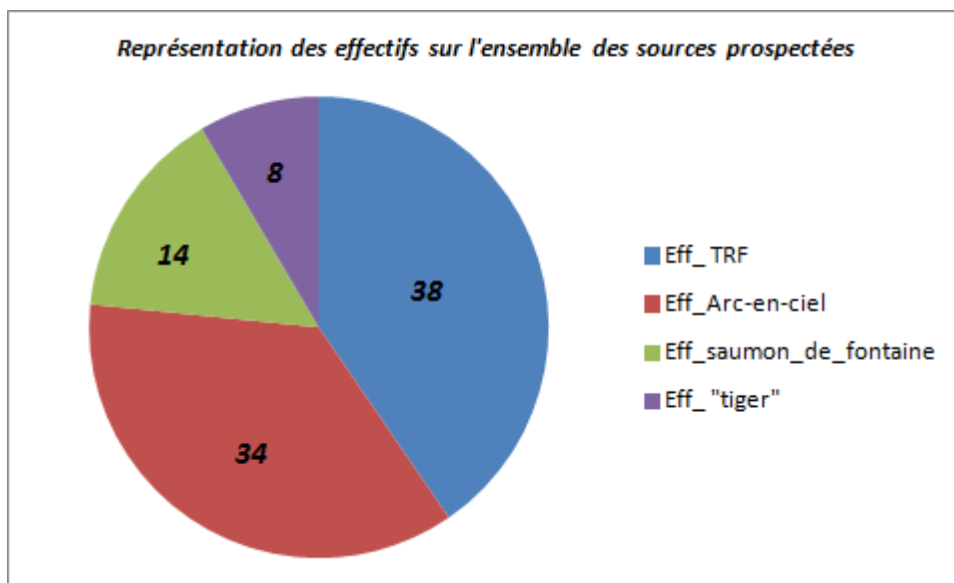


Figure 21 : Représentation des différentes prospections subaquatiques réalisées sur la zone d'étude

Après le visionnage de l'ensemble des vidéos, les premières constatations du plongeur se sont avérées exactes. Tout d'abord, on remarque que sur chaque source prospectée, la présence d'espèces salmonicoles était systématique.

Malgré ça, on constate un faible effectif de truites fario sur l'ensemble du linéaire et seulement deux poissons d'une taille supérieure à 60 cm. En revanche il est difficile d'estimer les classes d'âge de chaque individu et donc de définir les cohortes hormis pour les poissons atteignant une taille relativement exceptionnelle. En effet, il n'est pas aisé sur des vidéos, en l'absence d'échelle, de définir les différentes classes d'âge des individus observés. En revanche, on peut affirmer qu'aucun juvénile n'a été observé lors de ces prospections. Il s'agirait de petits poissons pouvant atteindre une taille d'environ 100-150 mm lors de leur première année de croissance, mais il est néanmoins certains que ces poissons n'étaient pas présents sur les sources lors de notre première semaine de prospection.

Lors des plongées subaquatiques et de l'exploitation des vidéos récoltées, on a pu remarquer une plus forte densité de poissons issus des lâchers réalisés par l'AAPPMA plus amont et qui dévalent en période de crue comme en atteste la figure 22 représentée ci-dessous :



*Figure 22 : Représentation des effectifs observés sur l'ensemble des sources*

On note la présence de saumons de fontaine, de truite arc-en-ciel et de truite « tiger » (croisement entre une truite fario et un saumon de fontaine), et bien évidemment l'espèce dite naturelle : la truite fario, représentés sur la figure 23 ci-dessous.



*Figure 23 : Représentation des espèces salmonicoles observées. Source : Philippe CARRIERE*

On note également que les espèces d'accompagnement profitent aussi de ces sources, tout du moins, occasionnellement peut-être. L'observation de chevesnes, de barbeaux, de goujons, de vairons et de hotu a par exemple été réalisée.

L'ensemble des truites fario n'a certainement pas été observé mais la représentativité des résultats est optimum puisque au vu de la température de l'Ardèche et du préférendum thermique de ces poissons, ils ne pouvaient pas être localisés ailleurs sur le site.

Cette observation a d'ailleurs été remarquée par le plongeur ; En effet, lorsque ce dernier prospectait la source, les poissons étaient effrayés et partaient s'isoler temporairement au cœur de l'Ardèche avant de regagner presque instantanément les sources. Ces poissons paraissaient suffoquer ; ce qui confirme que lors des mois de juillet et août l'ensemble des espèces salmonicoles ne peuvent pas coloniser un autre refuge thermique que sont les sources.

Ce premier constat est très préoccupant puisque sur l'ensemble des 7 sources prospectées, ce sont seulement 38 truites fario qui ont été comptabilisées alors que l'on dénombre 56 individus d'espèces exogènes, comme vous pouvez le voir sur le graphique 24 ci-dessous.

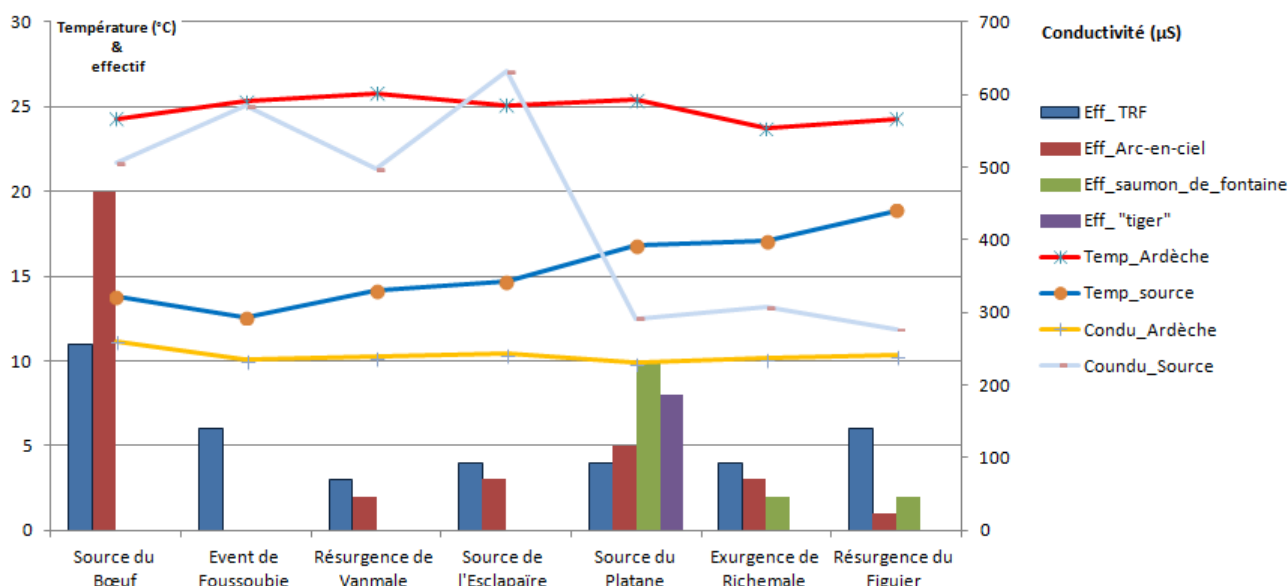


Figure 24 : Représentation des effectifs d'espèces salmonicoles, de la température et de la conductivité observés sur chaque source

Plusieurs causes peuvent être avancées pour tenter d'expliquer les raisons de ce faible peuplement, sans jamais pouvoir affirmer l'une d'entre elles. Le braconnage avec des techniques de pêche non autorisée, à l'aide de harpons par exemple, est avéré mais il est malheureusement difficile de faire cesser ces pratiques. Le prélèvement trop important des poissons, par les pêcheurs, ne permettant pas de maintenir une bonne population peut également être mis en avant pour tenter d'expliquer ces résultats.

Les maladies/parasites sont des phénomènes naturels mais qui peuvent être accentués par le « lâcher » de poissons issus de pisciculture. En effet, lors des introductions dans le milieu naturel, les poissons sont parfois porteurs de maladies auxquelles les populations naturelles de truites fario sont plus sensibles. Enfin, la pression touristique et particulièrement les canoës omniprésents sur ce site l'été ont très certainement des conséquences sur les milieux aquatiques.

La curiosité des touristes apercevant un écoulement provenant de la falaise peut les inciter à venir sur ces zones d'eau fraîche entraînant un stress pour les salmonidés qui peut causer la mort de certains individus d'ores et déjà fragiles.

Les sources, comme la source du bœuf représenté sur la figure 25, constituent bien l'unique refuge pour l'ensemble des espèces salmonicoles. Mais cette ichthyofaune est donc plus localisée et de ce fait nettement plus vulnérable.



Figure 25 : La source du Bœuf et le plongeur en prospection

Enfin, afin d'apporter des images concrètes, un film a également été réalisé par le plongeur, disponible sur le site Facebook de la FDPPMA07 : « Pêchez l'Ardèche ».

Ce film intitulé : *Le refuge des truites en été*, présente le cadre de cette étude, la problématique étudiée ainsi que des extraits des poissons observés. Ce montage vidéo, commandité par la FDPPMA07, est en ligne sur leur site afin de sensibiliser les pêcheurs ardéchois mais il pourra également être diffusé par le syndicat de gestion des gorges de l'Ardèche afin d'alerter les touristes quant à la fragilité de cet écosystème qu'il est nécessaire de protéger.

### b) Résultat de la seconde semaine de prospection :

La seconde semaine de prospection s'est déroulée le 22, 23 et 24 août 2017. L'inventaire a été réalisé sur les mêmes sites que lors de la 1<sup>ère</sup> semaine de prospection subaquatique. La température de l'Ardèche s'était abaissée d'environ 2°C mais restait encore trop chaude pour abriter des salmonidés.

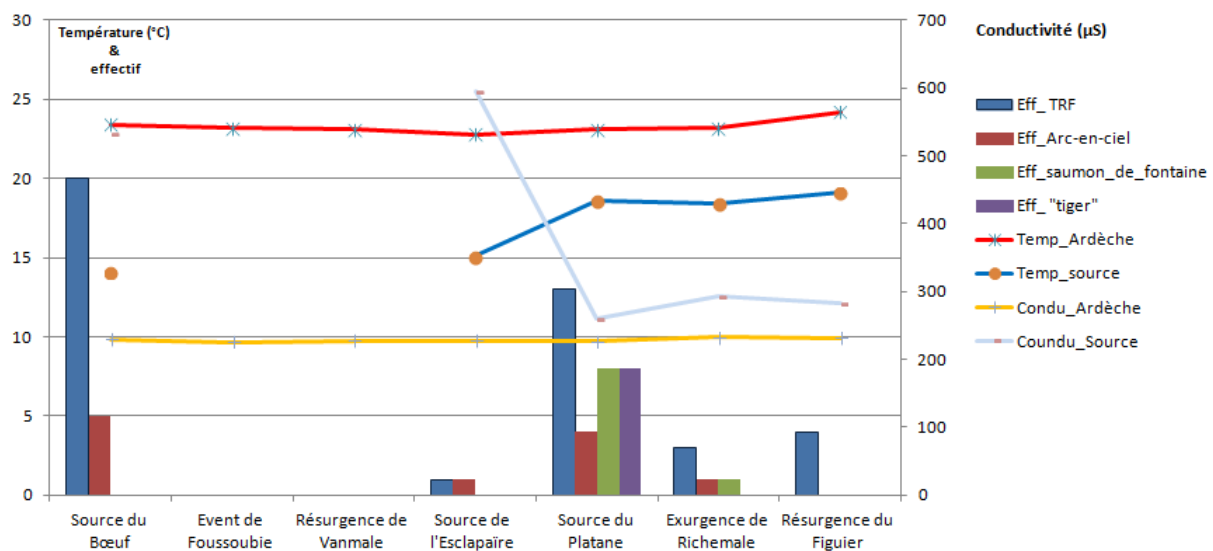


Figure 26 : Représentation des effectifs d'espèces salmonicoles, de la température et de la conductivité observés sur chaque source

D'une part, deux sources d'eau fraîche, l'évent de Foussoubie et la résurgence de Vanmale ne présentaient plus un débit suffisant pour garantir une arrivée d'eau fraîche convenable au sein de la rivière Ardèche.

De ce fait, les populations salmonicoles que nous avons pu observer lors de la première semaine de prospection n'étaient plus présentes ce qui signifie qu'à cette période, seulement 5 sources peuvent être encore qualifiées de refuges thermiques.

L'effectif de salmonidés sur la source du bœuf est resté sensiblement identique que lors de la première semaine de prospection même si le nombre d'individus de truite arc-en-ciel était plus

faible. Cette constatation peut s'expliquer de par le fait que la pression de pêche est importante sur ce site en été.

Le nombre de salmonidés au niveau de la source de l'Esclapaire était également plus faible puisque seulement une truite fario et une truite arc en ciel ont été observées alors que la première semaine de prospection nous avons comptabilisé 4 truites fario et 3 truites arc-en-ciel.

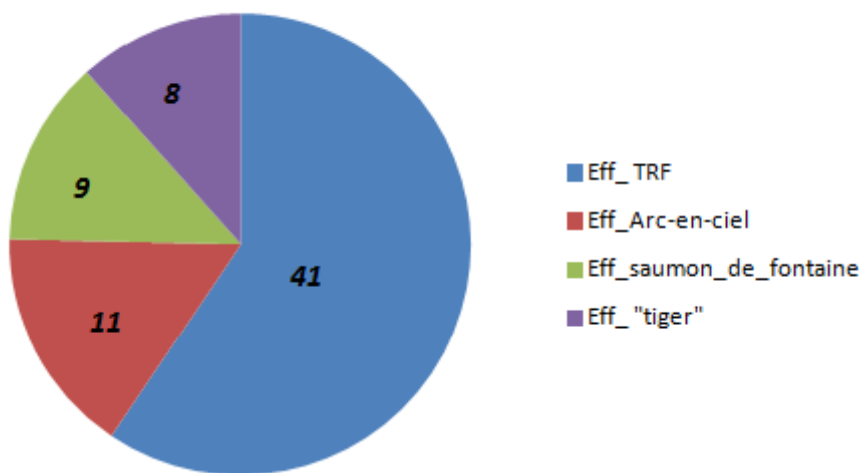
La source du Platane, comme lors du premier inventaire, présentait une population importante de salmonidés ou 4 espèces salmonicoles différentes ont été inventoriées. De plus, la présence de 2 gros spécimens de truites fario observés lors de la seconde semaine de prospection, qui n'étaient pas présent lors du premier inventaire, laisse présager que ce refuge thermique présente une grande capacité d'accueil et qu'au vue de sa taille et de sa profondeur il est difficile de réaliser un comptage parfaitement exhaustif.

A l'exsurgence de Richemale la population observée était également en baisse puisque un individu de chaque espèce salmonicole était manquant.

Enfin à la résurgence du figuier, seulement 4 truites fario ont été comptabilisés alors que lors de la 1<sup>ère</sup> semaine nous avons comptabilisé 6 truites fario, 1 truite arc en ciel et deux saumons de fontaine.

Ce deuxième constat est encore plus alarmant que celui que nous avons pu faire après la première semaine de prospection. En effet, comme on peut le voir sur le graphique suivant, 69 espèces salmonicoles ont été comptabilisées alors que lors de la première semaine de prospection 94 salmonidés avaient été dénombrés :

**Représentation des effectifs de la deuxième semaine de prospection**



*Figure 27 : Représentation des effectifs observés sur l'ensemble des sources*

Ce que l'on peut également remarquer, c'est que le nombre de truites fario était plus important lors de la seconde semaine prospection contrairement aux 3 autres espèces salmonicoles.

Les erreurs associées au comptage peuvent permettre d'expliquer ce chiffre mais il est néanmoins certains que cette espèce locale possède un organisme plus résistant que les autres espèces de lâchers ce qui lui permet de résister davantage aux périodes critiques.

## CONCLUSION

L'ensemble des opérations initialement prévues dans le cadre de cette étude ont été réalisées et la seconde semaine de prospection le sera prochainement. Les résultats du survol et l'acquisition de données infrarouge mettent en évidence que la présence de sources et d'apports d'eau fraîche est quasi continue sur tout le linéaire des gorges. Pour conclure sa thèse, FABRE (1984) mentionnait « qu'une analyse aérographique à l'infrarouge du lit mineur de l'Ardèche serait essentielle pour mieux comprendre son fonctionnement ». Cette étude aura donc permis de répondre à la requête de cet auteur.

A la suite des prospections subaquatiques, cette étude s'achève sur un constat plutôt alarmant. En effet, on constate que la population naturelle de truite fario est relativement faible puisque seulement environ 40 individus ont pu être observés lors de chaque semaine de prospection. Afin de préserver ces populations, des mesures de protection peuvent être mises en place dans l'espoir de conserver cette espèce dans cet écosystème particulier.

Une mesure de préservation telle qu'un parcours « sans tuer » (dit No kill) peut être mise en place et s'intégrera parfaitement au statut réglementaire de la réserve. Cette réglementation permettra de limiter les prélèvements de ces poissons même si le braconnage est une pratique difficile à faire cesser.

Ensuite afin de limiter les maladies pouvant affecter les truites fario, souvent importées par des poissons d'élevage, il est également envisageable de limiter les lâchers réalisés en amont qui ont tendance à dévaler les gorges lors des crues et ainsi concurrencer les populations locales.

Limiter la pression touristique sur les refuges thermiques est également essentielle pour garantir la pérennité de ces espèces salmonicoles. Pour ce faire, des affichages mentionnant la fragilité de cet écosystème aux abords des sources pourraient être mis en place.

Un autre inventaire des sources pourrait également être réalisé l'été prochain permettant de mettre en évidence le renouvellement interannuel des stocks, ou contraire la diminution de ceux-ci.

D'autres études pourront également être menées afin d'améliorer les connaissances sur le fonctionnement atypique de cet écosystème. Un suivi des frayères pourrait être envisagé durant la période de reproduction afin d'identifier les zones les plus propices. Une analyse génétique pourra également être mise en place afin de mieux comprendre d'où proviennent ces poissons, notamment les juvéniles.

Lors des plongées dans les réseaux souterrains réalisées par le CDSA, un témoignage d'un plongeur atteste avoir vu des poissons, dont des truites fario, dans le karst ce qui est un phénomène encore inconnu. La mise en place d'émetteurs GPS sur certains poissons pourrait également être envisagée afin de mieux cerner les déplacements atypiques de ces populations.

Cette étude aura permis de mettre en exergue que sans les sources, les populations de salmonidés seront amenées à s'éteindre et entraînera en même temps la disparition d'un écosystème particulier, propre aux gorges de l'Ardèche. De ce fait, même si la demande en eau potable s'accroît afin de garantir le tourisme sur ce territoire, il est nécessaire que les acteurs de l'eau soient conscients que les prélèvements dans le karst seraient susceptibles d'entraîner la disparition de ces refuges et inévitablement des salmonidés dans les gorges de l'Ardèche.

## BIBLIOGRAPHIE

- Atwell B, MacDonald R, Bartolucci L. (1971). Thermal mapping of streams from airborne radiometric scanning. *Water Resources Bulletin*, 7(2), 228-243
- Beaufort A, Curie F, Moatar F. (2015). Température des cours d'eau : analyse des données et modélisation : application au bassin de la Loire. Rapport final. Université François-Rabelais de Tours
- Bellevile, L. (1985) Hydrogéologie karstique. Géométrie, fonctionnement et karstogénèse des systèmes karstiques des gorges de l'Ardèche, Thèse, Université scientifique et médicale de Grenoble
- Caissie D. (2006). The thermal regime of rivers: a review. *Freshwater Biology*, 51, 1389-1406
- Caudron, A., Champigneulle, A. & Large A., 2006a. Etats et caractéristiques des populations autochtones de truite commune identifiées en Haute-Savoie et qualité globale des milieux. In: Identification, sauvegarde et réhabilitation des populations de truites autochtones en Val d'Aoste et Haute-Savoie, pp. 55-117. Programme INTERREG III A. Rapport final, Milan.
- Debard, E. (1997). Les remplissages karstiques du Bas-Vivarais: karstogénèse, sédimentogénèse et archéologie [Karstic infillings of the Bas-Vivarais: karstogenesis, sedimentogenesis and archeology.]. *Quaternaire*, 8(2), 305-317.
- 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, p. 358-373
- Elliott J.M., 1994. Quantitative ecology and the brown trout. Oxford Series in Ecology and Evolution, Oxford University Press, 286 p
- Fabre, G. (1984) Niveaux de base actuels dans les trois principaux canyons du Languedoc oriental : l'Ardèche, la Cèze et le Gard.
- Gombert, P. (1988) Hydrogéologie et karstogénèse du bas-vivarais calcaire (Ardèche – France), Thèse, Université des sciences et techniques du Languedoc
- Guerin, R. (1973) Un exemple du rôle de la tectonique et de la microtectonique dans la géométrie des écoulements karstiques fossiles et actuels : le Bas Vivarais calcaire, Thèse, Université des sciences et techniques du Languedoc
- Handcock R, Torgersen C, Cherkauer K, Gillespie A, Tockner K, Faux R, 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.
- Lillesand TM, Kiefer RW, Chipman JW. (2008). Remote sensing and image interpretation, 6th Edition. John Wiley and Sons, New York, 804p
- Mazellier, R. (1971) Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique : des terrains crétacés du Bas-Vivarais, Thèse, Université de Montpellier.
- Torgersen C, Faux R, McIntosh B, Poage N, Norton D. (2001). Airborne thermal remote sensing for water temperature assessment in rivers and streams. *Remote Sensing of Environment*, 76(3), 386-398.
- Vollmer M., Möllmann K.P. (2010). *Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications*. Wiley-VCH, Weinheim, 593 p
- Wawrzyniak, V (2012) Etude multi-échelle de la température de surface des cours d'eau par imagerie infrarouge thermique : exemple dans le bassin du Rhône, Thèse, Université Jean Moulin Lyon 3

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Carte de la zone d'étude

Figure 2 : Carte géologique de l'Ardèche

Figure 3 : Le pont d'arc

Figure 4 : Représentation du bassin versant de l'Ardèche

Figure 5 : Représentation d'une zone karstifiée

Tableau 1 : Etape de la karstogénèse

Figure 6 : Logo SGGA

Figure 7 : Logo SMAC

Figure 8 : Représentation des 25 sondes mises en place sur l'ensemble du linéaire

Figure 9 : Méthode de mise en place des sondes

Figure 10 : Logiciel d'extraction des données thermiques

Figure 11 : ULM équipé de la caméra infrarouge et de l'appareil photo

Figure 12 : Etapes du traitement des données acquises lors du survol

Figure 13 : Photo capturée par la caméra thermique

Figure 14 : Photo capturée par la caméra thermique traitée et consultable sous Arcgis

Figure 15 : Représentation de la moyenne journalière de l'Ardèche et d'une source au cours d'une année

Figure 16 : Représentation des différentes prospections subaquatiques prévues sur la zone d'étude

Figure 17 : Matériel vidéo utilisé pour réaliser le comptage

Figure 18 : Conductimètre utilisé pour réaliser les mesures

Figure 19 : Graphique illustrant les températures moyennes de chaque sonde en fonction de leur distance par rapport à la sonde 1

Figure 20 : Exemple de résultat attendu sur le cours d'eau la Cèze

Figure 21 : Représentation des différentes prospections réalisées sur la zone d'étude

Figure 22 : Représentation des effectifs observés sur l'ensemble des sources

Figure 23 : Représentation des espèces salmonicoles observées

Figure 24 : Représentation des effectifs des espèces salmonicoles, de la température et de la conductivité observés sur chaque source

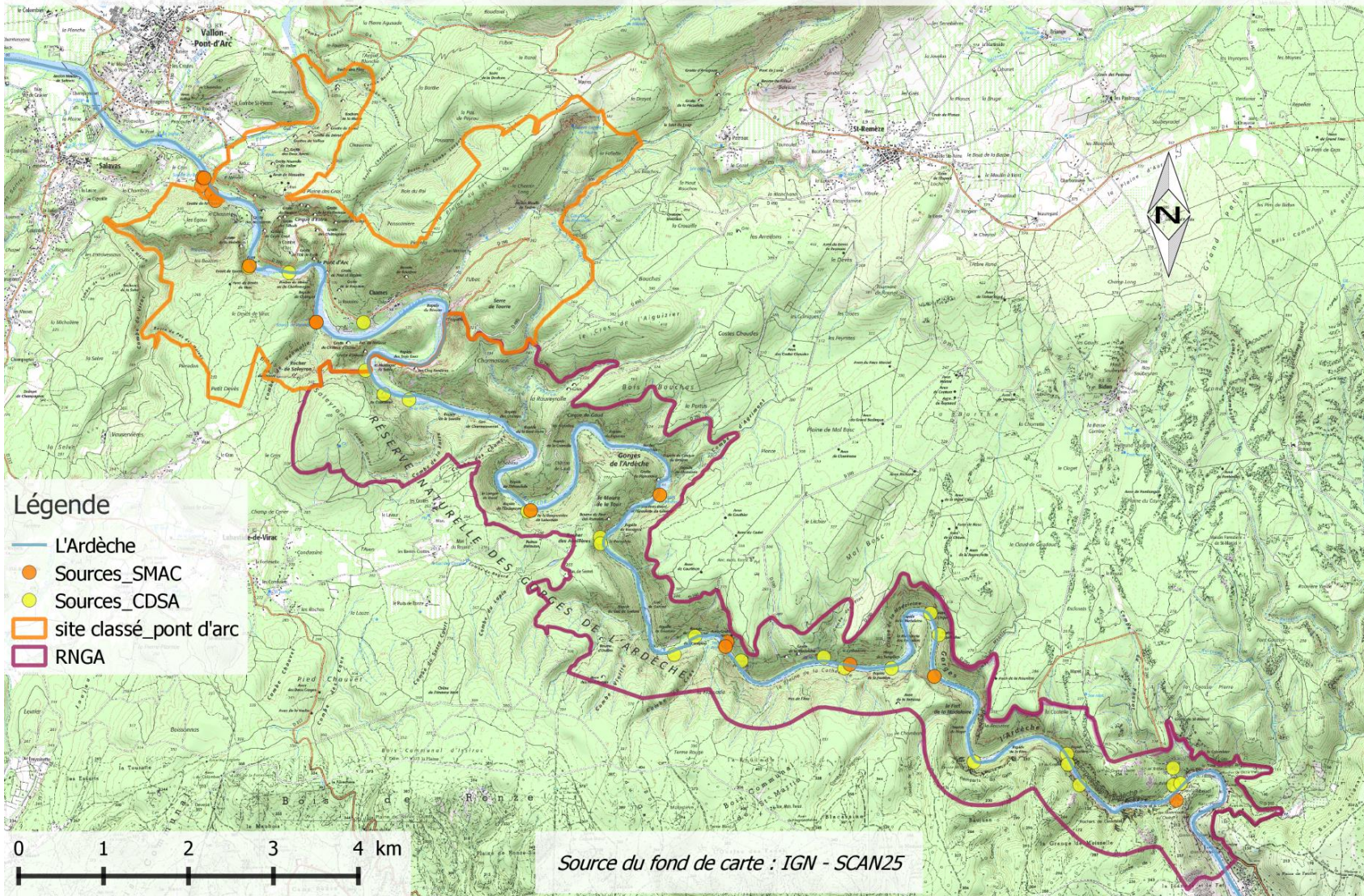
Figure 25 : La source du Bœuf et le plongeur en prospection

Figure 26 : Représentation des effectifs des espèces salmonicoles, de la température et de la conductivité observés sur chaque source

Figure 27 : Représentation des effectifs observés sur l'ensemble des sources

## ANNEXE 1 :

### Représentation des différentes sources connues sur l'Ardèche.



## ANNEXE 2 :

### Article 13

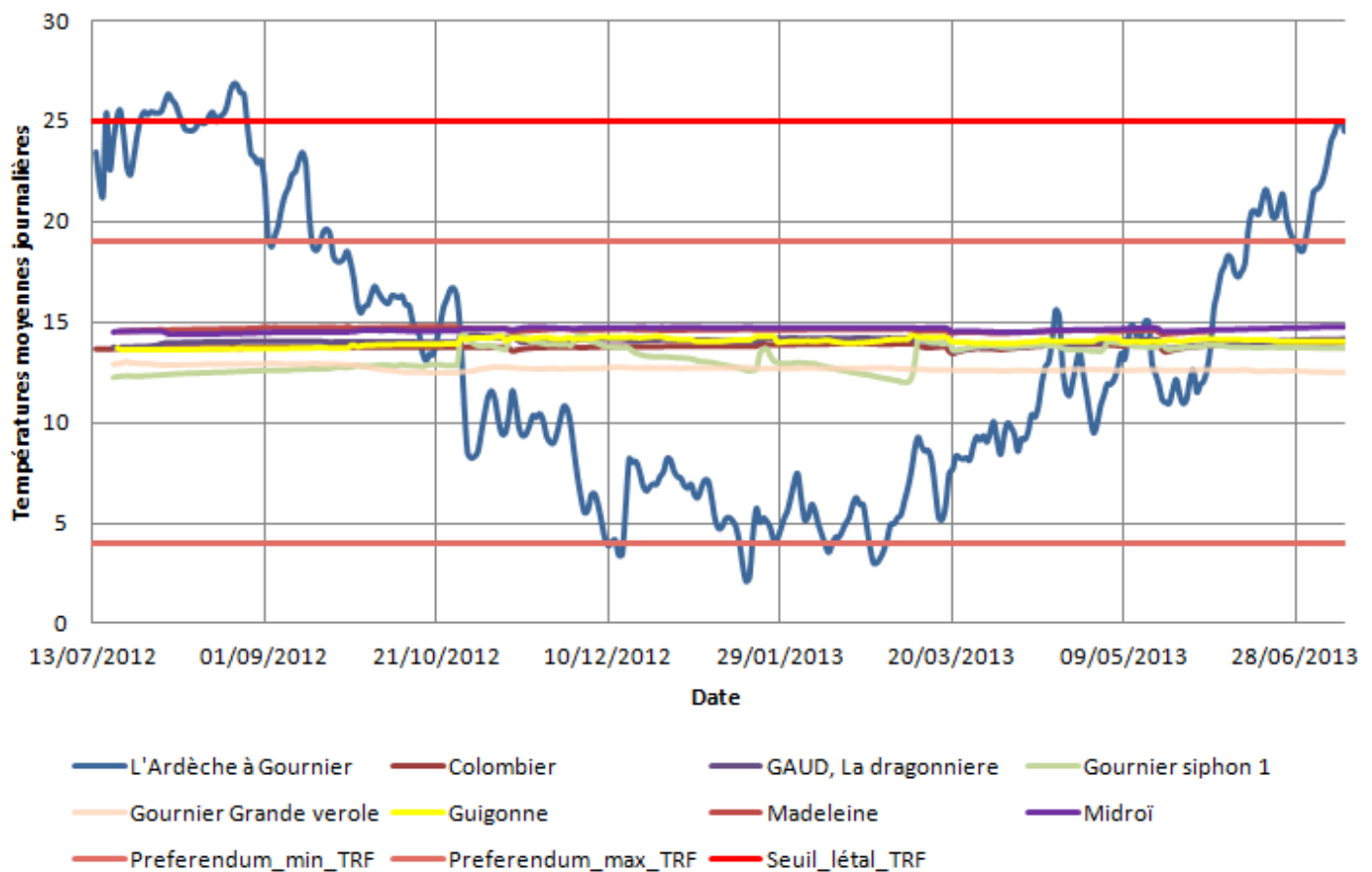
Sauf autorisation délivrée par le préfet de département, après avis du conseil scientifique de la réserve, il est interdit aux aéronefs de survoler la réserve naturelle à une hauteur inférieure à 300 mètres au-dessus de la ligne des crêtes des falaises ;

Cette disposition n'est pas applicable :

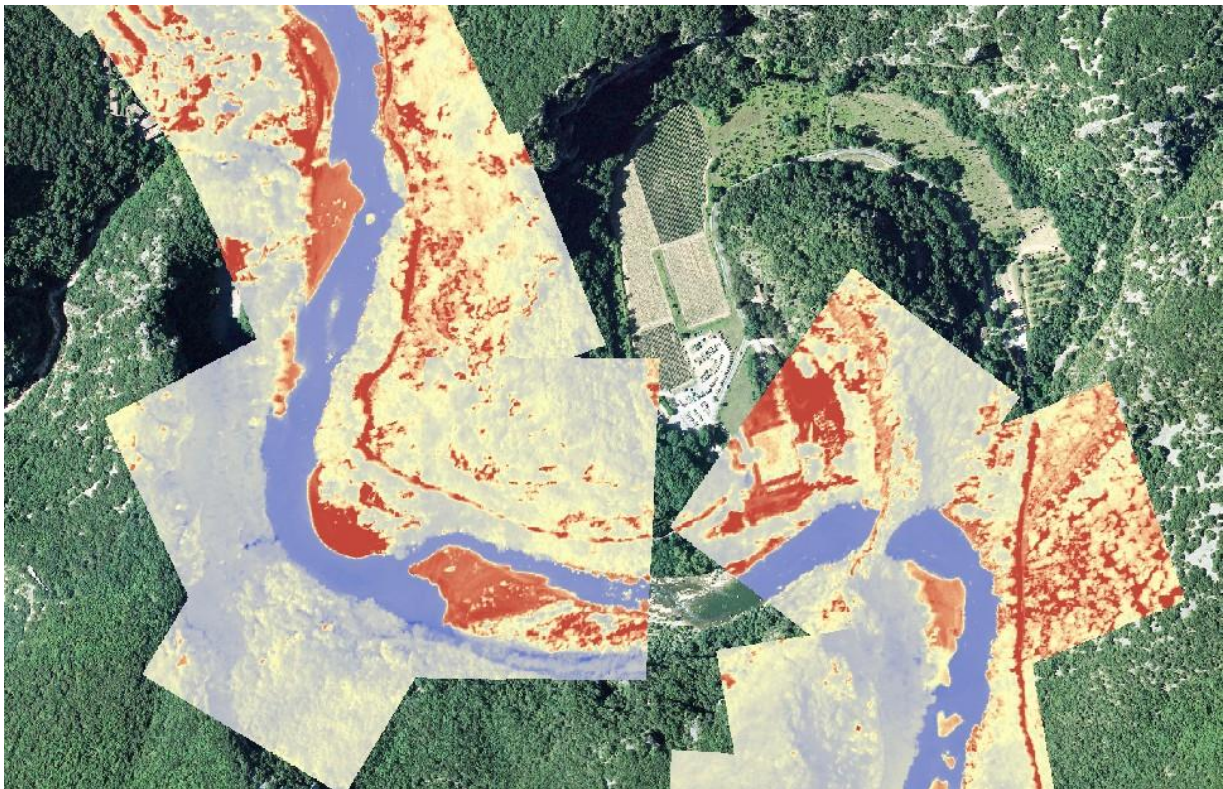
- Aux aéronefs effectuant des missions opérationnelles de secours, de sécurité civile, ou de police;
- Aux aéronefs d'Etat en nécessité de service

## ANNEXE 3 :

### Représentation des températures moyennes journalières de l'Ardèche et de différentes sources



# Détection et caractérisation par thermographie aéroportée des refuges thermiques de l'Ardèche dans le tronçon en gorges – Rapport final



- Novembre 2017-

V. BENACCHIO, V. WAWRZYNIAK, K. MICHEL, H. PIEGAY

*Image en couverture :  
l'Ardèche au niveau du Pont D'arc - images thermiques (IRT) sur la BD Ortho de l'IGN*

## Table des matières

I- Traitements appliqués aux images thermiques.....	1
I.1- Géoréférencement des images thermiques et création d'une mosaïque.....	1
I.1.1- Géoréférencement des images thermiques .....	1
I.2- Création d'une mosaïque d'images thermiques .....	2
I.2- Correction des températures .....	2
I.2.1- Localisation des capteurs de températures in-situ .....	3
I.2.2- Comparaison des températures mesurées in-situ et estimées par imagerie infra-rouge thermique .....	4
II- Analyse qualitative des images.....	7
II.1 Profil en long de la température médiane du thalweg.....	7
I.2- Types et localisation des zones froides .....	8

## I- Traitements appliqués aux images thermiques

Un lot de 1 701 images thermiques ont été acquises lors du vol effectué par l'UMR 5600 – EVS le 18 juillet 2017 entre 16h30 et 17h45, à l'aide de la caméra thermique VarioCam hr Research (équipée de l'objectif standard) élaborée par la société allemande Jenoptik. Les images ont une taille de matrice de 640\*480 pixels et la résolution spatiale moyenne calculée est d'environ 0,60 m. Cette caméra enregistre de la donnée dans la gamme de longueur d'onde allant de 7,5 à 14  $\mu\text{m}$ . La précision de la mesure donnée par le constructeur est de  $\pm 1$  °C ou  $\pm 1\%$  de la valeur affichée ; sa sensibilité thermique est de 30 mK à 30°C. Toutes les images ont été acquises en basses eaux puisque le débit à Vallon-Pont-d'Arc au moment du vol était de 6,0 m<sup>3</sup>/s. Le module enregistré à cette station est de 58,3 m<sup>3</sup>/s.

Originellement au format .irb et exprimées en degrés Kelvin, ces images ont avant tout été converties au format .tif pour être exploitables sous le logiciel ArcGIS, puis les températures ont été converties en degrés Celsius. Avant de procéder à l'analyse qualitative de ces images, un certain nombre d'opérations, décrites ci-dessous, ont été effectuées pour préparer les données : le géoréférencement des images, la création d'une mosaïque puis la calibration des températures.

### I.1- Géoréférencement des images thermiques et création d'une mosaïque

#### I.1.1- Géoréférencement des images thermiques

Une série d'images thermiques, le minimum parmi toutes celles disponibles, a été sélectionnée afin de représenter au mieux l'ensemble du linéaire de l'Ardèche dans le secteur défini pour l'étude par la fédération de pêche de l'Ardèche : le site classé du Pont d'Arc et la RNN GA (voir figure 1). En tout, 140 clichés ont été géoréférencés manuellement sous le logiciel ArcGIS, à l'aide des ortho-images de résolution 50 cm de la BD Ortho fournie par l'IGN. 3 courts secteurs n'ont pas été couverts lors des prises de vue : entre les PK 3,6 et 3,7 (voir image en page de garde), entre les PK 21,2 et 21,4 et au PK 27,0, le PK 0 correspondant au pont de Salavas.

L'erreur planimétrique (RMSE = Root Mean Square Error) moyenne calculée sur les images géoréférencées individuellement est d'environ 0,85 m. Il faut noter que le géoréférencement de ces images a été fait de manière à caler au mieux uniquement le talweg de l'Ardèche par rapport aux images de référence, au détriment du reste de la zone concernée. Un polynôme de degré 1 (de type affine) a été appliqué pour la déformation des images.

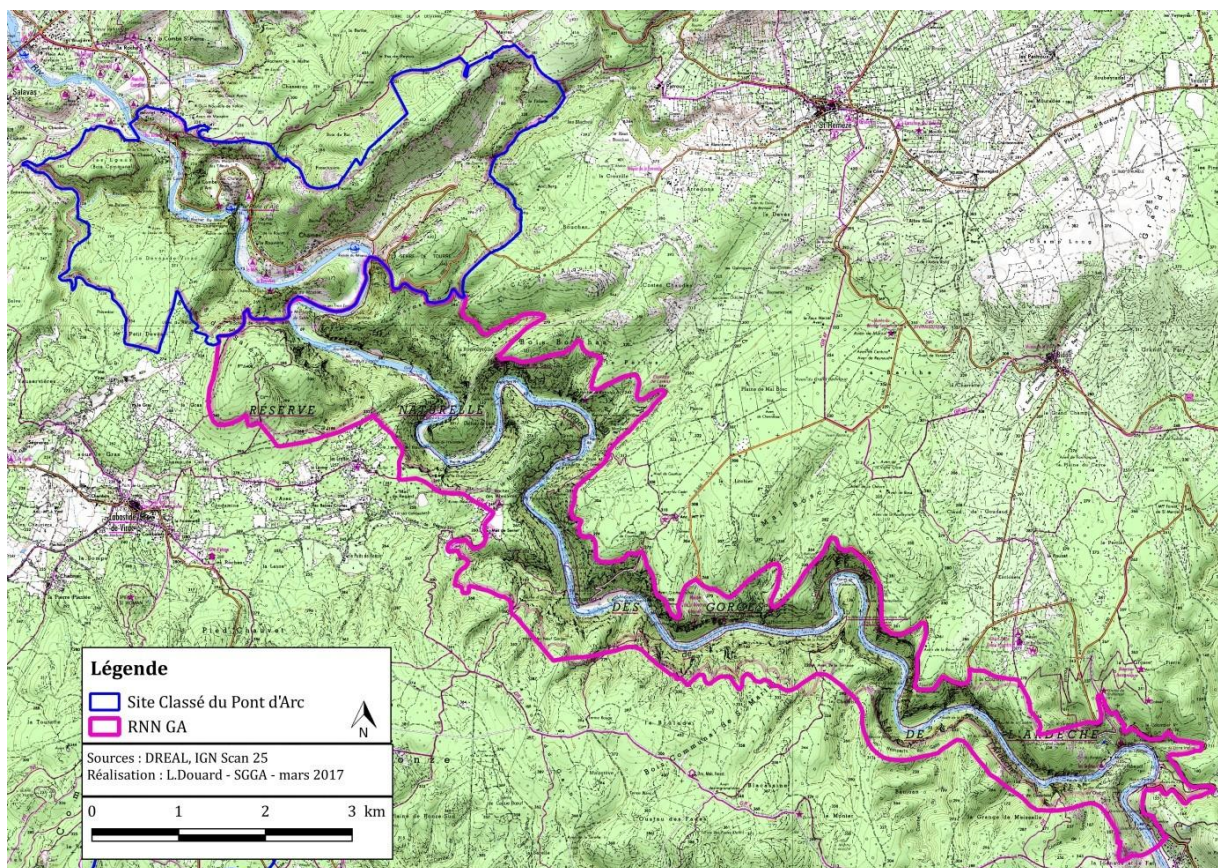


Figure 1 : Secteur défini pour l'étude par la fédération de pêche

## I.2- Création d'une mosaïque d'images thermiques

Les 140 clichés thermiques géoréférencés ont été mosaïqués sous le logiciel ArcGIS. Les images se superposant les unes aux autres, les valeurs de celles figurant au-dessus des autres ont été conservées lors de cette opération. La résolution spatiale de la mosaïque exportée est de 0,71 m.

## I.2- Correction des températures

25 sondes fournies par l'UMR 5600 – EVS à la Fédération de Pêche de l'Ardèche ont été placées dans le cours d'eau par les soins de cette dernière. Ces capteurs ont enregistré les températures du cours d'eau au pas de temps de la minute, entre le 17 et le 19 juillet 2017.

### I.2.1- Localisation des capteurs de températures in-situ

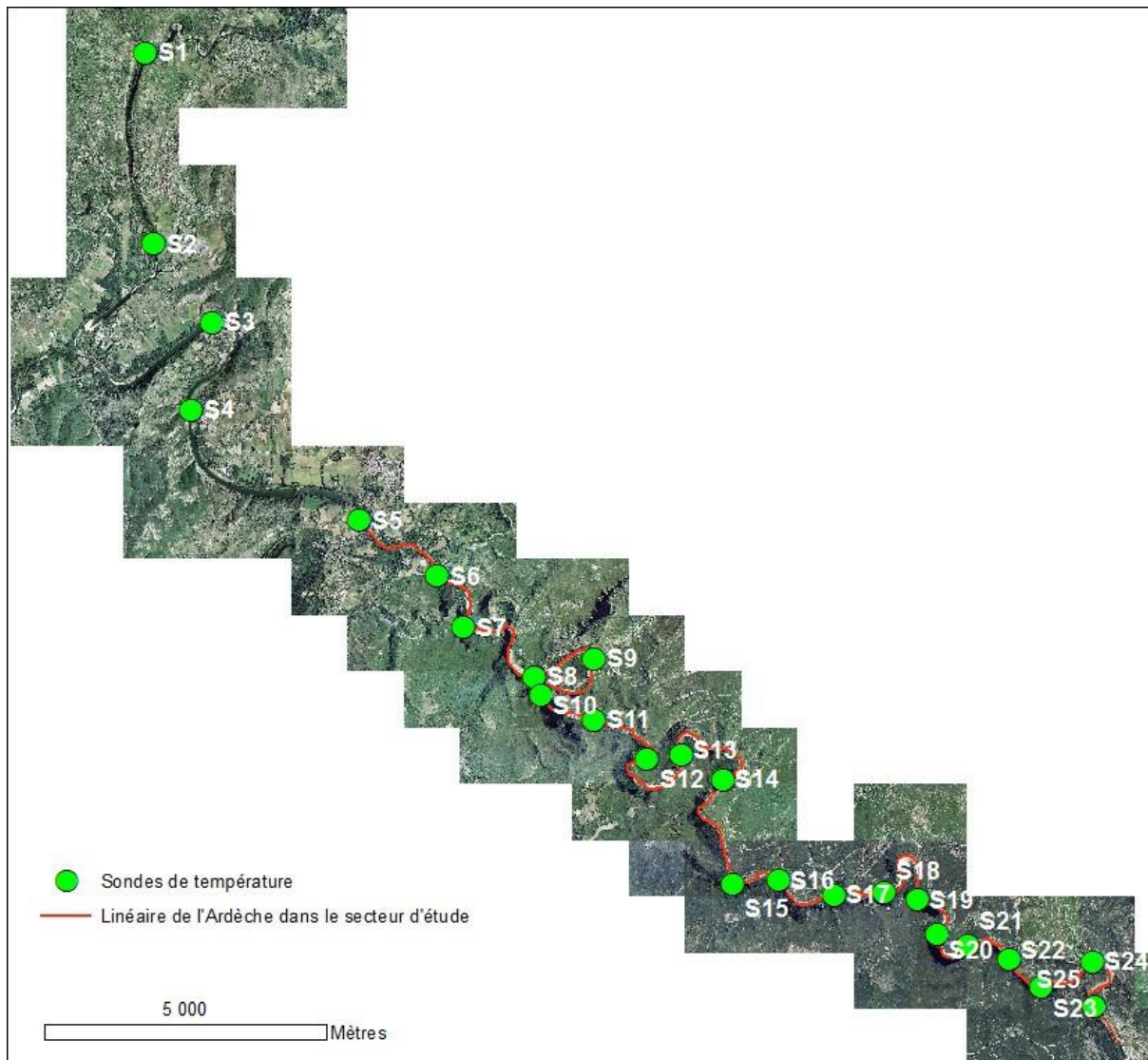


Figure 2 : Localisation des 25 capteurs de température placés par la Fédération de Pêche.

21 des 25 capteurs de température sont localisés dans le secteur d'étude, 4 ayant été placés en amont du pont de Salavas (voir figure 2). La position de chacun d'eux a été géolocalisée par les soins de la Fédération de Pêche. 5 de ces capteurs, à savoir S14, S17, S20, S21 et S24, semblent cependant être localisés hors du chenal en eau de l'Ardèche, comme l'illustre la figure 3.



Figure3: Illustration du décalage de la position des capteurs S14 et 17 par rapport au talweg de l'Ardèche.

### I.2.2- Comparaison des températures mesurées in-situ et estimées par imagerie infra-rouge thermique

Pour chacune des sondes localisées dans le secteur d'étude, la donnée mesurée par le capteur a été comparée à la température estimée par imagerie thermique, afin de calibrer ces dernières. Pour cela, les valeurs de températures mesurées par infra-rouge thermique ont été extraites au niveau de la localisation des sondes. La figure 4 illustre cela : une zone, légèrement décalée si la sonde est trop proche de la rive ou d'éléments autres que l'eau, est assimilée à l'eau dont la température est mesurée par le capteur. La température médiane calculée dans chaque zone d'assimilation, comprenant 34 pixels en moyenne, a été étudiée. Dans le cas des 5 capteurs dont la position est imprécise, la zone d'extraction des températures a été placée en bordure du chenal en eau, au plus proche de la position indiquée.

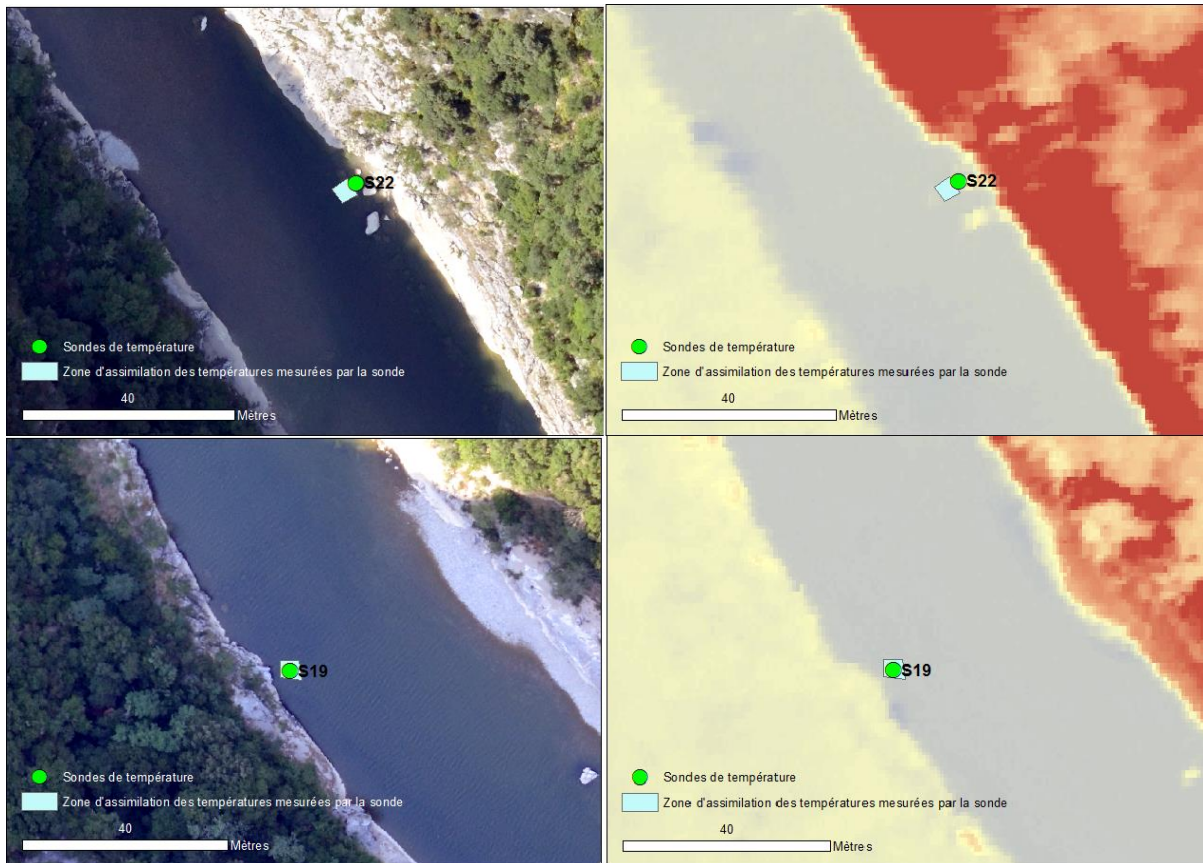


Figure 4 : Illustration du principe de l'extraction de valeurs de températures au niveau des sondes dans les images thermiques.

Dans la série des températures mesurées par les capteurs in-situ, la mesure effectuée à l'heure de prise de vue des images a été relevée, puis comparée à la température médiane estimée par imagerie thermique. La figure 5.a représente la corrélation entre ces deux types de températures. Il semble y avoir, de manière générale, une surestimation des températures mesurées par infra-rouge thermique, ces valeurs étant toujours supérieures à celles mesurées in-situ par les capteurs. Les capteurs S16 et S9 se détachent du nuage de point. La sonde S16 semble avoir mesuré des températures plus basses que celles observées par imagerie. En effet, d'après la figure 6 cette sonde semble localisée dans une zone profonde, donc les températures mesurées sont peut-être plus basses que celles de surface, captées par la caméra thermique. La sonde S9 semble au contraire avoir mesuré des températures plus élevées que celles qui apparaissent par imagerie.

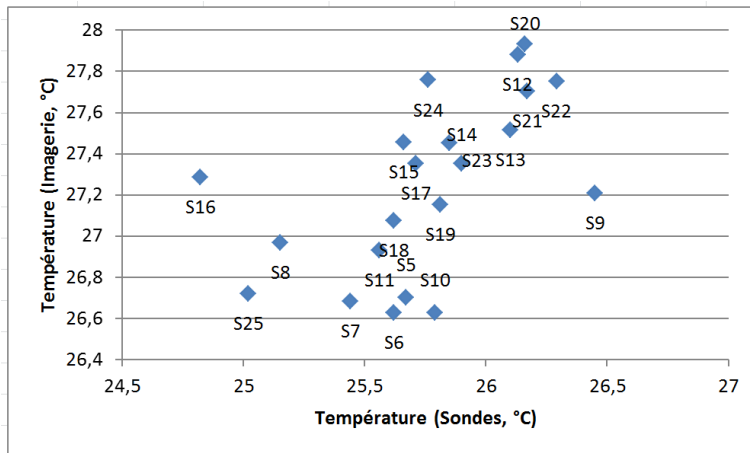


Figure 5 : Température estimée par imagerie thermique en fonction de la température mesurée in-situ par les capteurs.



Figure 6 : Localisation des sondes de températures S16 (à gauche) et S9 (à droite)

La figure 7 illustre l'erreur observée dans les mesures par imagerie : les valeurs représentées pour chaque sonde correspondent à la différence *Mesure in situ - Mesure par imagerie*. La moyenne de cette erreur est de  $-1,5^{\circ}\text{C}$ . Cette valeur a donc été retranchée à l'ensemble des pixels constituant la mosaïque d'images.

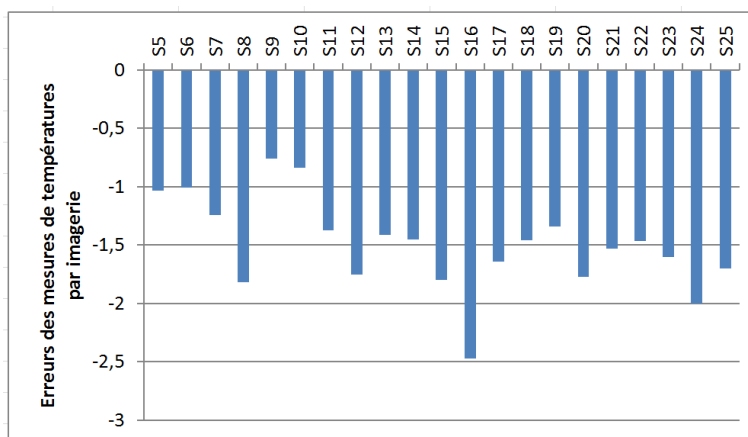


Figure 7 : Différences entre les valeurs mesurées in-situ par les capteurs et les valeurs estimées par imagerie thermique.

## II- Analyse qualitative des images

### II.1 Profil en long de la température médiane du thalweg

Le linéaire de l'Ardèche a été digitalisé sur l'ensemble du secteur étudié, soit presque 29 km. La température a été extraite dans les deux mètres de part et d'autre de ce linéaire, par segments de 100 mètres de long. Ces zones d'extraction ont été modifiées afin d'en extraire tous les artéfacts qui pourraient nuire à la mesure de la température : rochers, bancs de galets, canoës, etc. (voir figure 8). La température médiane a alors été calculée dans ces zones. Au milieu de chaque segment de 100 m, la largeur du chenal en eau a également été mesurée manuellement.



Figure 8: Illustration des corrections apportées aux zones d'extraction de la température sur les images thermiques. Image visible (en haut) et infra-rouge thermique (en bas) de la même zone.

La figure 9 représente le profil en long des températures médianes calculées sur le thalweg de l'Ardèche, par segments de 100 m de long. La partie basse de la figure représente l'évolution des largeurs du chenal, sur les mêmes segments. Les seuils observés dans le cours d'eau ont été représentés sur ces profils, et il est possible de noter qu'au niveau de la plupart des seuils est observé un léger pic de la température médiane. Ceci peut correspondre localement à un ralentissement des écoulements et à un léger échauffement de surface sans que cela induise

globalement un échauffement moyen de la lame d'eau. La comparaison des températures médianes avec les largeurs du chenal ne montre pas un lien marqué des deux séries. Les largeurs moyennes sont plus importantes d'une vingtaine de mètres en amont du PK 5. Cela correspond aux secteurs où les températures médianes sont globalement les plus basses sans qu'un lien explicite ne puisse être fait. L'importance des arrivées d'eau froide explique sans doute à elle seule la baisse des températures observées sur ce tronçon qui présente par ailleurs une morphologie un peu différente du tronçon aval. Le réchauffement thermique observé autour du PK 10 peut être également un échauffement de surface peut être plus marqué que les autres et lié à une réduction des vitesses qui se manifesterait aussi par un élargissement de la surface mouillée. Ceci reste à vérifier. Les échauffements observés aux Pk 7 et 25 ne semblent en revanche pas liés à des changements morphologiques particuliers.

La position des capteurs de température a également été reportée sur le profil des températures, relativement à la température enregistrée au moment de la prise de vue des images sur lesquelles a été réalisé ce profil. A l'exception des capteurs S9 et S16, qui se distinguaient déjà sur la figure 5, les variations observées correspondent aux grandes tendances du profil en long. Les capteurs S14 et S17, dont la localisation est trop éloignée du thalweg (voir figure 3), n'ont pas été représentés ici.

## I.2- Types et localisation des zones froides

La mosaïque des images thermiques a été observée afin de détecter visuellement la présence de zones froides. Celles-ci ont été digitalisées manuellement pour en définir la position le long du linéaire de référence ainsi qu'une surface. La figure 10 illustre différents types de zones froides recensés sur le secteur d'étude.

Les zones froides recensées dans le secteur d'étude sont au nombre de 117. Pour 106 d'entre elles, donc une très large majorité, il s'agit de « suintements latéraux », c'est-à-dire d'écoulements résurgents du massif karstique et qui s'écoulent directement dans le chenal du cours d'eau. Nous avons différencié les « suintements affluents », qui s'écoulent sur les berges ou les parois des gorges avant de rejoindre le chenal, les « affluents », qui sont des cours d'eau à part entière, et les « bras morts », qui correspondent à d'anciens lits de l'Ardèche et où persiste la présence d'eau. L'eau filtrée à travers les bancs de graviers peut ressortir plus fraîche que l'eau du chenal : nous avons nommé ce type de zone froide « exfiltration de banc ». Enfin, une pièce d'eau qui ne semble connectée au cours d'eau que par la nappe a été qualifiée d'« annexe ». Le tableau 1 décompte les différents types de zones froides recensées.

Type de zone froide	Effectif
Suintement latéral	106
Suintement affluent	7
Affluent	1
Bras mort	1
Annexe	1
Exfiltration de banc	1
Total	117

Tableau 1 : Types et nombre de zones froides recensés dans le secteur étudié.

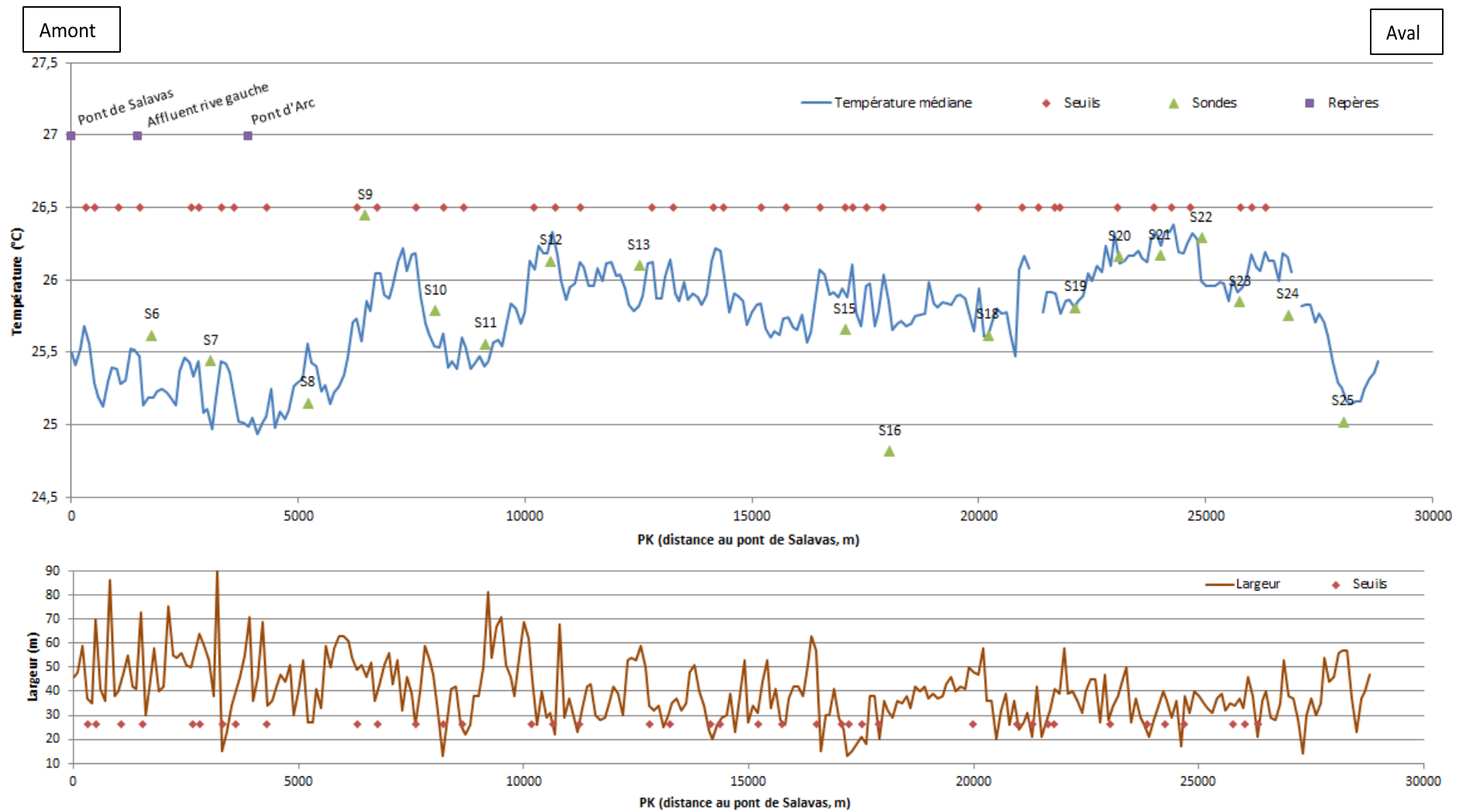


Figure 9 : Profil en long de la température de surface médiane observée (en haut) et de la largeur mesurée (en bas) dans le thalweg de l'Ardèche. Position des seuils et localisation des capteurs de température.

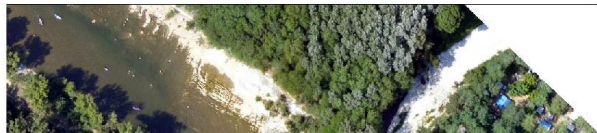
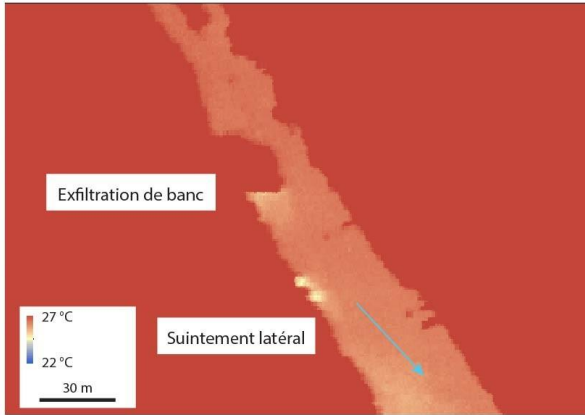
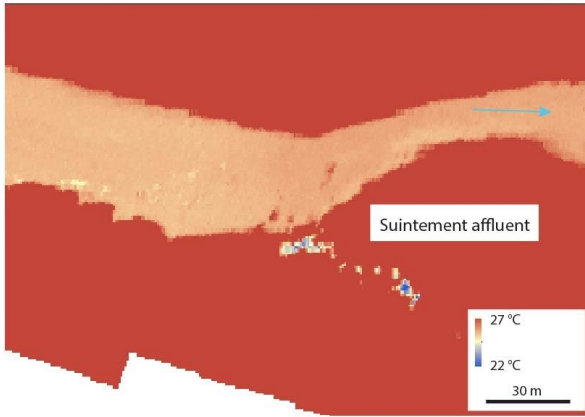
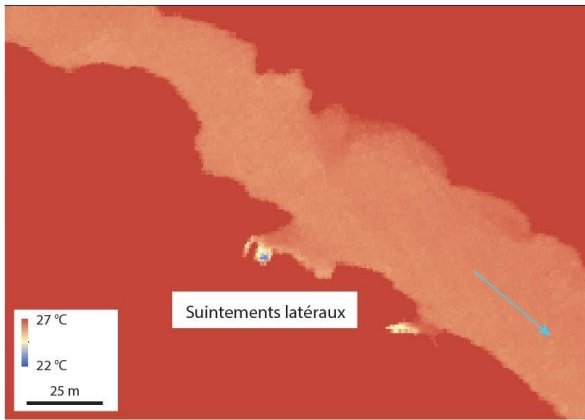


Figure 10: Illustration de zones froides recensées dans le secteur étudié.

La figure 11 localise l'ensemble des zones froides détectées lors de l'observation des images thermiques. De manière générale, ces éléments sont globalement plus froids, de plus grande taille, mais ils semblent également plus nombreux dans la partie amont du secteur étudié. C'est ce que nous illustre aussi la figure 12, qui représente les zones froides sur le profil en long du cours d'eau. La partie haute du graphique présente leur position en fonction de leur température médiane, et la partie basse présente en plus des tailles de cercles proportionnelles à leur surface.

La densité des zones froides est particulièrement importante en amont du PK 10 (figure 11). Elle est moindre jusqu'au PK 21,5 et les zones froides relevées sont de taille relativement réduite sur ce tronçon du cours d'eau. Cette densité est à nouveau plus importante entre les PK 21,5 et 25,5, mais les surfaces sont clairement limitées dans ce secteur. L'aval du secteur étudié, à l'aval du PK 25,5, présente peu de zones froides.

Les types de zones froides recensées montrent que le fonctionnement karstique du bassin versant est prédominant dans l'apport d'eau fraîche au cours d'eau principal dans ce secteur. La présence d'un seul affluent du cours d'eau, en rive gauche au PK 1,42, apporte une eau dont la température médiane est de 23,8°C. Cela représente presque 2°C de moins que le thalweg, dont la température médiane à cet endroit est de 25,5°C. Le seul bras mort observé se situe au PK 3,26, en rive droite. Son eau est d'une température médiane de 24,3°C, soit à peine 1°C de moins que le chenal principal, où l'on mesure 25,2°C. Et la seule exfiltration de banc qui semble produire une eau significativement plus froide que celle du thalweg (26,3°C) se situe au PK 24,83. L'eau qui en ressort est à 25,6°C.

Il est intéressant de noter que les bancs de galets n'enregistrent globalement pas d'échange thermique dans le secteur étudié, contrairement à d'autres cours d'eau comme l'Ain par exemple, où ils sont nombreux. La figure 13, tirée de l'article de Wawrzyniak et al. (2016), illustre l'effet d'une exfiltration de banc sur la température de l'eau dans l'Ain : l'eau qui ressort à l'aval du banc parce qu'elle a traversé la masse graveleuse est plus froide que le chenal. On se pose la question d'un colmatage du lit de l'Ardèche qui limiterait en effet les échanges d'eau entre la surface et la sub-surface. Les acquisitions faites dans les gorges de la Cèze récemment montrent que ces échanges au niveau des bancs y sont beaucoup plus fréquents.

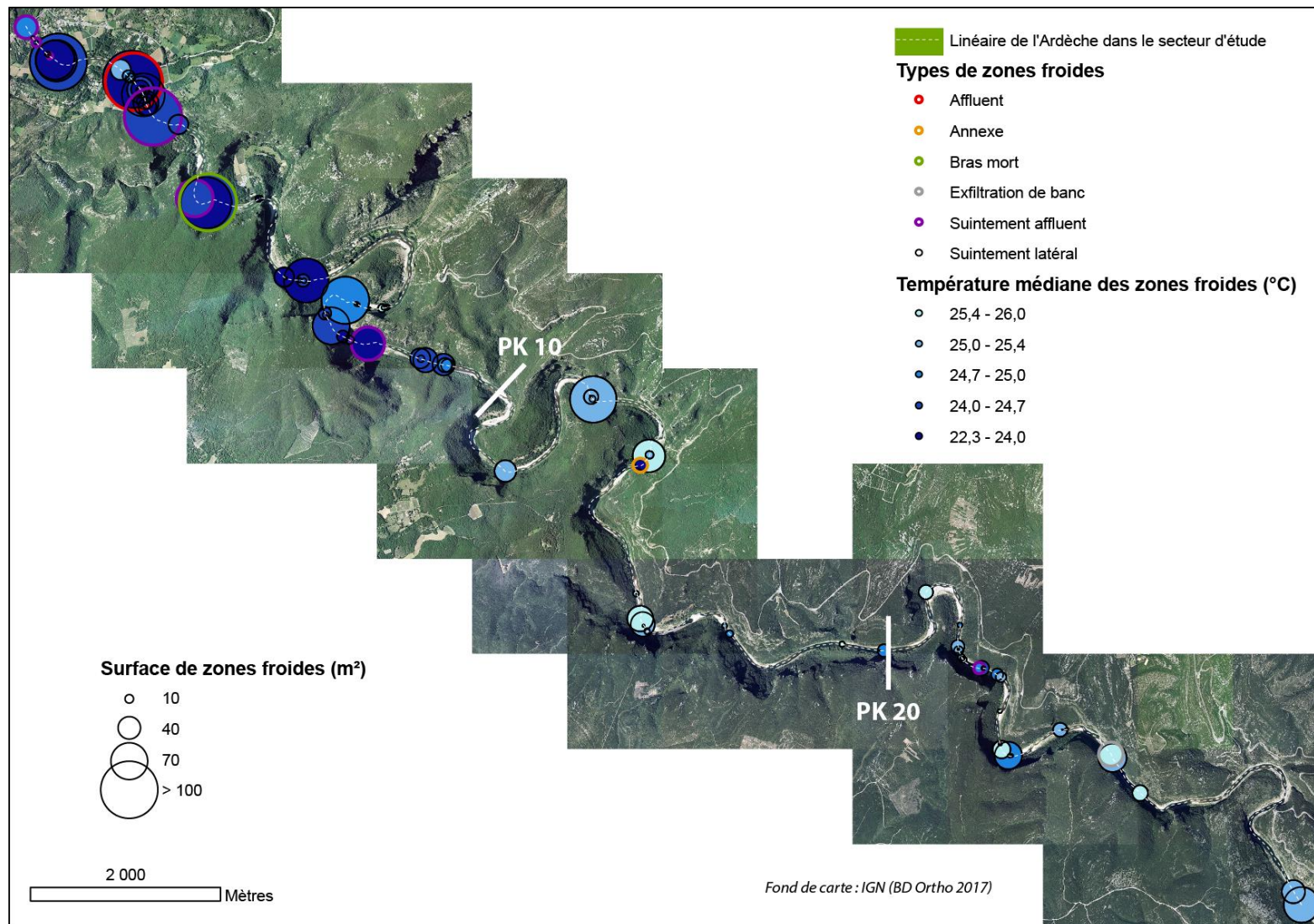


Figure 11 : Localisation des zones froides dans le secteur étudié de l'Ardèche, en fonction de leur type, de leur surface et de leur température médiane.

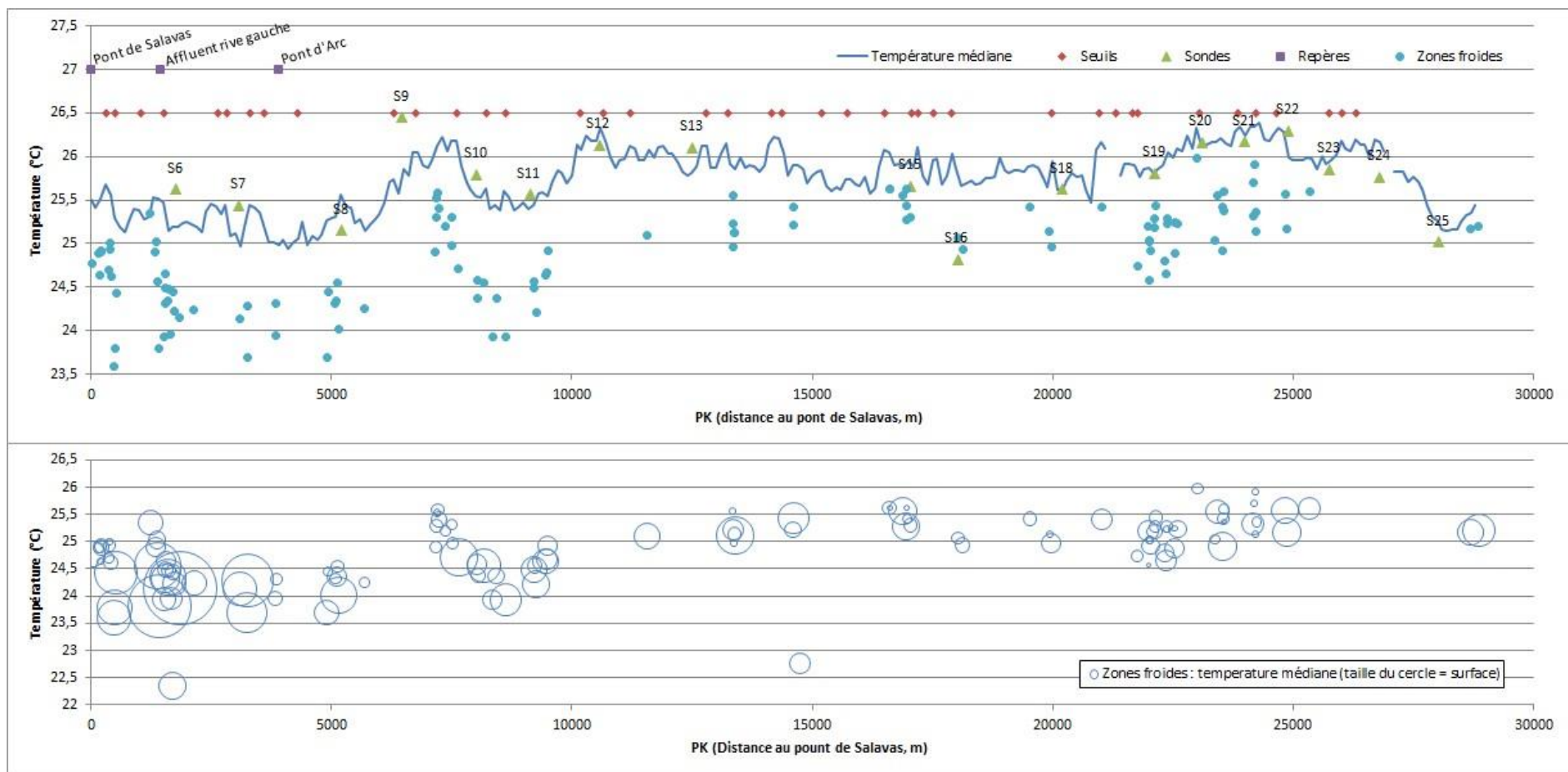


Figure 12 : Profil en long de la température médiane du thalweg de l'Ardèche et localisation des zones froides recensées, en fonction de leur température et de leur surface (dans la partie basse du graphique).

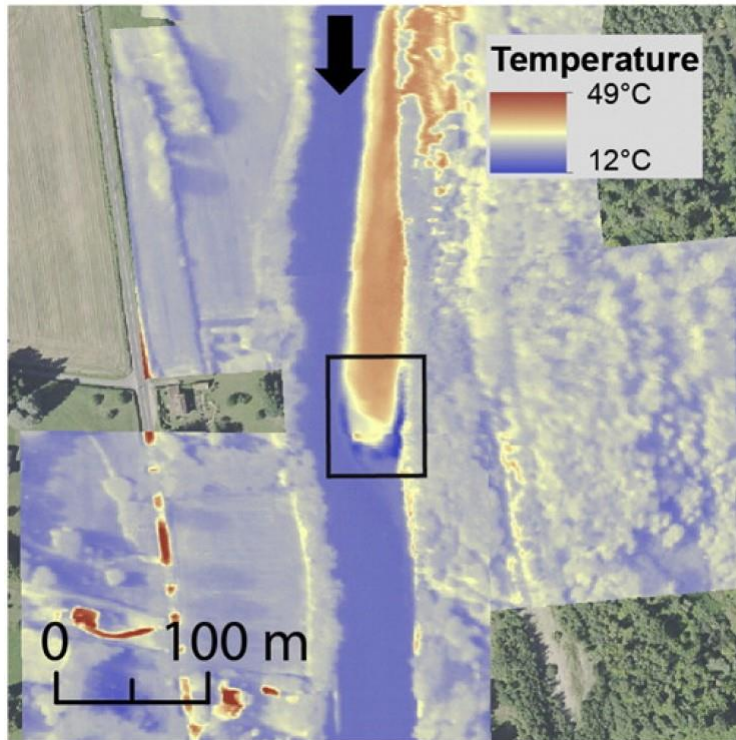


Figure 13 : Exemple de zone froide correspondant à une exfiltration de banc sur l'Ain (Wawrzyniak et al., 2016)

Les températures médianes des zones froides observées dans le tronçon d'étude sont globalement concentrées entre  $-0,5^{\circ}\text{C}$  et  $-1,5^{\circ}\text{C}$  en dessous des températures médianes observées dans le thalweg (voir figure 12). La température médiane minimale observée est de  $22,3^{\circ}\text{C}$ , elle correspond à un suintement latéral localisé en rive gauche de l'Ardèche, au PK 1,69. A cet endroit le thalweg est plus chaud de presque  $3^{\circ}\text{C}$ , car on y relève  $25,1^{\circ}\text{C}$  en médiane. La seule annexe fluviale recensée, en rive gauche au PK 14,75, présente une température médiane de  $22,8^{\circ}\text{C}$ , contre  $25,9^{\circ}\text{C}$  dans le thalweg (soit  $3^{\circ}\text{C}$  de plus également). Toutes les autres zones froides ont des températures médianes qui dépassent  $23,5^{\circ}\text{C}$ .

La figure 14 présente, sur le linéaire du secteur d'étude, le nombre et la surface cumulés des zones froides. Cela permet de voir que près de 50% des surfaces d'eau froide se situent à l'amont du secteur d'étude (pk 0-2) et que 2 autres zones sont caractérisées par des refroidissements significatifs (Pk 7-9 ; Pk 23-25).

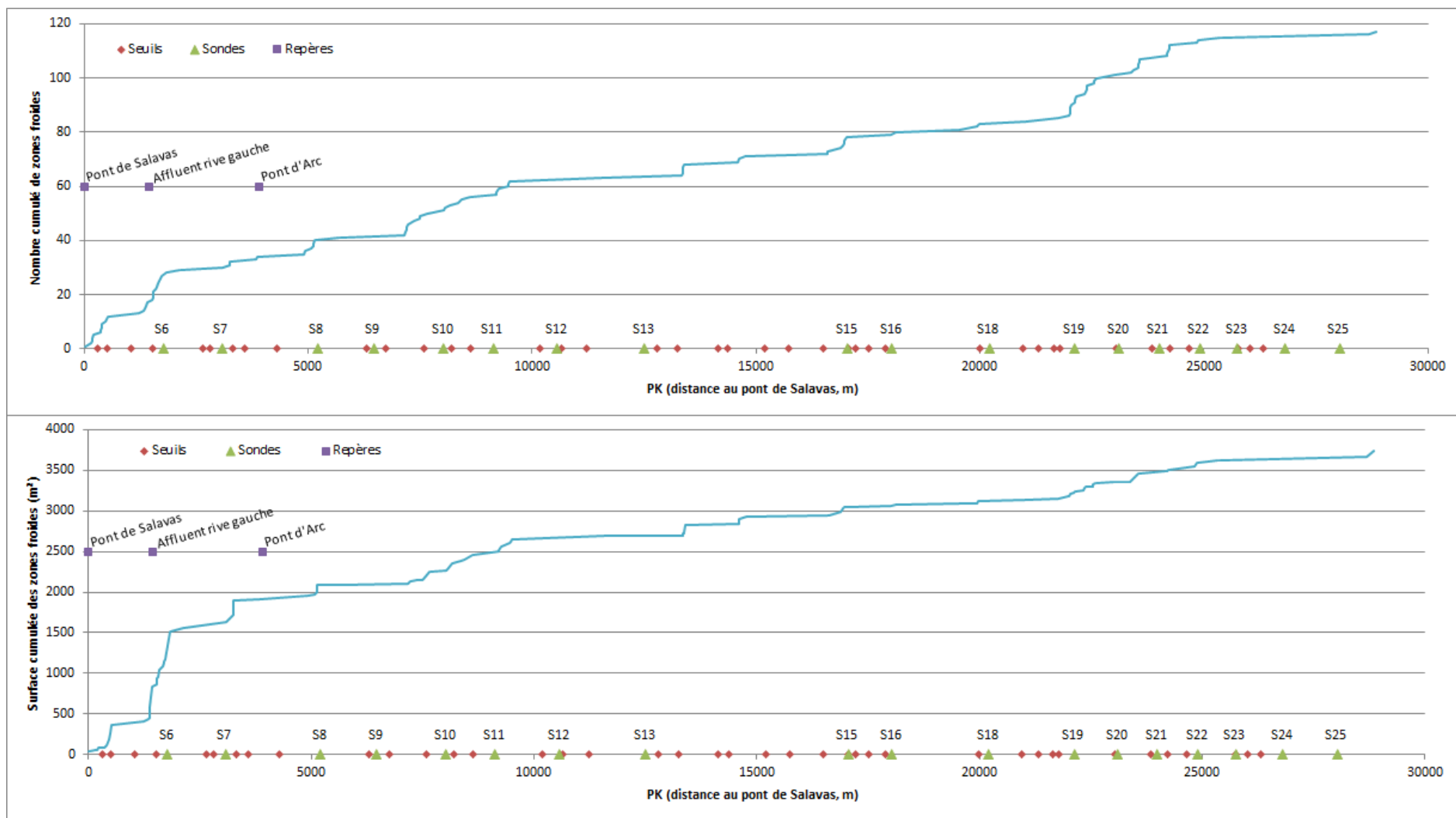


Figure 14 : Effectif cumulé (en haut) et surface cumulée (en bas) des zones froides recensées sur le linéaire du secteur étudié

